



Support de cours

Génie Mécanique Niveau 1

Procédés de mise en forme



Sommaire

1.	Chapitre I :procédés de mise en œuvre par déformation plastique	10
1.1.	Classification de Quelques Procédés par déformation plastique.....	10
1.2.	Forgeage libre	10
1.3.	Laminage	11
1.4.	Estampage.....	12
1.5.	Filage	12
1.6.	Cisaillage	13
1.7.	poinçonnage et découpage.....	13
1.8.	Pliage	14
1.9.	Roulage et cintrage	14
1.10.	Emboutissage	14
1.11.	Formage à haute énergie	15
1.11.1.	Formage par explosion	15
1.11.2.	Formage par électromagnétique	15
1.11.3.	Formage par électrohydraulique.....	16
1.12.	Frittage	16
2.	Chapitre II : Le cisaillage	18
2.1.	Définition.....	18
2.2.	Principe.....	18
2.3.	Effort de coupe	18
2.4.	Différentes méthodes de cisaillage	18
2.4.1.	Cisaille à lames parallèles	19
2.4.2.	Cisaille à lames obliques	19
2.4.3.	Cisaille à lames circulaires.....	21
2.5.	Paramètres de coupe	23
2.5.1.	L'angle d'attaque :	23
2.5.2.	L'écartement entre les lames (ou jeu entre lames) :.....	23
2.5.3.	L'angle de coupe (ou angle de tranchant) :	23
	Chapitre III : poinçonnage – découpage	25
2.6.	Principe.....	25
2.7.	Désignation des opérations.....	25
2.8.	Matrice et poinçon	26
2.9.	Jeu entre matrice et poinçon	27
2.10.	Terminologie des pièces d'un outil de découpage.....	28
2.11.	Opération de découpage.....	29
2.12.	Mise en bande des pièces	29
2.12.1.	définition.....	Erreur ! Signet non défini.
2.12.2.	Détermination du nombre de pièce par feuille de tôle.....	30
2.13.	Effort de découpage ou poinçonnage.....	31
2.13.1.	Méthode analytique	31
2.13.2.	Méthode utilisant l'abaque	31
2.14.	Effort à créer sur le devêtisseur et Effort de l'attraction.....	32
3.	Chapitre IV : Pliage.....	34
3.1.	Définition et principe.....	34
3.2.	Machines de pliage	34
3.2.1.	Plieuse universelle manuelle	34
3.2.2.	Plieuse presse universelle.....	35
3.3.	Différents techniques de pliage	35
3.3.1.	Pliage en frappe.....	35
3.3.2.	Pliage en l'air	35

3.3.3.	Pliage sur élastomère.....	36
3.4.	Outils spéciaux	36
3.4.1.	Pliage en V	36
3.4.2.	Pliage en équerre	37
3.4.3.	Pliage en U	37
3.4.4.	Pliage en Z.....	38
3.5.	Quelques exemples de travaux réalisés sur presse plieuse.....	38
3.6.	Analyse de la déformation.....	39
3.6.1.	Position de fibre neutre	39
3.6.2.	Rayon minimale de pliage.....	40
3.7.	Avantages et Inconvénients	41
3.8.	Développement du flan.....	41
3.8.1.	Méthode des sections: (1 ^{ère} Méthode)	41
3.8.2.	Calcul théorique: (2 ^{ième} Méthode)	42
3.8.3.	Les côtes machine (côte de mise en buté).....	43
3.9.	Rayon et Angle du poinçon à utilisé en pliage	43
3.9.1.	Rayon de poinçon.....	44
3.9.2.	Angle de poinçon	44
3.10.	Calcul de l'effort de pliage	46
3.10.1.	Le pliage en V.....	47
3.10.2.	Pliage en U.....	48
4.	Chapitre V : EMBOUTISSAGE	49
4.1.	Principe.....	49
4.2.	Procédés d'emboutissage.....	49
4.2.1.	Emboutissage en expansion	50
4.2.2.	Emboutissage en rétreint	50
4.3.	Machines utilisées en emboutissage	50
4.4.	Différents types d'emboutissages.....	51
4.4.1.	Emboutissage à froid.....	51
4.4.2.	Emboutissage à chaud	51
4.5.	Outillages.....	51
4.5.1.	Le jeu entre le poinçon et la matrice :	51
4.5.2.	Le rayon sur la matrice :	51
4.5.3.	Le rayon sur le poinçon (Rp) :	52
4.6.	Détermination du flan.....	53
4.6.1.	Méthode analytique	53
4.6.2.	Méthode en utilisant des abaques.....	56
4.7.	Détermination de nombre de passe.....	58
4.8.	Vitesse d'emboutissage	60
4.9.	Effort d'emboutissage.....	60
4.9.1.	Effort de serre flan.....	60
4.9.2.	Effort de poinçon.....	61
5.	Chapitre VI : Le CINTRAGE	62
5.1.	Définition.....	62
5.2.	Principe.....	62
5.3.	Langueur développée.....	62
5.4.	Machines à cintrer les tôles :	63
5.4.1.	Différents types de machines	63
5.5.	CINTRAGE D'UN TRONC DE CÔNE	67
5.5.1.	Le Croquage	67
5.5.2.	Le Cintrage	67
5.5.3.	Machines utilisées :	67

6. Chapitre VII : Découpage Thermique et Jet d'eau.....	68
6.1. L'oxycoupage	68
6.1.1. Définition :	68
6.1.2. Principe de l'oxycoupage.....	68
6.1.3. Outillages et moyens utilisés.....	70
6.2. Le coupage plasma :	72
6.2.1. Principe :	72
6.2.2. Fonctionnement du PLASMA :.....	73
6.2.3. Gaz plasmagènes :.....	73
6.2.4. Différentes torches pour la découpe PLASMA:	73
6.2.5. Avantages et inconvénients du PLASMA:.....	74
6.3. Le découpage au jet d'eau	74
6.3.1. Principe de la découpe par jet d'eau	74
6.3.2. Application du découpage par jet d'eau.....	75
6.3.3. Installation d'un poste de découpe par jet d'eau	75
6.3.4. Caractéristiques de la découpe par jet d'eau.....	75
6.3.5. Techniques mises en œuvre.....	76
6.4. Le découpage Laser	76
6.4.1. Définition :	77
6.4.2. Principe de coupage laser	77
6.4.3. Les avantages du procédé :.....	78
6.4.4. Les inconvénients :.....	78
6.5. Comparaison des différents procédés de découpage	78
6.5.1. Apparition des procédés	78
6.5.2. Epaisseurs découpées	79

Liste des figures

Figure 1- Forgeage libre.....	11
Figure 2 - Procédé de laminage.....	12
Figure 3 - Procédé d'estampage.....	12
Figure 4 - Procédé de filage.....	13
Figure 5 - Cisailage.....	13
Figure 6 - Outil de poinçonnage.....	13
Figure 7 - pliage en V.....	14
Figure 8 - Cintrage type pyramidal.....	14
Figure 9 - Emboutissage avec serre-flan.....	15
Figure 10 - Formage par explosion.....	15
Figure 11 - Formage par électromagnétique.....	16
Figure 12 - Formage par électromagnétique.....	16
Figure 13 - Frittage.....	17
Figure 14 - Cisailages des tôles.....	18
Figure 15 - Cisaille à lames parallèles.....	19
Figure 16 - Schéma de principe d'un Cisaille à lames parallèles et à lames obliques.....	20
Figure 17 - Cisaille manuelle.....	20
Figure 18 -a :Cisaille à lames longues, b : Cisaille à lames courtes.....	21
Figure 19 -Cisaille à lames circulaires.....	22
Figure 20 -Exemple de cisaille circulaire.....	22
Figure 21 -Outillage classique de poinçonnage.....	25
Figure 22 -Poinçon (a) et matrice(b).....	26
Figure 23 -La hauteur de coupe h.....	27
Figure 24 -Forme conique de l'ajour.....	28
Figure 25 -Exemple d'outil à engrenage.....	28
Figure 26 -Mise en bande en découpage.....	30
Figure 27 -abaque permettant de déterminer l'effort de découpage.....	32
Figure 28 - Procédés de pliage : (a) pliage par rotation d'un outil pivotant, (b) pliage sur presse plieuse.....	34
Figure 29 - Plieuse à tablier manuelle.....	34
Figure 30 -Plieuse presse universelle.....	35
Figure 31 -pliage en frappe.....	35
Figure 32 -pliage en l'air.....	36
Figure 33 -pliage sur élastomère.....	36
Figure 34 -pliage en V.....	37
Figure 35 -pliage en équerre.....	37
Figure 36 -pliage avec ailes extérieur en deux passe(a),pliage avec outil à cames(c), pliage avec ailes intérieur en deux passes(b).....	38
Figure 37 - a) trois opérations b) deux opérations.....	38
Figure 38 -Outil de liage en Z.....	38
Figure 39 -Opérations réalisées sur une presse plieuse.....	39
Figure 40 - La développée avant pliage.....	42
Figure 41 -Abaque de détermination de la valeur de C.....	43
Figure 42 -Côte machine(côte de mise en buté).....	43
Figure 43 -Phénomène du retour élastique.....	43
Figure 44 -pliage en V sur presse plieuse.....	44
Figure 45 -Abaque du Coefficient de retour élastique.....	46
Figure 46 -Effort de pliage :F1.....	47
Figure 47 -Coefficient en fonction de V.....	47
Figure 48 -Effort de pliage pour un acier de résistance $400 < R_m < 450 \text{ N/mm}^2$	48

Figure 49 - (1) Emboutissage avec serre flan(2) Limitation aux embouties de faible hauteur ..	49
Figure 50 -Procédé d'emboutissage	49
Figure 51 -Emboutissage en expansion.....	50
Figure 52 -Emboutissage en rétreint	50
Figure 53 -Variation de l'arrondi sur la matrice	52
Figure 54 -le rayon sur le poinçon	52
Figure 55 -Pièce cylindrique	53
Figure 56 -Centre de gravité d'un arc	56
Figure 57 -Emboutis sans collerette	57
Figure 58 - Emboutis avec collerette.....	58
Figure 59 -principe	62
Figure 60 -Principe de croquage	64
Figure 61 -Cintrage total	64
Figure 62 -Principe de cintrage à la presse	66
Figure 63 -Machines utilisées	67
Figure 64 -Machines utilisées	68
Figure 65 -Pièce oxycoupée	68
Figure 66 -Combustion primaire au niveau du dard	69
Figure 67 -Mécanisme de l'oxycoupage	69
Figure 68 -Sur le bord d'un profilé/ Support à roulette pour la coupe rectiligne/ Compas guide pour la coupe circulaire	71
Figure 69 - machine de coupage à gabarit.....	71
Figure 70 - machine de coupage à programme numérique	71
Figure 71 - principe d'une installation oxycoupage.....	71
Figure 72 -Le coupage plasma	73
Figure 73 -Les différents torches	74
Figure 74 -Jet d'eau.....	74
Figure 75 -Le découpage laser	77
Figure 76 -principe de focalisation laser.....	78
Figure 77 -: les principales étapes du développement des procédés	79

Liste des tableaux

Tableau 1 - Procédés de déformation plastique	10
Tableau 2 - Rc :des matériaux courants	31
Tableau 3 - Tableau de Coefficient de proportionnalité	39
Tableau 4 - Rayon minimal de pliage	40
Tableau 5 -Coefficient du Retour élastique.....	46
Tableau 6 -Les éléments des embouties	54
Tableau 7 - Coefficients de réduction	59
Tableau 8 -vitesses d'emboutissage	60
Tableau 9 -Pression des matériaux	60
Tableau 10 - Effort de poinçon	61
Tableau 11 -Principe de cintrage.....	62
Tableau 12 -Les machines de cintrage	63
Tableau 13 -Le croquage pour différentes épaisseur de pièce	65
Tableau 14 -Choix des paramètres d'oxycoupage	70
Tableau 15 - Les combustibles de l'oxycoupage	72
Tableau 16 -Valeurs limites d'épaisseur, pour les principaux matériaux métalliques, pour chaque procédé	79

Avant- propos

Ce support présente les techniques de procédés de mise en forme par déformation plastique les plus utilisés dans l'industrie. Le contenu est destiné aux techniciens intéressés par ces techniques. Pour chacune des techniques, une présentation des principes et méthodes d'utilisation est faite.

Buts et Objectifs

Le but de ce support est d'étudier les différents modes de procédés de mise en forme par déformation plastique. Plus spécifiquement, au terme de ce cours, l'étudiant sera en mesure de:

- ✓ Décrire les différentes méthodes de déformation plastique (découpage, emboutissage, pliage,...)
- ✓ Identifier les différents outils et instruments utilisés par ces modes.
- ✓ Enoncer les paramètres définissant chaque mode

Il se compose de six chapitres:

-  Chapitre 1 : Procédés de mise en œuvre par déformation plastique
 -  Chapitre 2 : le cisailage
 -  Chapitre 3 : poinçonnage – découpage
 -  Chapitre 4 : pliage
 -  Chapitre 5 : emboutissage
 -  Chapitre 6 : le cintrage
-

1. Chapitre I :procédés de mise en œuvre par déformation plastique

1.1. Classification de Quelques Procédés par déformation plastique

Matière de base	Sollicitation	Procédé	Série	Exemples
Solide	Pression directe	Forgeage	Pièces unitaires ou petites séries	Pièces de décoration, meubles...
		Laminage		Rails de trains, poutrelles, tôles...
		Estampage	Grandes séries	Vilebrequins, leviers, bielles...
	Pression indirecte	Filage direct	Grandes séries	Visseries, douilles...
		Filage inverse	Grandes séries	Boîtes de coca
		Tréfilage	Grandes séries	Fils de bobines
Feuille (Tôle)	Cisaillement	Cisaillage		Tôlerie
		Poinçonnage et découpage		Tôles perforée
	Flexion	Pliage		Tôleries
		Roulage et cintrage		Boîtes de tomates, virole...
	Traction	Emboutissage	Grandes séries	Automobiles, électroménagers (casserolles)
	Haute énergie	Formage par explosion	Pièces unitaires ou petites séries	Fond des grandes citernes
		Formage par électrohydraulique		
		Formage par électromagnétique	Grandes séries	
	Poudre	Pression + haute température	Frittage	Grandes séries

Tableau 1 - Procédés de déformation plastique

1.2. Forgeage libre

Le forgeage permet d'élaborer des pièces brutes par déformation plastique du métal sous l'effet de choc ou de pression. Il est le plus souvent exécuté à chaud et conduit à l'obtention d'ébauche dont la forme est assez proche de la pièce finie. La matière d'œuvre est comprimée suivant une direction et se déplace librement suivant les deux autres. Le forgeage libre permet de réaliser toutes les formes possibles quel que soit le matériau de la pièce mais il est utilisé pour réaliser des pièces unitaires ou en petite série.

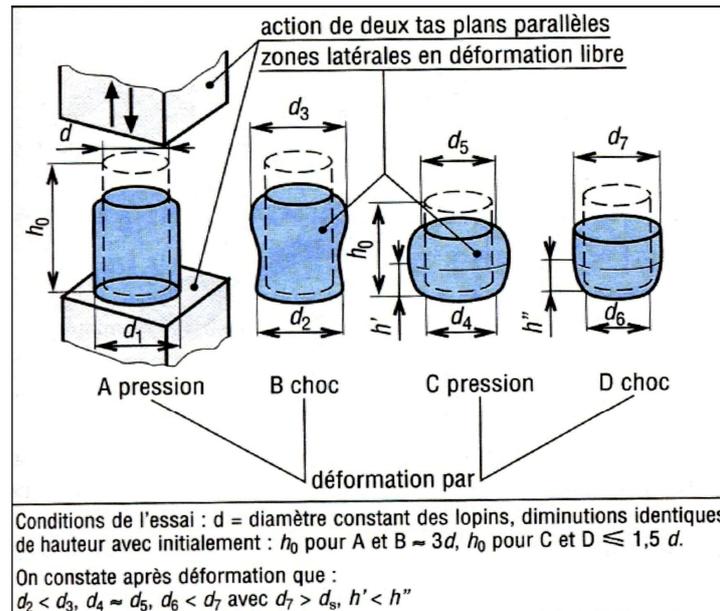


Figure 1- Forgeage libre

Pour obtenir une pièce par forgeage, deux types d'engins sont utilisés :

- Engins travaillant par choc où un des tas est animé d'une vitesse supérieur ou égale à 6m/s au moment ou il frappe la pièce (marteaux). L'énergie nécessaire à ce mode de déformation est égale à $\frac{1}{2} mV^2$ (énergie cinétique), m est la masse en Kg de l'organe de frappe (marteau) et V la vitesse, en m/s, communiquée à cette masse.
- Engins travaillant par pression : le coulisseau (presses mécaniques), le piston (pour les presses hydrauliques), portant le tas de déformation, se déplace à une vitesse inférieure à 1m/s.

1.3. Laminage

Le produit passe entre deux cylindres tournant en sens inverse qui lui font subir une réduction d'épaisseur au profit de la longueur. Par laminage, on obtient des produit en feuille (tôle) ou des profilés (rail, barre, poutrelles). La réduction d'épaisseur varie de 20 à 90 % suivant la température, le type de laminoirs et le nombre de passe. On distingue le laminage à chaud et le laminage à froid. Le laminage à froid est généralement utilisé pour obtenir des épaisseurs faibles et inférieures ou égales à 3mm.

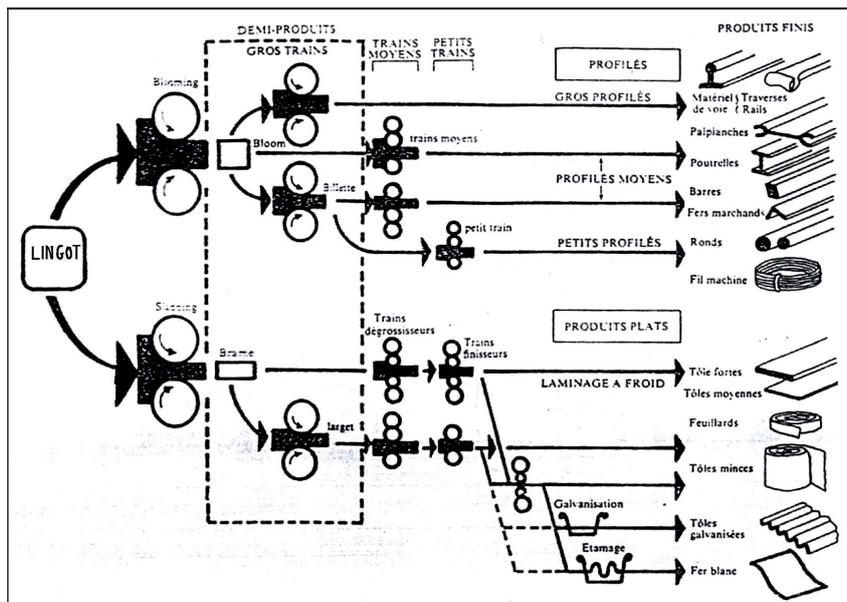


Figure 2 - Procédé de laminage

1.4. Estampage

C'est le formage par choc ou pression d'un lapin métallique intercalé entre deux matrices dans lesquelles sont réalisées des gravures ou empreintes reproduisant la forme de la pièce à obtenir. Sous l'action des forces extérieures le métal se déforme et remplit les empreintes. L'estampage s'effectue généralement en deux opérations ébauche et finition suivie d'un ébavurage.

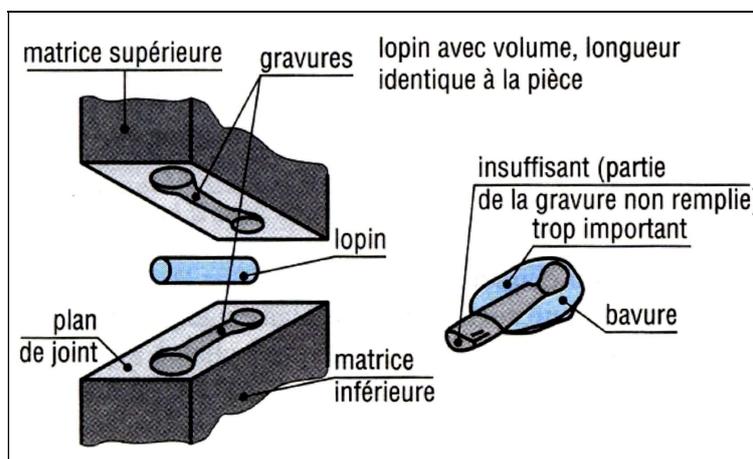


Figure 3 - Procédé d'estampage

1.5. Filage

Il consiste à presser une billette au travers d'une filière le métal est façonné sur toute sa longueur selon la forme de la filière. Dans le cas du filage direct le métal s'écoule dans le sens de déplacement du poinçon. Lorsque le métal s'écoule autour ou le long du poinçon ou à l'intérieure, le filage est dit inverse dans ce cas le métal se déplace à contre sens du poinçon.

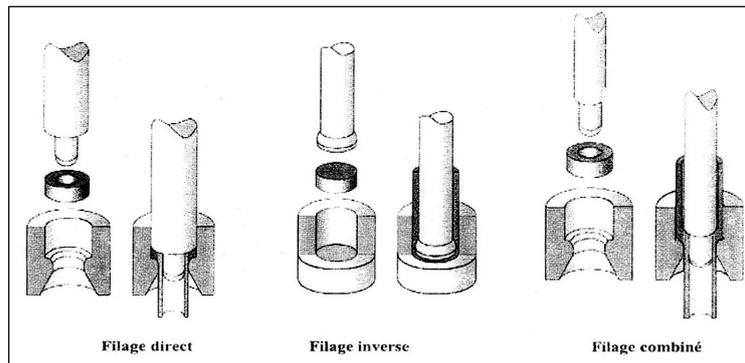


Figure 4 - Procédé de filage

1.6. Cisailage

C'est la séparation totale ou partielle d'un élément métallique à l'aide de deux lames dont l'une au moins est mobile.

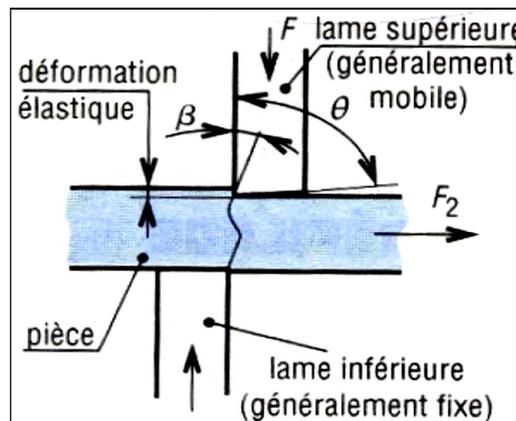


Figure 5 - Cisailage

1.7. poinçonnage et découpage

C'est un cisailage sur un contour fermé. L'outillage est constitué d'un poinçon et d'une matrice ayant la forme de l'ajour à poinçonner ou la forme de la pièce à découper.

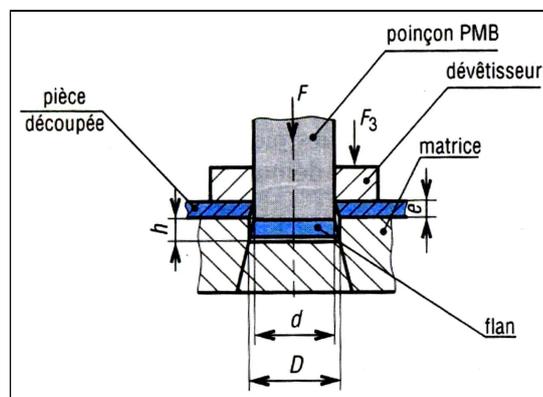


Figure 6 - Outil de poinçonnage

1.8. Pliage

Sous l'action d'une force appliquée sur un flan reposant sur deux ou plusieurs appuis ou encastré à une extrémité, le produit fléchi.

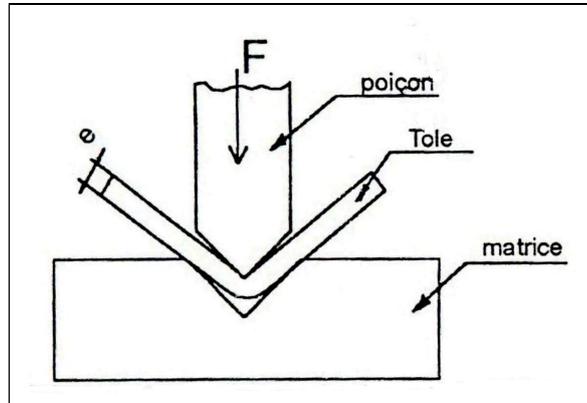


Figure 7 - pliage en V

1.9. Roulage et cintrage

Un produit plat ou profilé est soumis à des flexions successives très rapprochées les une des autres, il se produit une incurvation. Le roulage permet de réaliser des pièces de révolution à contour fermé alors que le cintrage convient plutôt au formage des pièces à contour ouvert et de section quelconque.

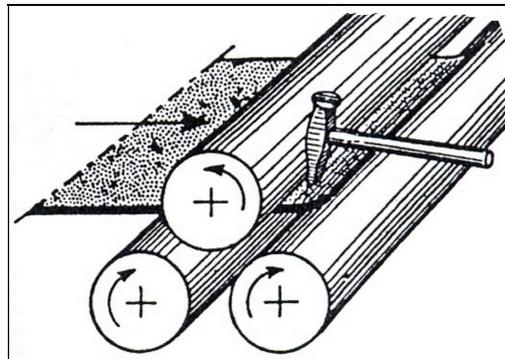


Figure 8 - Cintrage type pyramidal

1.10. Emboutissage

L'emboutissage est un procédé de formage par déformation plastique d'une surface de métal qu'on appelle flan, entraînée par un poinçon dans une matrice. Un serre-flan est utilisé évitant la formation des plis dus au déplacement radial de la tôle.

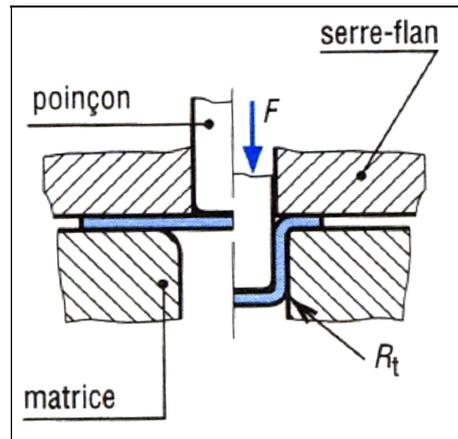


Figure 9 - Emboutissage avec serre-flan

1.11. Formage à haute énergie

Le formage à haute énergie est extrêmement rapide (de l'ordre de quelques microseconde). A la fin de l'opération, le produit déformé est plaqué très énergiquement contre la matrice

1.11.1. Formage par explosion

La charge explosive, placée dans l'eau au-dessus du plan, est mise à feu. Une onde de choc se propage alors dans l'eau et provoque le formage dans un temps très court.

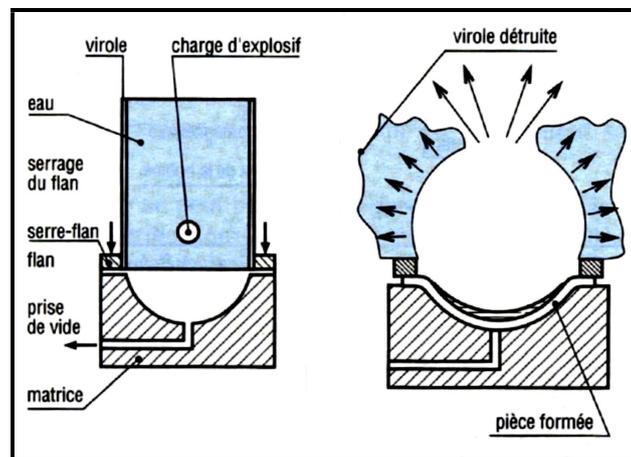


Figure 10 - Formage par explosion

1.11.2. Formage par électromagnétique

Dans ce procédé l'énergie électrique est libérée par des condensateurs, dans une bobine en quelques microsecondes. Un flux magnétique très intense est créé dans l'enroulement de la bobine. Si une pièce en métal conducteur est placée dans le champ magnétique, les courants induits dans le métal engendrent une force qui déforme la pièce (force de Laplace).

Puisque les bobines ont généralement une section circulaire, ce procédé est surtout appliqué pour le formage des tubes ou des pièces tubulaires.

La déformation peut être faite :

- Par retrait : la pièce est située à l'intérieur de la bobine.
- Par expansion : la bobine est située à l'intérieur de la pièce.

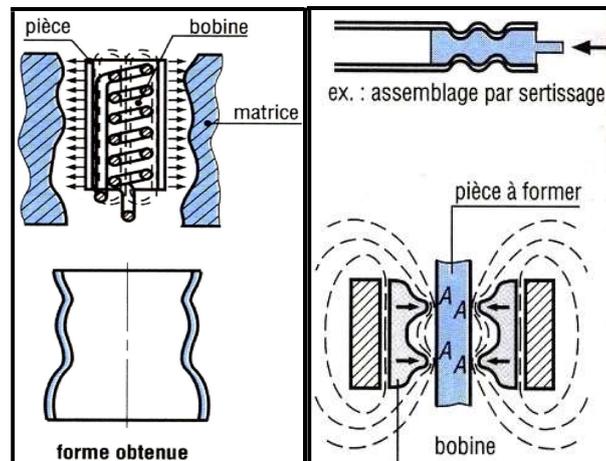


Figure 11 - Formage par électromagnétique

1.11.3. Formage par électrohydraulique

Un courant de forte intensité et de courte durée est appliqué aux bornes de deux électrodes. La décharge électrique forme une bulle de gaz qui se développe au sein du liquide en générant une onde de chocs violente, semblable à celle obtenue par la détonation d'explosif sous l'eau. L'énergie cinétique acquise par le fluide suffit à conformer la pièce métallique au profil de la matrice.

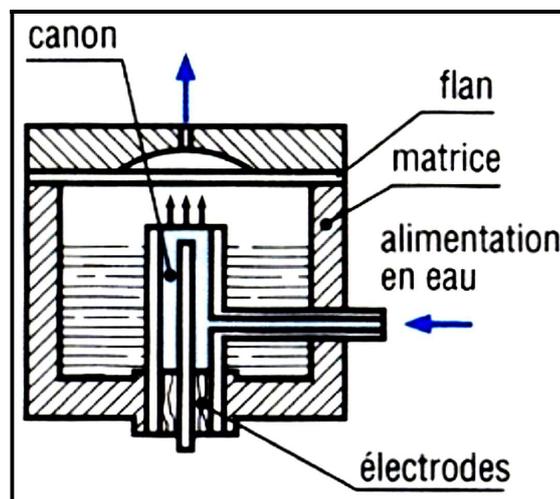


Figure 12 - Formage par électrohydraulique

1.12. Frittage

Une poudre ou un mélange de poudre, généralement métallique, est comprimée dans un moule : c'est la phase de compression. On obtient une pièce dont la cohésion est suffisante pour

être manipulée. Le comprimé ainsi obtenu est ensuite chauffé dans un four à une température inférieure à la température de fusion : c'est la phase de frittage.

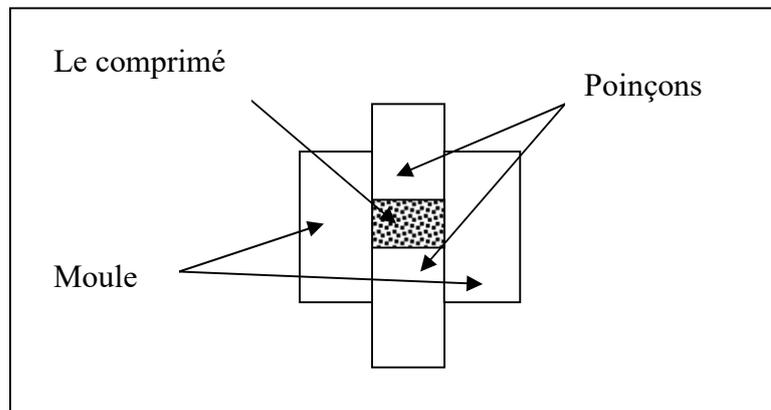


Figure 13 - Frittage

2. Chapitre II : Le cisailage

2.1. Définition

Le cisailage est la séparation totale ou partielle d'un élément métallique à l'aide de deux lames dont l'une au moins est mobile.

2.2. Principe

Sous l'action de la contrainte imposée par la partie active des lames, il se produit une déformation élastique, puis glissement avec décohésion du métal (suivant deux directions formant un angle β). La lame poursuivant sa course provoque la rupture de la plaque. l'angle β ainsi que la profondeur de décohésion varient suivant la nuance du métal et son état.

Exemple : $\beta = 4^\circ$ pour les aciers durs et $\beta = 6^\circ$ pour les aciers doux.

L'aspect et le profil de la face cisillée peuvent être améliorés en choisissant un jeu convenable entre les deux lames.(voir figure.1)

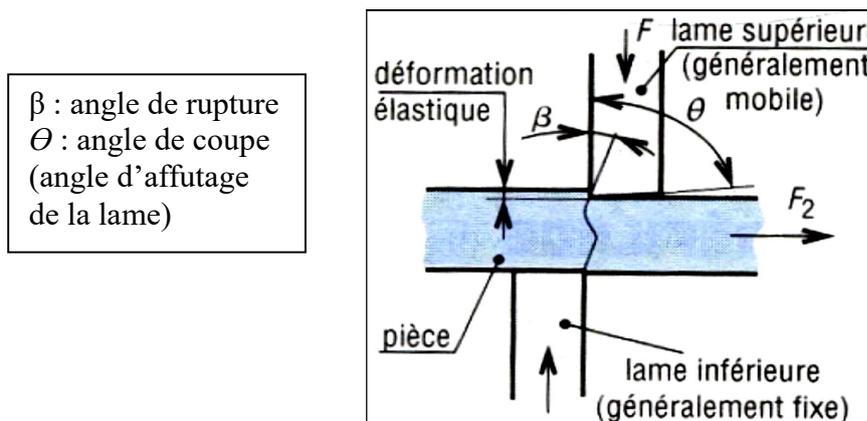


Figure 14 - Cisailages des tôles

2.3. Effort de coupe

L'effort de coupe est le produit de la section cisillée S_{cis} par la résistance au cisaillement R_c : $F_c = S_{cis} R_c$

- S_{cis} :Epaisseur de la tôle (mm^2)
- R_m :La résistance de la tôle (N/mm^2)

La résistance au cisaillement est égale à $0,8 R_m$.

2.4. Différentes méthodes de cisailage

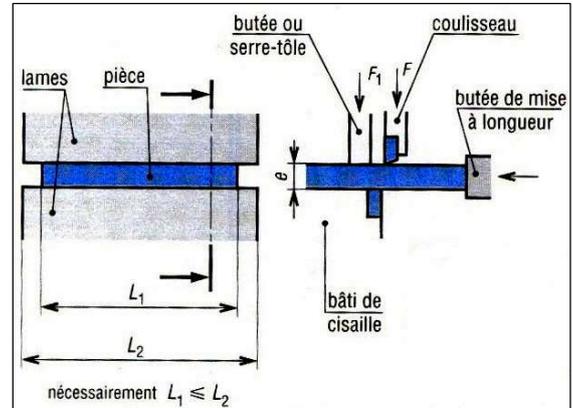
Les principales machines universelles de cisailages sont :

- ✓ Cisaille à lame parallèle.

- ✓ Cisaille à lame oblique.
- ✓ Cisaille à lame circulaire.

2.4.1. Cisaille à lames parallèles

Le cisailage à lames parallèles permet de cisailer simultanément toute la longueur de la tôle pour cette raison il faut que $L_1 < L_2$. La coupe est généralement rectiligne et l'effort nécessaire à la coupe est



- e : Epaisseur de la tôle (mm^2)
- R_m : Résistance au cisaillement de la tôle (N/mm^2)
- L_1 = longueur cisailée

important. $F_c = L_1 e R_c$

Figure 15 - Cisaille à lames parallèles

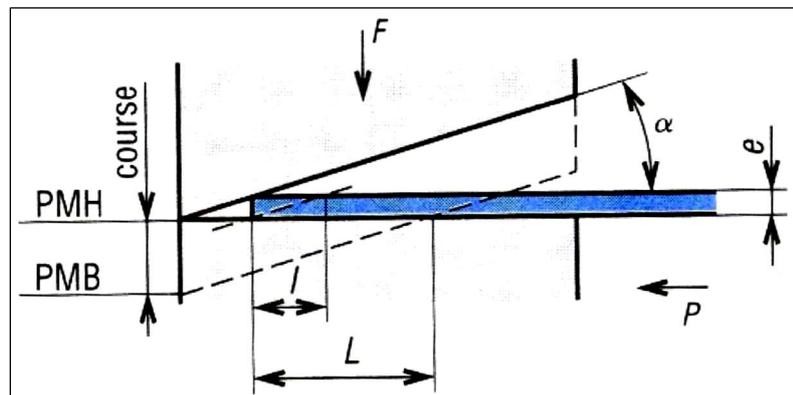
2.4.2. Cisaille à lames obliques

Dans ce cas la lame supérieure fait un angle α avec la lame inférieure, qui reste constant au cours de la coupe. La lame mobile se déplace entre deux positions extrêmes : le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB). La longueur découpée pour une course complète de la lame est L pour découper toute la tôle, il faut faire progresser la plaque suivant P .

L'effort de cisailage est égal à :

$$F_c = \frac{e^2}{2 \operatorname{tg} \alpha} R_c$$

On a intérêt à avoir α grand pour diminuer F_c . Cisaille à lames parallèles



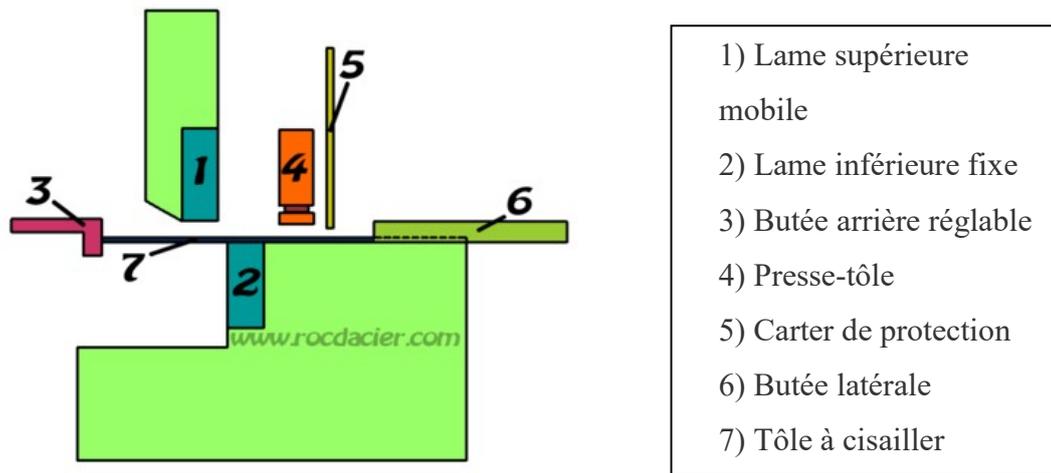


Figure 16 - Schéma de principe d'un Cisaille à lames parallèles et à lames obliques



Figure 17 - Cisaille manuelle

Il existe deux types de cisailles obliques :

- Les cisailles à lames longues : se sont les cisailles guillotines, l'angle de prise α est entre $2^{\circ} 30'$ et 6° . Leur longueur est entre 1m à 5m.(coupes rectilignes)
- Les cisailles à lames courtes : la longueur des lames est généralement comprise entre 180 mm et 300 mm. L'angle de reprise est entre 10° à 20° .(coupes curvilignes par une succession des petites coups rectilignes)



(b) (a)
Figure 18 -a : Cisaille à lames longues, b : Cisaille à lames courtes

Précision sur cisaille à guillotine (pour largeur de coupe = 500 mm) :

- $2 < e < 3 \text{ mm}$: $\pm 0,2 \text{ mm}$ sur 3 m de long de la pièce
- $6 < e < 10 \text{ mm}$: $\pm 0,4 \text{ mm}$ sur 3 m de long de la pièce

Avec : e = épaisseur de la tôle

Précision sur cisailles avec lames obliques courtes : suivant l'habileté de l'opérateur ou la précision de la machine à commande numérique.

Précision sur cisaille à lames circulaires : $\pm 0,1 \text{ mm}$

2.4.3. Cisaille à lames circulaires

Le cisailage est effectué par deux lames circulaires rotatives et motrices. Les axes des lames peuvent être parallèles au plan de coupe : c'est le cas idéal pour le cisailage rectiligne, comme ils peuvent être inclinés par rapport au plan de coupe. Ce cas est idéal pour le cisailage curviligne. Pour limiter les déformations, on a intérêt à diminuer e : hauteur de recouvrement des lames.

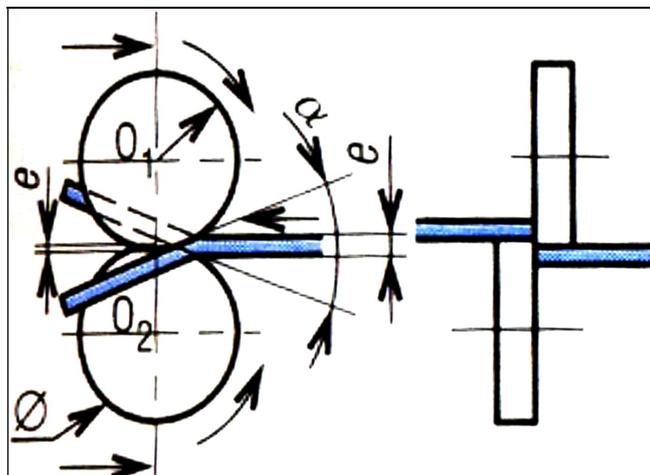


Figure 19 -Cisaille à lames circulaires

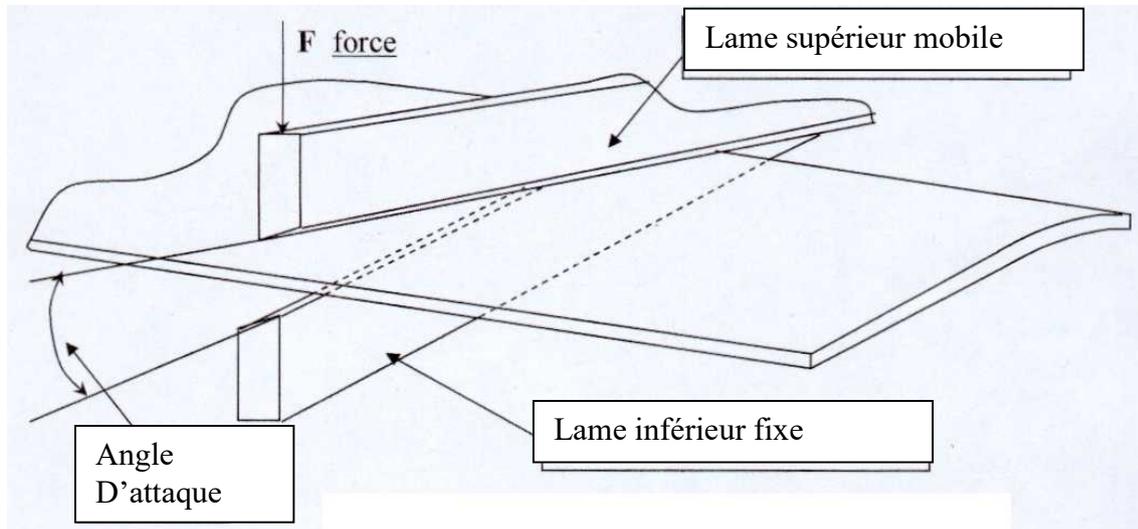


Figure 20 -Exemple de cisaille circulaire

2.5. Paramètres de coupe

Trois facteurs influent sur la coupe :

2.5.1. L'angle d'attaque :



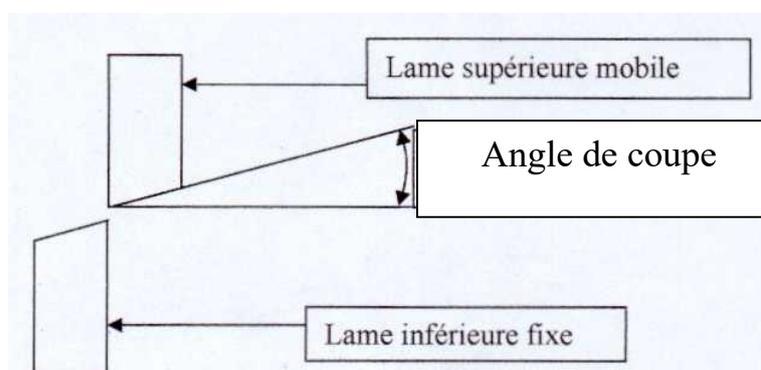
L'angle d'attaque des lames est généralement de 2 à 6° pour les lames longues et de 10 à 20° pour les lames courtes, celui des cisailles à levier est de 10 à 15°.

Plus *l'angle d'attaque des lames* augmente et plus la déformation est importante.

2.5.2. L'écartement entre les lames (ou jeu entre lames) :

Jeu trop important	Jeu adéquate	Jeu trop faible
<ul style="list-style-type: none"> • Peu de précision de coupe 	<ul style="list-style-type: none"> • Coupe précise 	<ul style="list-style-type: none"> • Il faut plus de puissance pour cisailier
<ul style="list-style-type: none"> • Bavures importantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Aspect de la coupe correct 	<ul style="list-style-type: none"> • Ecrasement anormal du métal
<ul style="list-style-type: none"> • Détérioration des lames 		<ul style="list-style-type: none"> • Détérioration des lames

2.5.3. L'angle de coupe (ou angle de tranchant) :



L'angle de coupe des lames est généralement de 85° à 90° pour les cisailles guillotine et peut aller jusqu'à 80° pour les autres.

Si l'*angle de coupe des lames* augmente, la qualité de la coupe est meilleure.

2.6. Principe

Dans le cas du poinçonnage, un poinçon et une matrice remplacent les lames du cisailage.

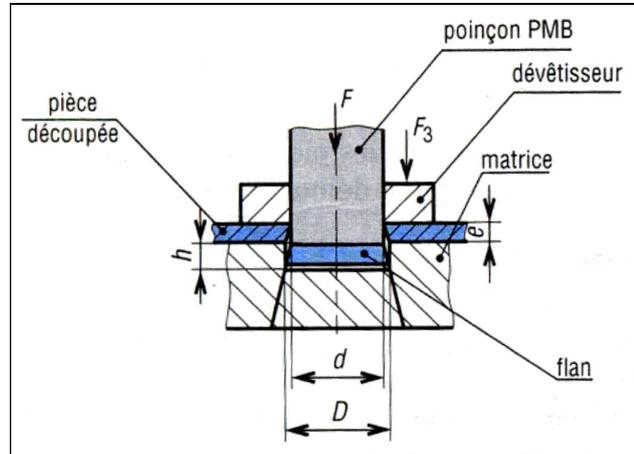
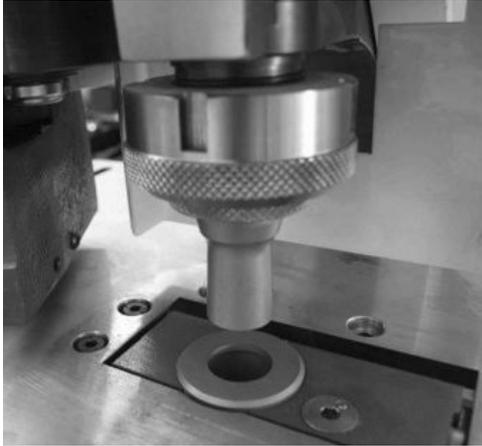


Figure 21 -Outillage classique de poinçonnage

2.7. Désignation des opérations

<p>➤ Poinçonnage: trous de petit diamètre, le déchet est appelé débouchure.</p>	
<p>➤ Découpage : le produit obtenu est un flan (récupéré pour emboutissage ou pliage).</p>	
<p>➤ Crevage : découpage partiel.</p>	
<p>➤ Encochage : découpage débouchant sur un contour.</p>	
<p>➤ Grignotage : poinçonnage partiel par déplacement progressif de la pièce ou du poinçon.</p>	

<p>➤ Arasage : découpage en reprise (précision de côtes et d'états de surface).</p>	
<p>➤ Détourage : finition d'un contour déjà ébauché, modifié au cours d'une déformation.</p>	
<p>➤ Soyage : Le soyage consiste à former un collet, soit par perçage de la tôle par un poinçon de forme pointue, soit sur un profil déjà formé.</p>	

tableau 1. opérations

2.8. Matrice et poinçon

Les poinçons sont fixes si les matrices sont mobiles .ils doivent résister à la compression et au flambage .Pour les poinçons cylindriques, on prend à la limite : $d \geq 1.6 e$ e pour les aciers doux.

Une matrice en acier peut produire environ 50 000 pièces sans être affûtée l'affutage diminue h de 0.2 à 0.5 mm(voir figure .Approximativement, on peut ainsi définir le minimum de pièces réalisées par l'outil.

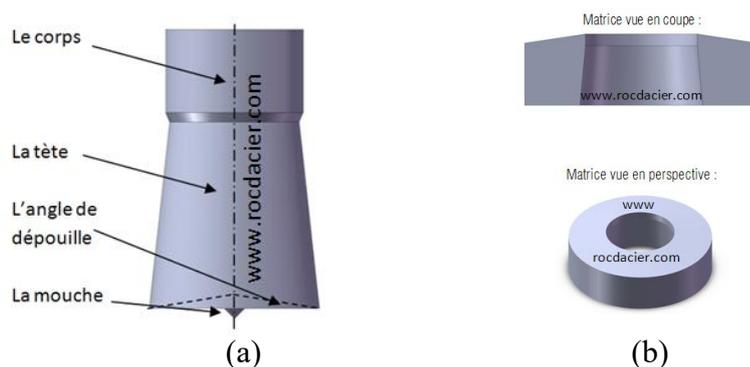


Figure 22 -Poinçon (a) et matrice(b)

☒ Remarque : Le poinçon de forme quelconque doit résister à la compression et au flambage, sa longueur libre est vérifiée

par : $L \leq \sqrt{\frac{E.I}{F}}$ avec :

- E : module d'élasticité en (N/mm²)
- I : moment quadratique de la section en (mm⁴)
- F : effort de découpage en (N)

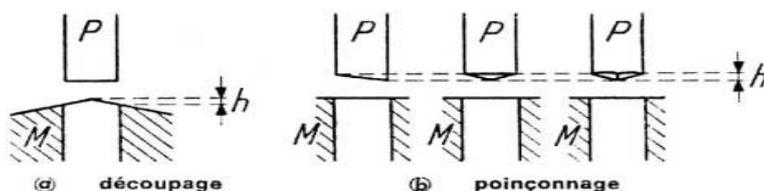


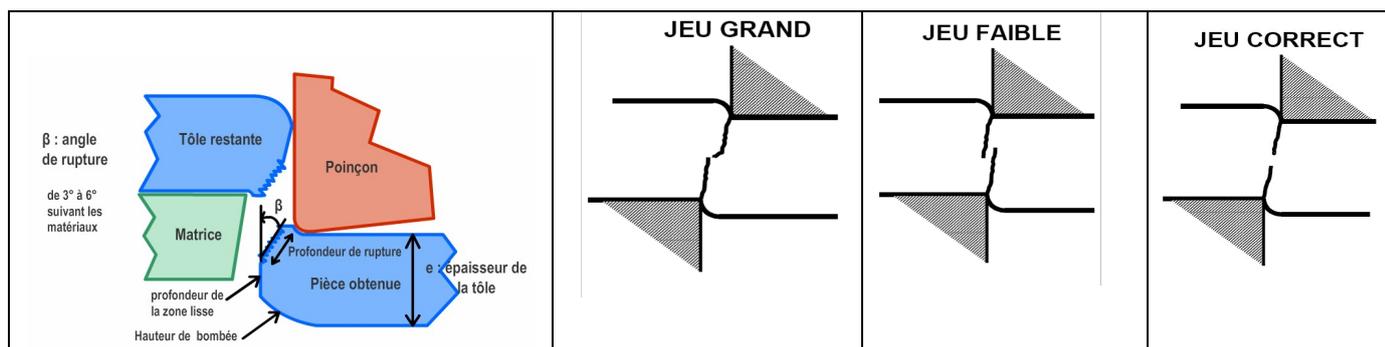
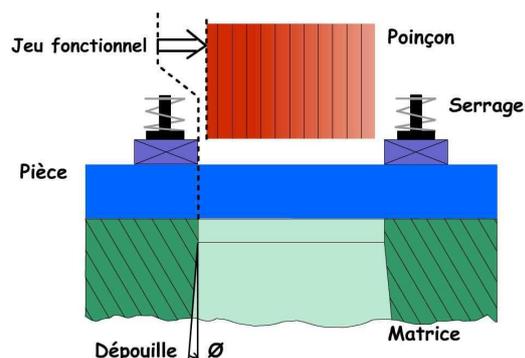
Figure 23 -La hauteur de coupe h

2.9. Jeu entre matrice et poinçon

Il existe un jeu entre matrice poinçon qui sert à **diminuer l'effort de poinçonnage** et l'écrouissage de la zone poinçonnée.

Il faut choisir un jeu convenable entre la matrice et le poinçon : $j = D - d$.

- $j = 0,05 e$ pour l'acier doux, laiton et cuivre
- $j = 0,06 e$ pour l'acier mi - dur
- $j = 0,07 e$ pour l'acier dur
- $j = 0,1 e$ pour l'aluminium



Remarque :

- Pour parler de métaux en feuille il faut que ces deux conditions doivent être remplies:
 $e \leq 10mm$ et $e \leq \frac{L}{10}$ avec : e l'épaisseur de la tôle et L la plus grande longueur en mm.
- Du fait de la présence du jeu, l'ajour dans la bande aura une forme **conique**, Le jeu est pris sur la matrice si l'on désire obtenir un **ajour précis**, sur le poinçon si le **flan doit être précis**.

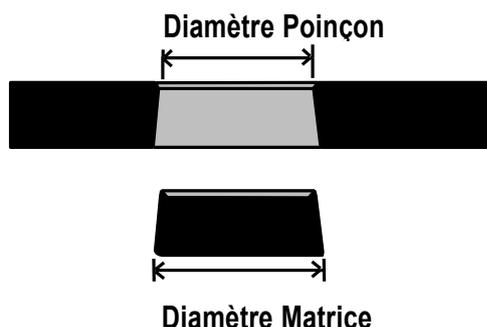


Figure 24 -Forme conique de l'ajour

2.10. Terminologie des pièces d'un outil de découpage

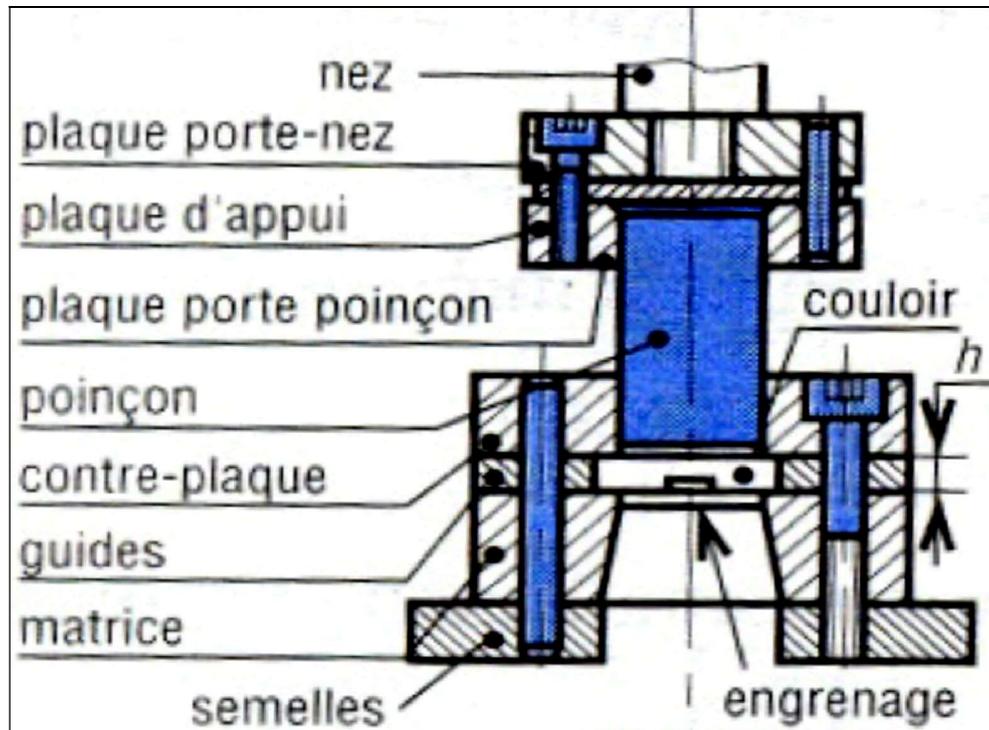


Figure 25 -Exemple d'outil à engrenage

- Le nez : permet la fixation de l'outil sur le coulisseau de la presse.
- Plaque porte nez
- Plaque d'appui : c'est un élément qui protège la plaque porte nez contre l'usure rapide. Elle permet la répartition de l'effort de poussée du poinçon sur toute sa surface et évite le marquage rapide de la plaque porte nez.
- Plaque porte poinçon : elle permet la localisation et le maintien du poinçon.
- Poinçon : il est généralement de section constante sur toute sa longueur (seulement sur 10 mm pour les petites dimensions). Il ne sort jamais de la contreplaque pendant le mouvement de retour. Il doit résister à la compression et au flambage. Il est généralement en acier de dureté 62 HRC.
- Contre plaque ou dévêtisseur : la contre plaque sert de guide au poinçon et le centre par rapport à la matrice. elle assure le décrochage de la bande lors de la remontée du poinçon
- Guide bande : elle forme un couloir dans lequel glisse la bande. On doit avoir un jeu de 2 à 3 mm à cause d'imprécision du cisailage de bande.
- La butée : Pour réaliser une seule pièce, il suffit d'utiliser une poinçonneuse classique avec une seule course du poinçon ; mais dans le cas du travail en série, le coulisseau de la presse est animé d'un mouvement alternatif et à chaque course un ou plusieurs découpages

sont effectués. En plus du mouvement alternatif du poinçon, on a une avance contrôlée de la bande de tôle à découper. Le contrôle de l'avance de la bande est assuré par les butées. Il existe plusieurs types de butées parmi elles on peut citer : les engrenages et le couteau latéral.

- Outil à engrenage : l'engrenage est une butée sur laquelle on engrène la bande. Il assure le contrôle de l'avance. Le poinçon décent, poinçonne puis remonte entraînant avec lui la bande. Celle-ci vient buter contre le dévêtisseur et se détache. En tombant, son déplacement longitudinal permet de l'accrocher à l'engrenage grâce à l'ajour qui vient d'être réalisé.

- Outil à couteau latéral : le couteau latéral est un poinçon qui est fixé sur le porte-poinçon et qui assure le contrôle lors de la décente du coulisseau.

2.11. Opération de découpage

On peut distinguer trois types d'opération de découpage :

- Découpage simple : on utilise deux outils de découpage sur deux presses et la pièce est obtenue en deux opérations (exemple obtention d'une rondelle).

- Découpage consécutif : on utilise une presse et on fixe sur son coulisseau deux ou plusieurs poinçons. La pièce est obtenue après deux pas d'avance de la bande.

- Découpage simultané : la pièce est obtenue après une opération de découpage et poinçonnage simultanément.

2.12. Mise en bande des pièces

2.12.1. Définition

L'étude de la mise en bande consiste à chercher la disposition des pièces dans la bande donnant le minimum de déchets et le maximum de pièces. On doit examiner les diverses dispositions possibles et calculer le nombre de pièces donné par chacune d'elles pour adopter la plus avantageuse. Une bande se définit par sa longueur, sa largeur (L), le pas (p), l'intervalle d entre les points les plus proches de découpage (d = épaisseur de la tôle et $d_{\min} = 2$ mm), l'inclinaison de la pièce par rapport à la bande, s'il y a lieu, et le nombre de pièces à découper. On n'appelle « pas » ou « avance » la longueur dont la bande avance entre deux coups de presse successifs.

L'organisation des coupes découpes doit être faite pour qu'il subsiste un minimum de déchets.

- Coefficient d'utilisation pour découpage : η_u

$$\eta_u = (S_p / S_b) \times 100$$

S_p : surface de pièce

S_b : surface bande

Cette condition implique une organisation rationnelle des pièces sur la bande, un espace l_1 entre les découpes et l_2 entre les découpes et le bord de la bande, aussi réduits que possible.

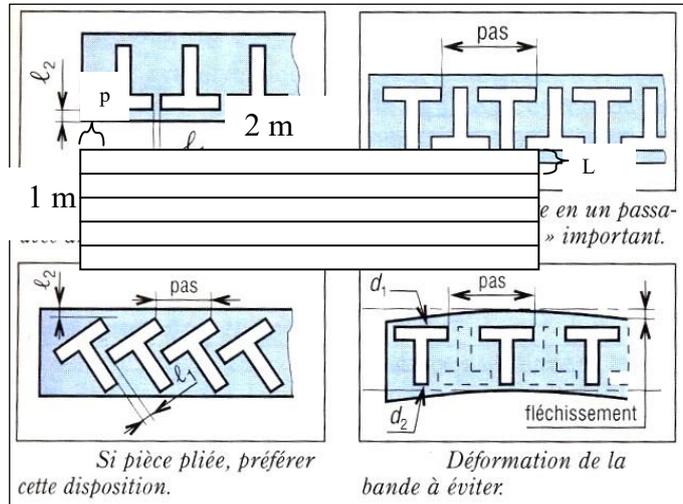


Figure 26 -Mise en bande en découpage

En général $l_1 = l_2 = e$ avec l_1 et $l_2 \geq 2mm$ (assurer une bonne tenue du déchet)

- Choisir le pas le plus faible possible
- Choisir la mise en bande qui simplifie la matrice

2.12.2. Détermination du nombre de pièce par feuille de tôle

En industrie, on utilise des tôles normalisées de 1m X 2m. on va déterminer le nombre de pièce par feuille. deux cas sont possibles :

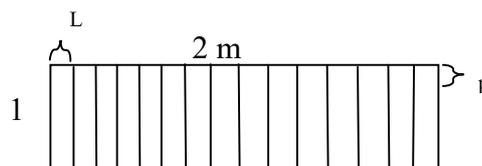
- Premier cas : on peut cisaille la feuille de tôle suivant la longueur.

$$\text{Le nombre de bande par feuille : } n_{b/f} = \frac{1000}{L}$$

$$\text{Le nombre de pièces par bande : } n_{p/b} = \frac{2000}{p} - 0.5$$

$$\text{Le nombre de pièces par feuille : } n_{p/f} = n_{b/f} \times n_{p/b}$$

- Deuxième cas : on peut cisaille la feuille de tôle suivant la largeur.



$$\text{Le nombre de bande par feuille : } n_{b/f} = \frac{2000}{L}$$

$$\text{Le nombre de pièces par bande : } n_{p/b} = \frac{1000}{p} - 0.5$$

Le nombre de pièces par feuille : $n_{p/f} = n_{b/f} \times n_{p/b}$

2.13. Effort de découpage ou poinçonnage

2.13.1. Méthode analytique

$$F_{\text{découpage}} = p \cdot e \cdot R_c \quad \text{avec :}$$

- **p** = périmètre découpé (mm)
- **e** = épaisseur de la tôle (mm)
- **R_c** = résistance à la rupture (daN/mm²)

☞ Remarque :

La résistance au cisaillement **R_c** dépend du matériau travaillé, on l'est D1 environ **0,8** fois la résistance à la traction **R** ; on a : **R_c = 0,8.R** ; **R_c** est donné par le tableau 5 pour les matériaux courants.

Matériaux		R _c (daN /mm2)
Aciers	0.1 % C - recuit.....	24
	- laminé à froid.....	31
	0.2 % C - recuit.....	31
	- laminé à froid.....	39
	0.3 % C - recuit.....	37
	- laminé à froid.....	47
	Tôles laminée à froid :	
	- Qualité TC.....	31
	- Qualité E.....	29
	- Qualité ES.....	27
	Acier inoxydable.....	50 à 60
Acier au silicium.....	45	

Tableau 2 - R_c :des matériaux courants

2.13.2. Méthode utilisant l'abaque

L'abaque de la figure ci-dessous permet de déterminer rapidement l'effort de découpage moyennant le diamètre du poinçon ou le périmètre à découper.

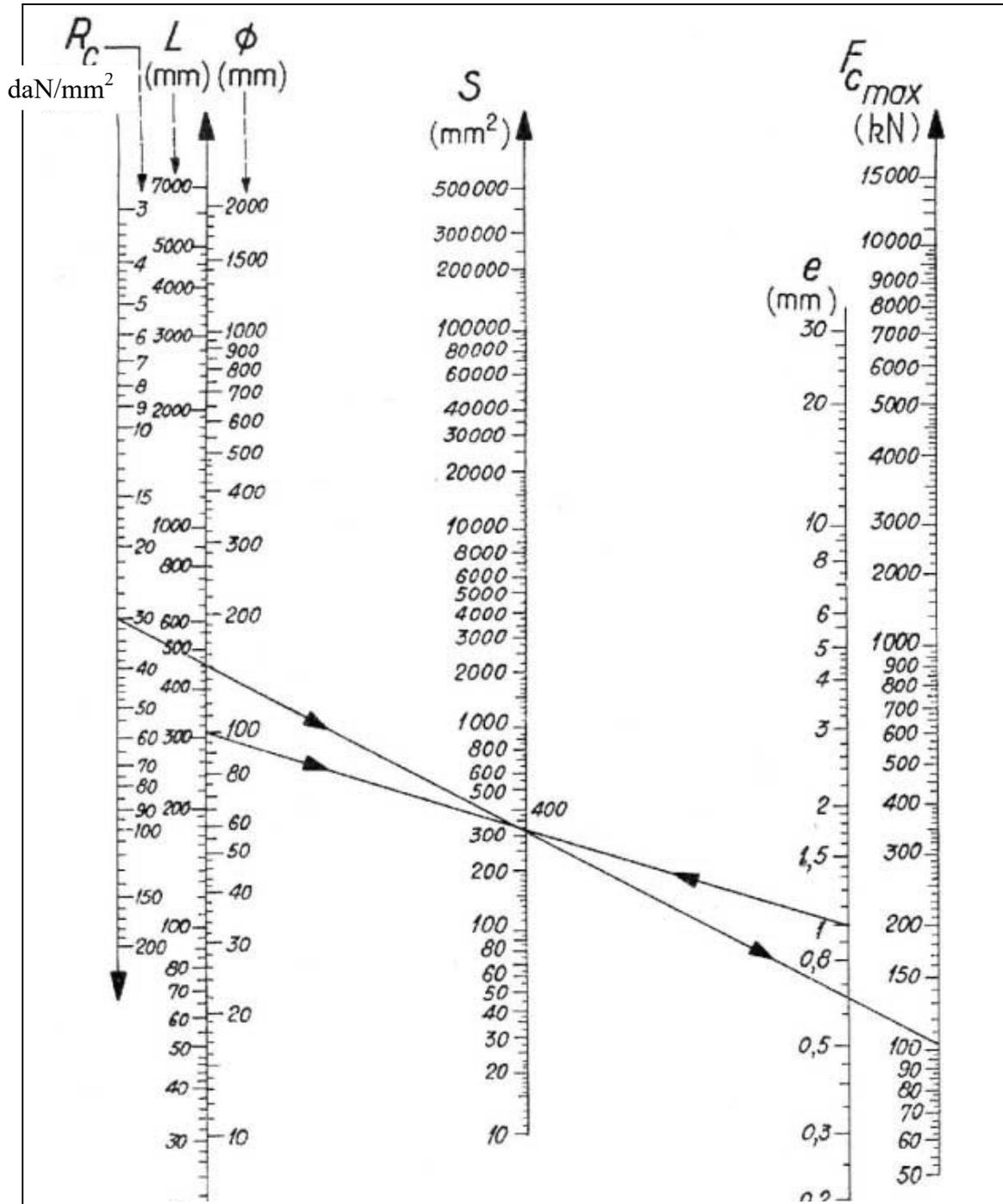


Figure 27 -abaque permettant de déterminer l'effort de découpage

2.14. Effort à créer sur le devêtisseur et Effort de l'attraction

- ❖ L'effort à créer sur le devêtisseur est estimé à $F_3 = 7\%$ de F si la découpe est en pleine tôle. (cas de poinçonnage)

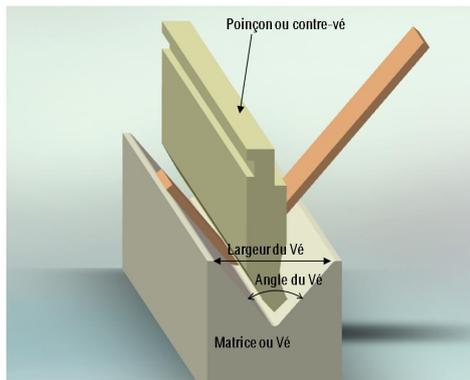
- ❖ L'effort à créer sur le **devêtisseur** est estimé à $F_3 = 2\%$ de F si la distance de la découpe au bord de la tôle $\leq 3.e$. (**cas de découpage**)
- ❖ Si le flan doit être extrait au dessus du plan de coupe, **l'effort de l'extraction** est estimé à $F_4 = 1,5\%$ de F .

l'effort de l'extraction : c'est l'effort du poinçon nécessaire pour pousser le flan coincé dans la section constante de la matrice. Une dépouille réduit le nombre de flans coincés et empilés, et limite l'effort du poinçon.

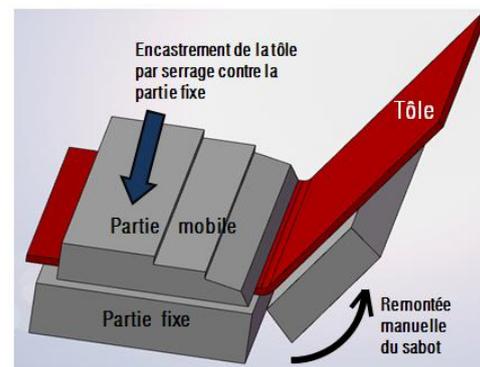
3. Chapitre IV : Pliage

3.1. Définition et principe

Le pliage est un procédé de formage par déformation plastique permettant d'obtenir, à partir d'une tôle, une pièce développable. Il est effectué par une ou plusieurs opérations successives sous l'action d'une force exercée sur la pièce. Le pliage peut être réalisé par rotation d'un outil pivotant (figure a) ou sur une presse plieuse en utilisant un poinçon et une matrice (figure b).



(a)



(b)

Figure 28 - Procédés de pliage : (a) pliage par rotation d'un outil pivotant, (b) pliage sur presse plieuse.

3.2. Machines de pliage

3.2.1. 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.



Tablier

Figure 29 - Plieuse à tablier manuelle

3.2.2. Plieuse presse universelle

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 30 -Plieuse presse universelle

3.3. Différents techniques de pliage

3.3.1. 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 ($\pm 0,5^\circ$).

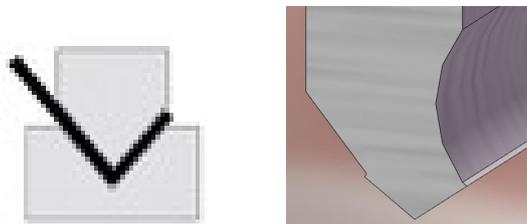


Figure 31 -pliage en frappe

3.3.2. 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 mode de pliage est couramment utilisé car les forces appliquées sont environ **5 fois moins importantes que pour du pliage en frappe**.



Figure 32 -pliage en l'air

3.3.3. Pliage sur élastomère

Ce procédé consiste à remplacer la matrice en métal par un coussin élastique en caoutchouc enchâssé dans un support métallique.

Le pliage à l'aide d'un outil élastique convient particulièrement à la mise en œuvre des tôles minces ayant reçues un traitement superficiel. Cette technique a l'avantage de ne jamais marquer la tôle, et nécessite des efforts très importants.

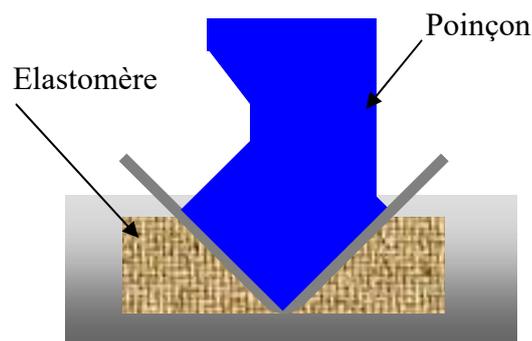


Figure 33 -pliage sur élastomère

3.4. Outils spéciaux

Les outils utilisés pour le pliage sont en acier traité, et ils sont classés en deux catégories :

- Outils simples : de formes très varié, ils sont les plus utilisés en tôlerie, chaudronnerie.
- Outils combinés : ils peuvent effectuer plusieurs opérations simultanées (plusieurs plis, des poinçonnages, découpages...). Ces outils sont très spécialisés et coûteux.

3.4.1. Pliage en V

Outillage simple, le poinçon est fixé sous le coulisseau de presse, la matrice sur la table. Un éjecteur facilite la récupération de la pièce et drageoir positionne le flan sur la matrice.

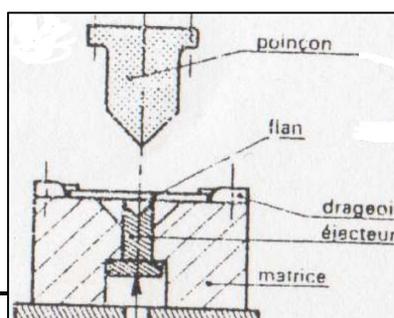


Figure 34 -pliage en V

3.4.2. Pliage en équerre

La zone pliée produit un effet de chasse qui doit être compensé par une surface de réaction

L'aile la plus courte qui celle qui doit être relevée

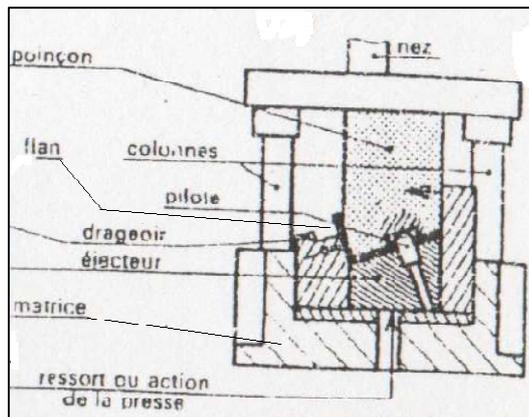


Figure 35 -pliage en équerre

3.4.3. Pliage en U

- a) Pliage avec ailes extérieures (pièce 1): limité aux faibles hauteurs h , si h est importante la pièce est réalisée en deux passes (figure 36).
- b) Pliage avec ailes intérieures (pièce 2): réalisé en deux opérations (figure 36), ou en une opération (figure 36) avec un outil à cames mais longueur de pièce limitée.
- c) Pliage fermé (pièce 3) : l'ébauche est fait en deux opérations, frappée ensuite sur mandrin intérieur pour obtenir des cotes précises (figure ci-dessous).

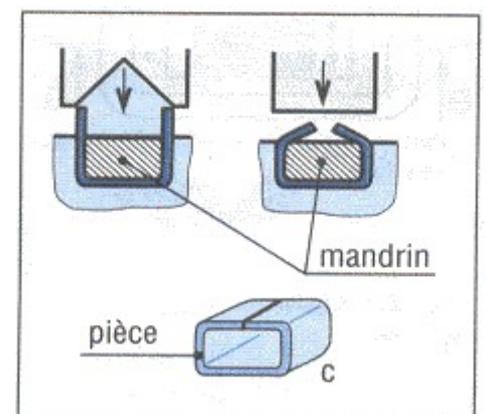
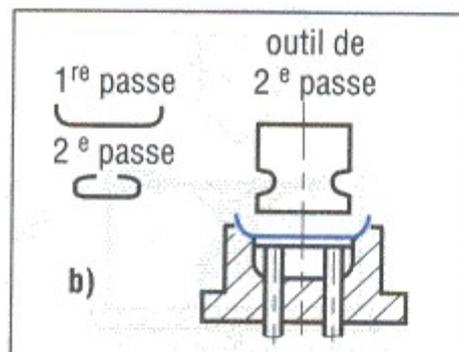
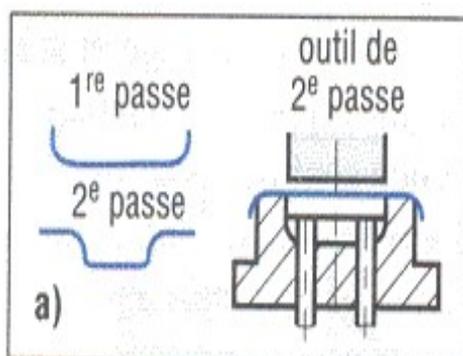


Figure 36 -pliage avec ailes extérieur en deux passe(a), pliage avec outil à cames(c), pliage avec ailes intérieur en deux passes(b)

En associant ces différentes méthodes, on peut produire des formes roulées ou bordées (figure ci-dessous).

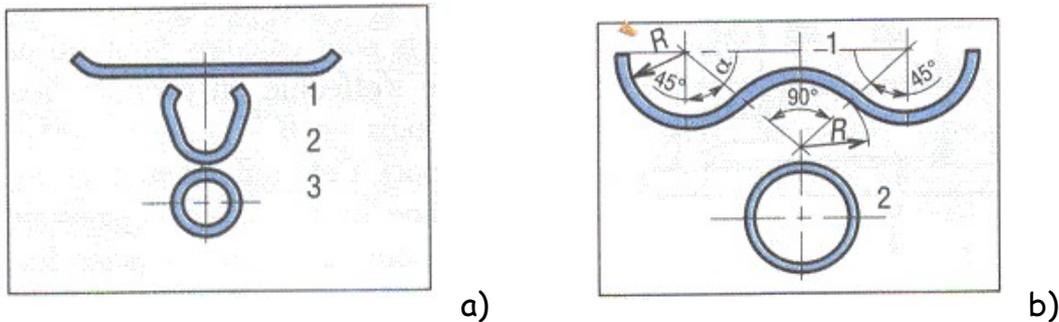


Figure 37 - a) trois opérations b) deux opérations

3.4.4. Pliage en Z

L'outil utilisé est simple et peu coûteux mais fournissant des pièces peu précises. L'outil est présenté en fin de course. Les ressorts sont calculés pour qu'au cours de la descente, le pliage s'effectue en premier lieu en (a) sur l'arête de l'éjecteur, puis en (b) lorsque la serre flan vient en butée sur son support. Les parties frottantes sont rapportées en acier dur.

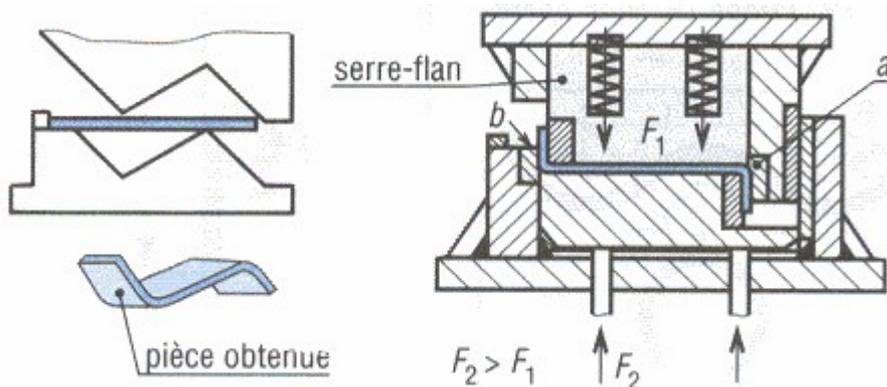


Figure 38 -Outil de liage en Z

3.5. Quelques exemples de travaux réalisés sur presse plieuse.

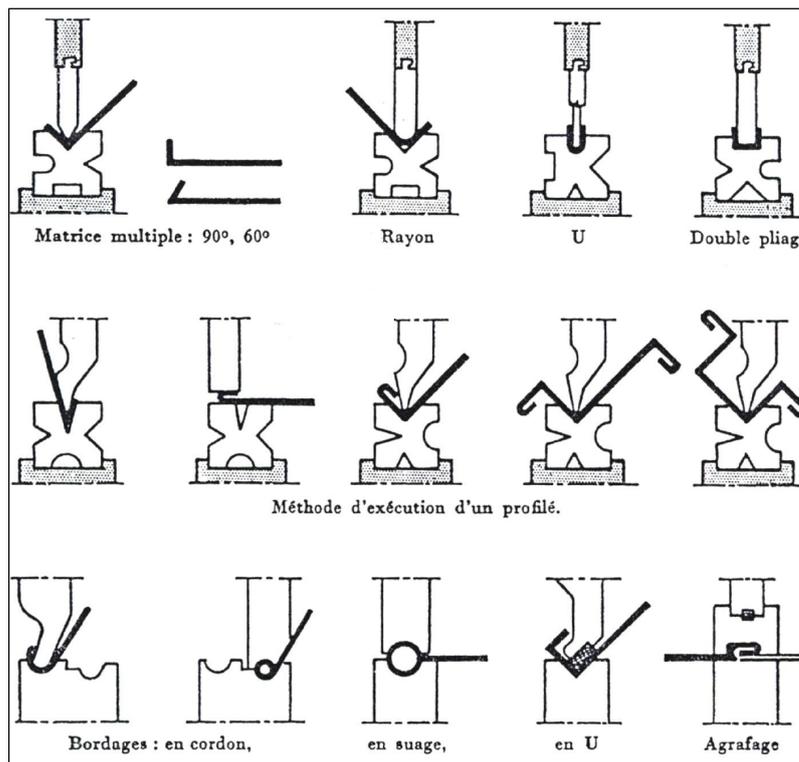


Figure 39 -Opérations réalisées sur une presse plieuse

3.6. Analyse de la déformation

Sous l’action du poinçon, la zone de déformation de la pièce est soumise à des contraintes de compression pour les fibres intérieures (en contact avec le poinçon) et à des contraintes de traction pour les fibres extérieures. Ces contraintes s’annulent sur la fibre non déformée dénommée la fibre **neutre**.

3.6.1. Position de fibre neutre

Le maintien de l’équilibre des sections l’une qui augmente, l’autre qui diminue provoque un déplacement de la fibre neutre vers le rayon intérieur.

Le rayon de fibre est donné par la relation : $R_f = R_i + K \times e$ avec K :

Coefficient qui dépend de rapport $\frac{R_i}{e}$ donné par le tableau suivant :

R_i / e	> 0.65	> 1.00	>1.50	>2.40	>3.80
K	0.30	0.35	0.4	0.45	0.50

Tableau 3 - Tableau de Coefficient de proportionnalité

I.1. Allongement de la fibre extérieure

C’est l’allongement supporté par les fibres les plus tendues.

Il est défini par la relation :

$$A\% = \frac{(Ri + e)\alpha - (Ri + e/2)\alpha}{(Ri + e/2)\alpha} \times 100$$

Exemple : $A\% = 14\%$ cette valeur est acceptable pour un acier doux mais insuffisant pour un acier dur.

3.6.2. Rayon minimale de pliage

Le rayon minimal de pliage est le plus petit rayon pour le quel il n'y a pas apparition de fissures lors du pliage. Il dépend de :

- La nature et de l'état du métal (recuit, écroui)
- L'angle du pliage : Pour une épaisseur donnée le rayon de pliage croit avec l'angle de pliage.
- L'épaisseur

Le rayon minimale peut être déterminé par le formule suivante :

$$\frac{R_{mini}}{e} = \frac{l}{\left[\frac{A-4}{100-Z} \right] \times \left[\frac{A-4}{(100-Z)} + 2 \right]}$$

Avec :

- R_{mini} : Rayon minimal de pliage
- e : Epaisseur de la tôle
- $A\%$: Allongement après rupture
- $Z\%$: Coefficient de striction

Le tableau ci-dessous donne le rayon minimal de pliage en fonction de la matière et de l'épaisseur de la tôle.

9	Rayon (mm)					a	Matière	État	Épais- seur mm	Rayon b
	Laiton		Acier							
Epais- seur mm	doux	dur	qualité embou- tissage (E - ES)	qualité courante (TC)		Alliages d'alumi- nium	AlCuMg (A-U 2 G)	doux	2	1 à 3 e
	1	0.2	0.3	0.5	0.6			recuit	3	2.5 à 3 e
1.5	0.25	0.4	0.75	0.8			AIMgSi (A-GS)	doux	1.2	0.8 à 1.2 e
2	0.3	0.6	1	1.2				trempe	2.5	2 à 2.5 e
2.5	0.4	0.8	1.25	1.5			recuit	3.5	2.5 à 3.5 e	
3	0.5	1	1.5	1.8			AIMg (AG 06)	doux	2	1 à 2 e
3.5	0.6	1.25	1.75	2.1				mi-dur	3	2 à 3 e
4	0.7	1.5	2	2.6			AIMn (A-MI)	doux	1.2	0.8 à 1.2 e
4.5	0.8	1.75	2.25	3				dur	3	2 à 3 e
							Alliages de magnésium	plié à froid	10	4 à 10 e
						plié à chaud		2	~ 2 e	
						Al	doux	1	0.3 à 1 e	
							dur	2	1 à 2 e	
c Matière		T40 (recuit)	T50 (recuit)	T60 (recuit)	TA5E (recuit)	TU2 (recuit)	TA8DV (recuit)	TA6V (recuit)	TA6V6E2 (recuit)	TV13CA (trempe)
Rayons de pliage mini à 180°		1.5 e	2 e	2 e	4 e	2 e	4 e	4 e	3 e	3 e

Tableau 4 - Rayon minimal de pliage

3.7. Avantages et Inconvénients

Avantages	Inconvénients
+Outillage simple + Pièces réalisées de formes complexes +Cintrage de tôles de forte épaisseur (faibles plis régulièrement espacés).	- Longueur de pli limité à la longueur des machines - Elasticité résiduelle difficilement contrôlable

3.8. Développement du flan

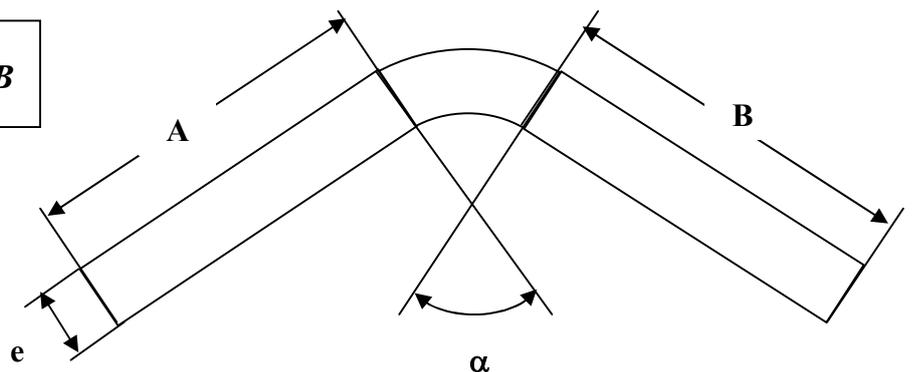
Connaissant la position de la fibre neutre on peut facilement calculer la longueur développée du flan par deux méthodes.

3.8.1. Méthode des sections: (1^{ère} Méthode)

Cette méthode consiste à décomposer la pièce en éléments simples permets de calculer rapidement, ont faisant la somme de toutes les segment, la longueur développée de flan.

- Le développement du flan est donné par la longueur de la fibre neutre :

$$LD = A + \frac{2\pi \times R_f \times \alpha}{360} + B$$



- Si on considère la pièce de la figure 11, la longueur de son flan est donnée par :

$$L_f = l_1 + 2\pi R_1 \frac{\alpha_1}{360} + l_2 + 2\pi R_2 \frac{\alpha_2}{360} + l_3$$

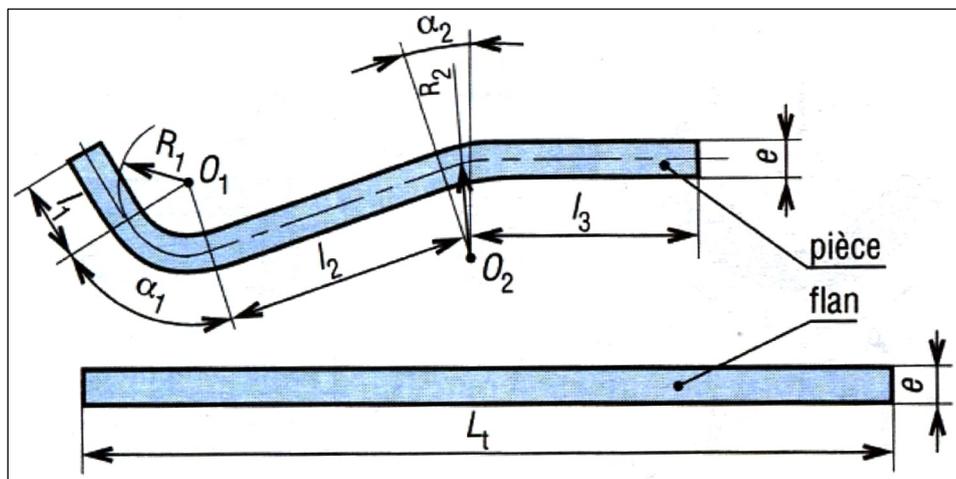


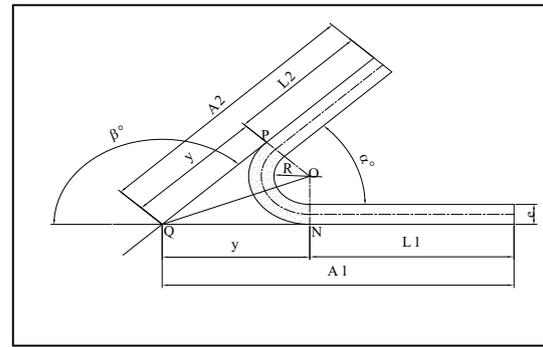
Figure 40 - La développée avant pliage

3.8.2. Calcul théorique: (2^{ème} Méthode)

- Quelque soit la valeur de l'angle de pliage la longueur développée est donnée par la formule suivante :

$$LD = A1 + A2 - C$$

Avec : $C = 2(R + e) \cot g \left(\frac{180 - \beta}{2} \right) - \frac{\pi}{180} (R + ke) \beta$



- Si la pièce contient (n) plis, on aura alors : $LD = \sum_{i=1}^{n+1} Ai - \sum_{i=1}^{i=n} Ci$
- C peut être déterminé en utilisant l'abaque suivant :

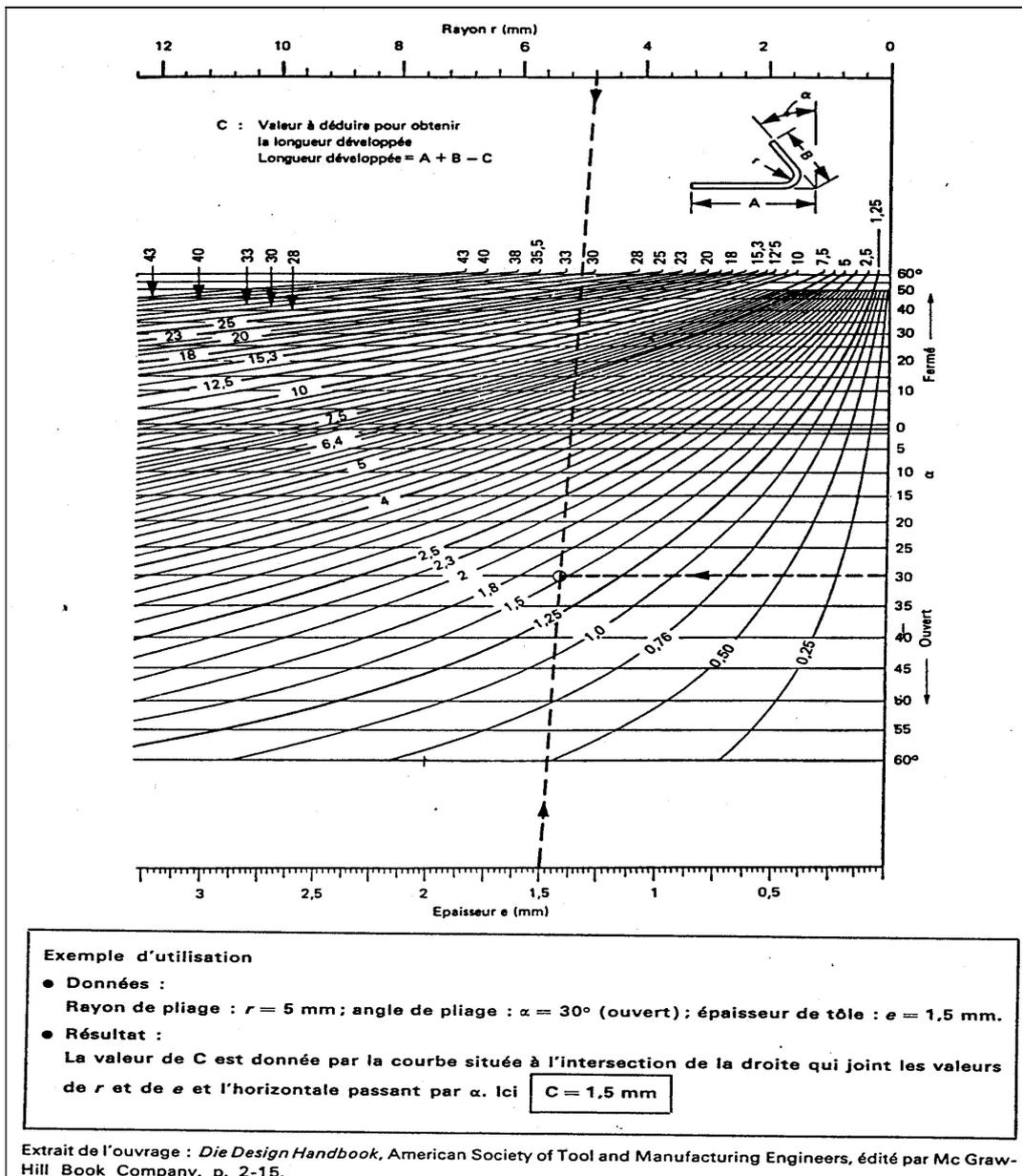


Figure 41 -Abaque de détermination de la valeur de C

3.8.3. Les côtes machine (côte de mise en buté)

La cote machine C_m est la distance entre la butée et l'outil (axe de vé ou l'arête du contre Vé). C'est la côte de référence du pli de la pièce.

$$C_m = A_1 - C / 2 \quad \text{sachant que : } LD = A_1 + A_2 - C$$

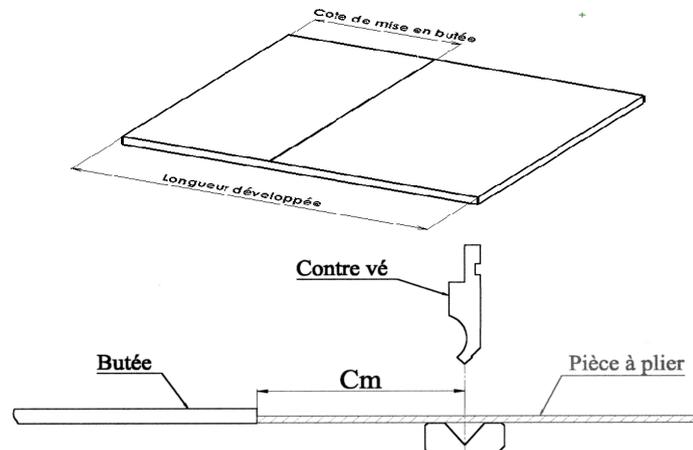


Figure 42 -Côte machine(côte de mise en buté)

3.9. Rayon et Angle du poinçon à utilisé en pliage

Pendant l'opération de pliage et sous l'action du poinçon, la tôle est pliée d'un angle α_1 . Lorsque le poinçon se relève l'angle s'ouvre légèrement jusqu'à un angle α_2 différent de α_1 (figure 13). Ce phénomène, appelé retour élastique, est du à un relâchement des contraintes élastiques. On appelle angle de retour élastique $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$.

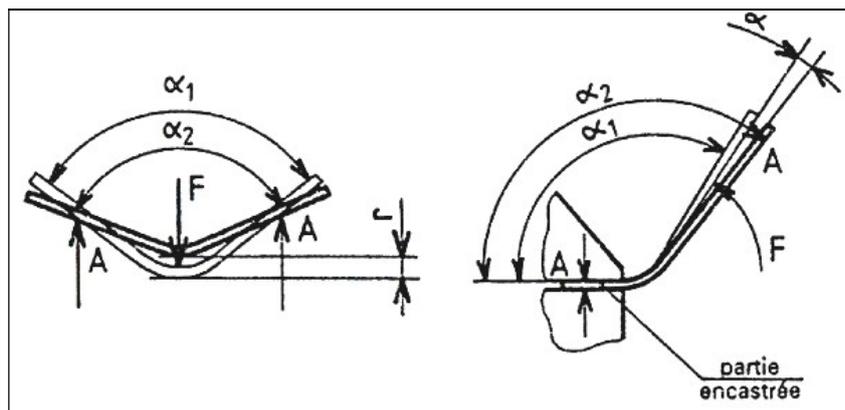


Figure 43 -Phénomène du retour élastique

3.9.1. Rayon de poinçon

Pour obtenir des pièces à des cotes précises, il faut tenir compte du retour élastique au moment de la conception de l'outillage. D'où le rayon du poinçon à utiliser en pliage :

$$R_p = \frac{R}{e} \frac{1}{1 + 3 \frac{R \cdot R_e}{E \cdot e}}$$

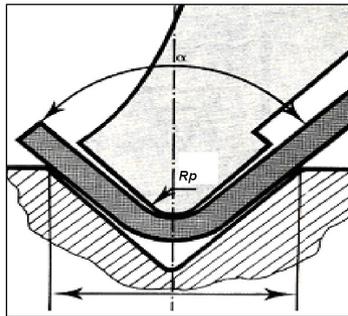


Figure 44 -pliage en Vé sur presse plieuse

Remarque : Cette formule est valable que pour les grands rayons de pliage ($\frac{R_{int}}{e} > 10$)

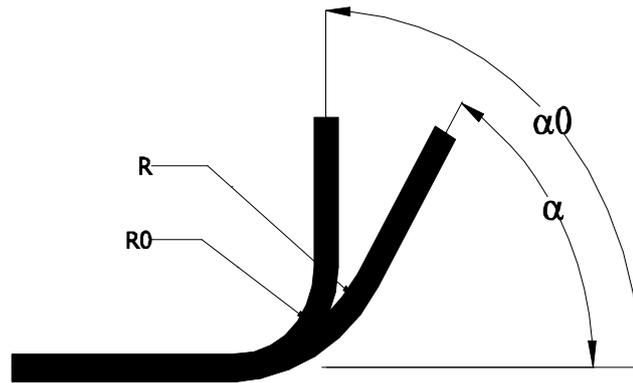
Avec

- E module d'élasticité de la tôle (N/mm²)
- e épaisseur de la tôle (mm)
- R_e limite élastique (N/mm²)
- R rayon de la pièce final (mm)
- R_p Rayon de l'outil de pliage (mm)

3.9.2. Angle de poinçon

La fibre neutre de la tôle garde une longueur constante au cours du pliage et au cours du retour élastique, on a : $\alpha_0 \times R_{f0} = \alpha \times R_f$ donc : $\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{R_{f0}}{R_f} = K$ avec α_0 angle de l'outil de

pliage, α angle à obtenir. La valeur de K dépend du rapport ($\frac{R_i}{e}$) et du matériau à plier voir abaque.



Pour déterminer les paramètres de l'outil de pliage :

$$\frac{R_i}{e} = ? \Rightarrow K$$

$$K = \frac{R_0 + \frac{e}{2}}{R + \frac{e}{2}} \Rightarrow R_0 = K \times \left(R + \frac{e}{2} \right) - \frac{e}{2}$$

$$K = \frac{\alpha}{\alpha_0} \Rightarrow \alpha_0 = \frac{\alpha}{K}$$

Remarque :

- Après formage, par élasticité résiduelle, le pli s'ouvre légèrement
 - En l'air : 2 à 3°
 - Avec frappe : 0,5 à 2°
- Position du pli : $\pm 0,1$ à $\pm 0,2$ mm pour $1 < e \leq 5$ mm

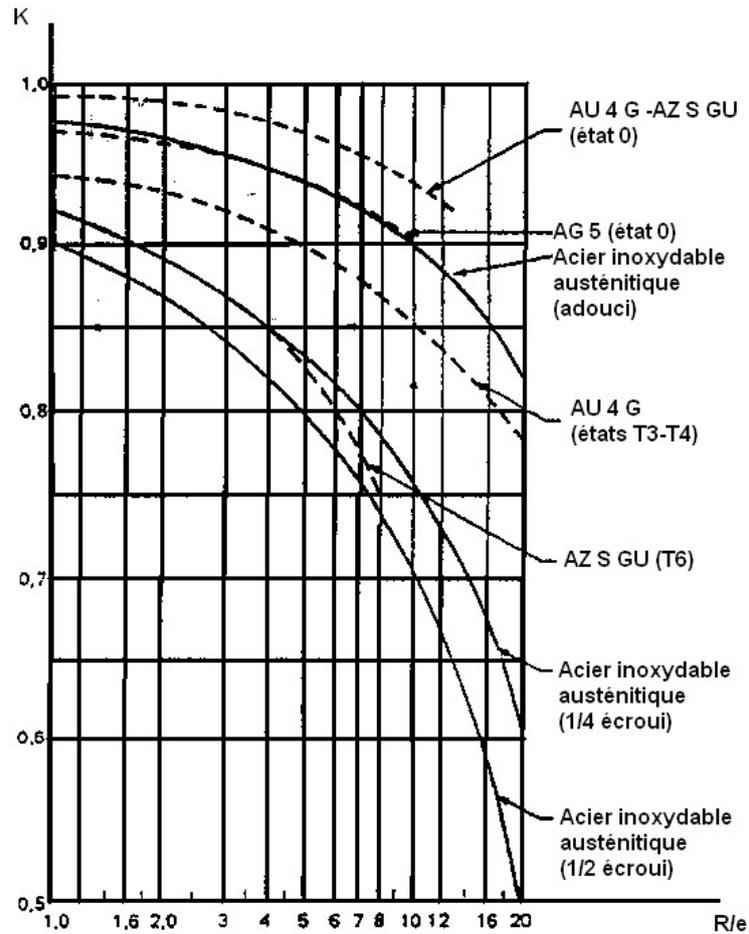


Figure 45 -Abaque du Coefficient de retour élastique

K		Aluminium	Acier doux	Laiton	Z2CN18-10
Ri/e	1	0.99	0.99	0.98	0.99
	2	0.99	0.99	0.97	0.97
	4	0.99	0.98	0.95	0.94
	10	0.99	0.95	0.92	0.90

Tableau 5 -Coefficient du Retour élastique

3.10. Calcul de l'effort de pliage

La connaissance de l'effort à fournir dans le pliage est utile pour le choix de la presse, pour cela on utilise les formules expérimentales ou les abaques.

L'effort de pliage dépend de plusieurs facteurs englobant :

- Le matériau (la résistance, l'épaisseur)
- La forme de la pièce (en V, Z, U, ...)

- La façon d'exécution du pliage (pliage avec poinçon et matrice ou avec plaque pivotante).
- Le frottement entre le demi-produit et l'outillage.
- La vitesse de déformation...

3.10.1. Le pliage en V

3.10.1.1 Pliage sans frappe :

L'effort de pliage exercé par le poinçon est donné par la

formule suivante :
$$F1 = K \frac{L e^2 R_m}{v}$$

où R_m la résistance mécanique du métal à plier (N/mm^2)

L : longueur pliée

e : épaisseur de la tôle (mm)

v : ouverture du V (mm)

K : un coefficient dépendant de V :

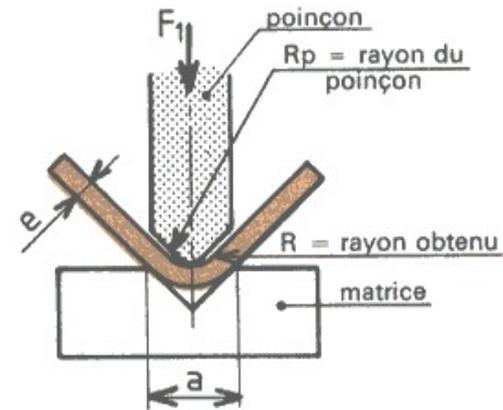


Figure 46 -Effort de pliage :F1

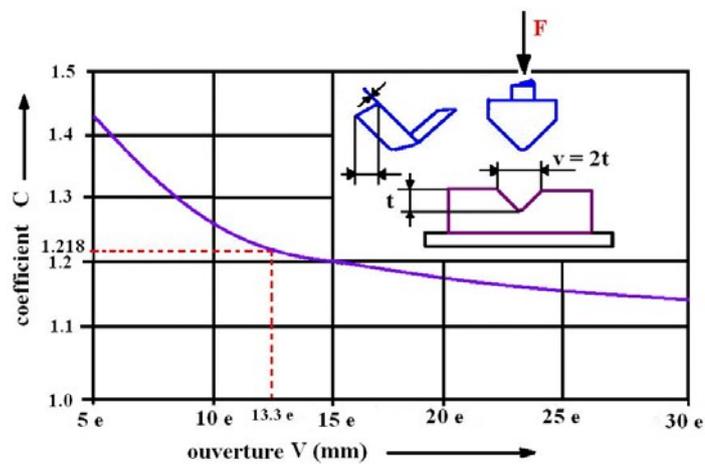


Figure 47 -Coefficient en fonction de V

3.10.1.2 Pliage sans frappe :

L'effort : $F2 = 2F1$

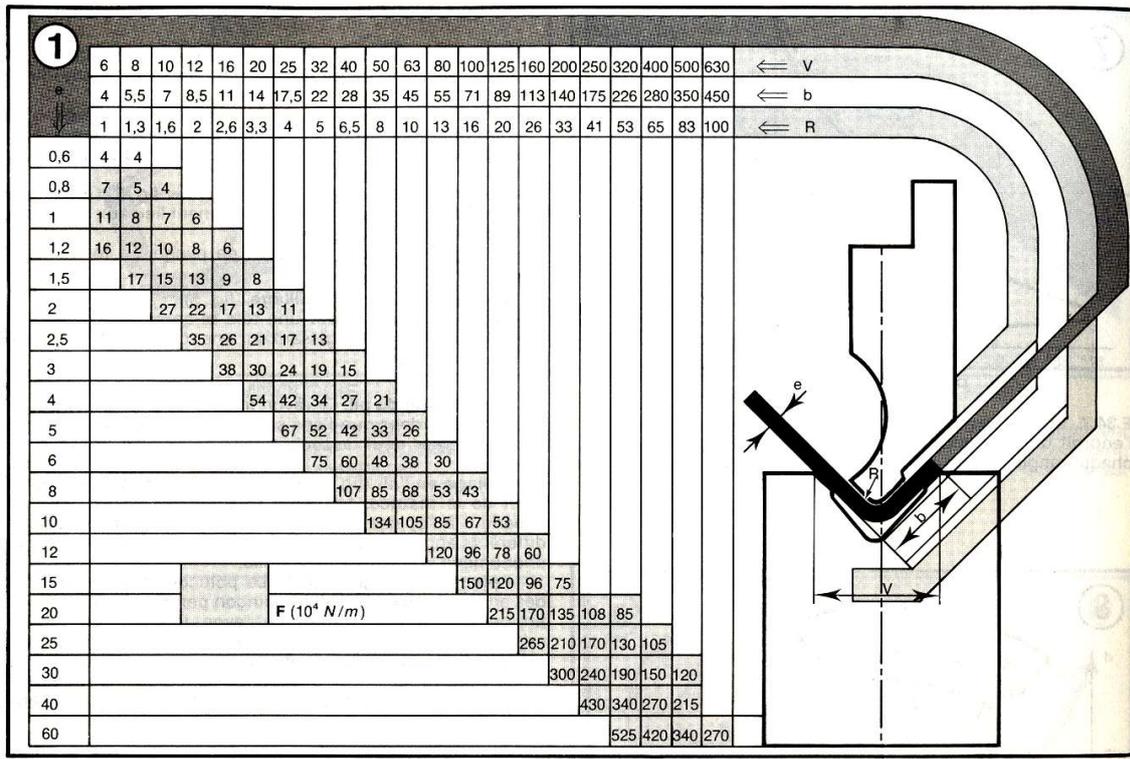


Figure 48 - Effort de pliage pour un acier de résistance $400 < R_m < 450 \text{ N/mm}^2$

Exemple : Pour $\begin{cases} e=2 \text{ mm} \\ v=10 \text{ mm} \\ L=2 \text{ m} \end{cases}$, l'effort est donné par $F = 27 \cdot 10^4 \cdot 2 = 54 \cdot 10^4 \text{ N}$

Cet abaque est établi pour un acier ($400 < R < 450 \text{ N/mm}^2$). Etant donné l'épaisseur e de la tôle à pliée et le rayon de pliage R , on détermine la force F qui sera multiplier par (10^4 N/m) par mètre de longueur pliée. Par ailleurs l'abaque indique la largeur minimale du bord b ainsi la largeur du V v ($6 < v < 8 \cdot e$).

3.10.2. Pliage en U

3.10.2.1 Sans frappe

Dans ce cas, l'effort est fortement tributaire du jeu entre poinçon et matrice. Si le jeu = épaisseur nominale de la tôle + tolérance maximale, l'effort peut être défini par la relation :

$$F_3 = \frac{2}{3} \times L \times R_m \times e \times \left(1 + \frac{e}{a}\right)$$

3.10.2.2 Avec frappe

La relation $F_4 = 2,5 \times F_3$ permet d'obtenir de bons résultats.

4. Chapitre V : EMBOUTISSAGE

4.1. 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.

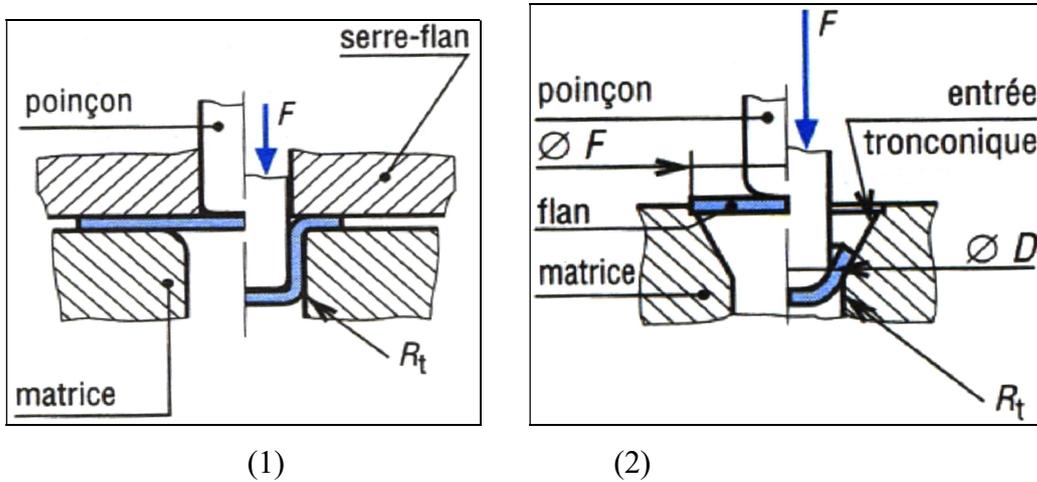


Figure 49 - (1) Emboutissage avec serre flan (2) Limitation aux embouties de faible hauteur

4.2. Procédés d'emboutissage

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

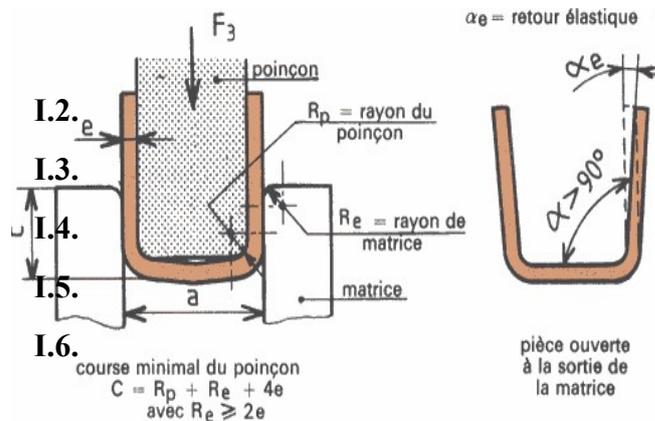


Figure 50 - Procédé d'emboutissage

4.2.1. 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 ci-dessous).

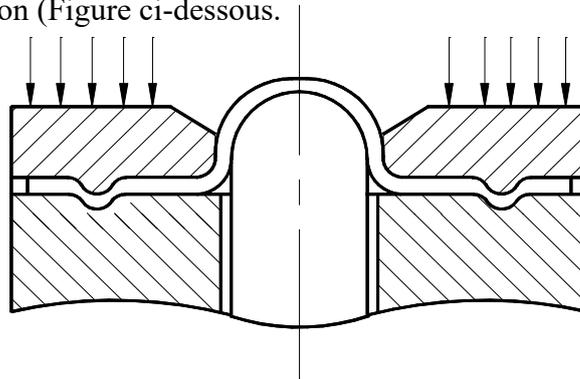


Figure 51 -Emboutissage en expansion

4.2.2. 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 52).

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.

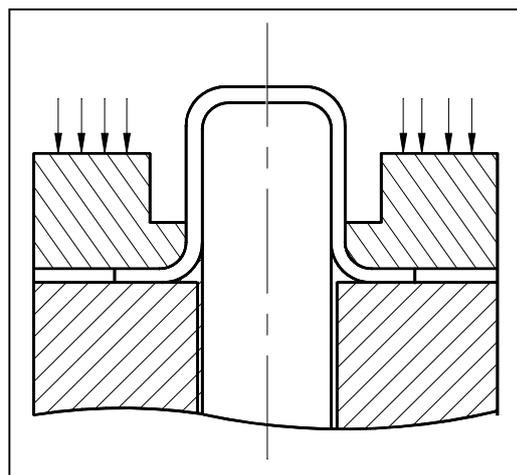


Figure 52 -Emboutissage en rétreint

4.3. Machines utilisées en emboutissage

Les presses mécaniques (système bielles-manivelles) travaillant par chocs sont réservées pour les emboutis de **faibles hauteurs** ($h < d$), et les cadences de production importantes (jusqu'à 400

coups par minute). Les capacités de ces machines peuvent aller de 2 000 à 10 000 kN selon la structure de la machine.

Les presses hydrauliques travaillant par pression sont réservées pour **les emboutis profonds** ($h > d$), ainsi on peut moduler l'effort appliqué sur le flan dans les cas délicats.

4.4. Différents types d'emboutissages

4.4.1. Emboutissage à froid

Il est réalisé sur des presses mécaniques. L'emboutissage à froid est réservé aux matériaux d'épaisseur inférieure à 6mm (**aluminium, aciers inoxydables, laiton, aciers doux (0.2% C max)**), cette procédé impose, sauf rares exceptions, un outillage double effet. Les emboutis peu profonds ou ne nécessitant pas d'importants efforts de serrage, sont exécutés sur des presses double effet. Le serre-flan applique la tôle sur la matrice pendant toute la durée du travail du poinçon, l'opération terminée, la pièce est dégagée soit à l'aide de l'éjecteur, soit au travers de la matrice.

4.4.2. Emboutissage à chaud

Il est réalisé exclusivement sur presses hydrauliques. Il est réservé aux matériaux peu ductiles (magnésium, titane, zinc, ...), aux emboutissages profonds, et aux tôles de forte épaisseur nécessitant de grands efforts (épaisseur supérieure à 7 mm pour l'acier). Les cadences de production sont inférieures et les aspects de surface sont moins bons, vis-à-vis de l'emboutissage à froid.

4.5. Outillages

4.5.1. Le jeu entre le poinçon et la 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 a une influence favorable sous l'effet du poinçon mais 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 existait entre le poinçon et la matrice, il se produit un écrasement et un amincissement indésirables de la paroi.

4.5.2. Le rayon sur la matrice :

Ce paramètre a une très grande importance autant pour la qualité de l'embouti que pour la

répartition des forces. En effet, on comprend parfaitement que dans les deux cas extrêmes (Figure.4), l'emboutissage n'est pas fiable.

Pour $r = 0$ on a un déchirement du flan et pour $r = \frac{(D-d)}{2}$ on a la formation de plis.

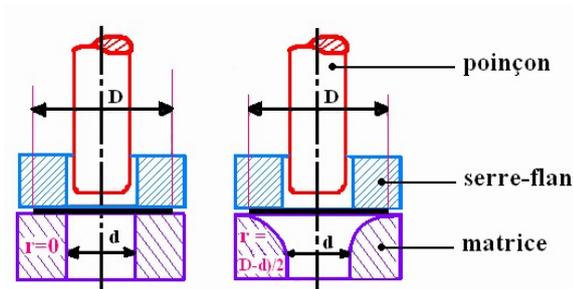


Figure 53 -Variation de l'arrondi sur la matrice

Afin de déterminer le rayon efficace, on utilise la relation de Kaczmarek

📖 Concernant la première passe :

✓ Pour l'acier : $r = 0,8[e.(D - d_1)]^{1/2}$

✓ Pour l'aluminium : $r = 0,9[e.(D - d_1)]^{1/2}$

- r : rayon de la matrice
- D: diamètre du flan (mm)
- d_1 : diamètre de l'embouti (mm)
- e : épaisseur du flan (mm).

📖 Pour les passes suivantes : $r_n = \frac{d_{n-1} - d_n}{2}$

4.5.3. Le rayon sur le poinçon (Rp) :

La partie de la tôle qui se trouve en contact avec le rayon trop faible de poinçon subie une diminution d'épaisseur (1), après emboutissage, le défaut se retrouve sur la surface latérale de l'embouti (2) (fig.8) .le rayon (R_p) est limite entre 5e et 10e

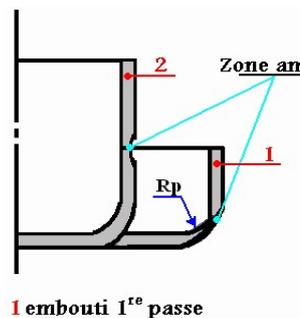


Figure 54 -le rayon sur le poinçon

4.6. Détermination du flan

On distingue plusieurs méthodes pour la détermination des dimensions du flan pour les corps rotatifs : la méthode analytique et graphique.

Si on considère que, globalement, l'épaisseur reste constante au cours de l'emboutissage, on peut écrire : Surface du flan = surface de la pièce finie

4.6.1. Méthode analytique

Du fait de l'égalité des surfaces de l'embouti et du flan on a : $S_f = S$.

S_f : est la surface du flan et S : est la surface de l'embouti

- Cas d'une pièce cylindrique :

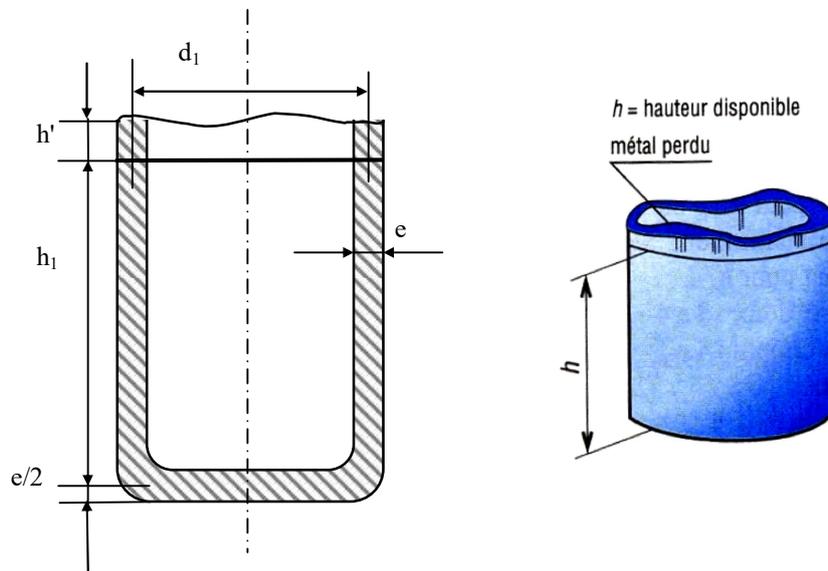


Figure 55 -Pièce cylindrique

$$\frac{\pi D_f^2}{4} = \frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d_1 (h_1 + h') \Rightarrow D_f = \sqrt{d_1^2 + 4 d_1 (h_1 + h')}$$

L'épaisseur est supposée constante, le flan et l'embouti auront la même surface. Une distance h' sera ajoutée pour le détournage qui est en fonction de la hauteur de l'embouti h tel que le montre le tableau si dessous.

Hauteur de l'embouti h (mm)	6	12	20	25	38	50	65	75	90	100	125	150	Supérieur à 150
Distance h' (mm)	1,2	1,6	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	5% h

- Si l'embouti cylindrique à une forme compliquée, on le décompose en plusieurs élément de surface S_1, S_2, \dots, S_n .

$$\frac{\pi D_f^2}{4} = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n \Rightarrow D_f = \sqrt{\frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^n S_i} \text{ ou } D_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{4}{\pi} S_i}$$

Les expressions $\frac{4}{\pi} S$ relative aux éléments des emboutis sont donnés par le tableau suivant :

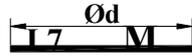
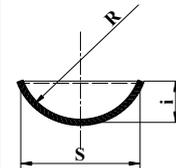
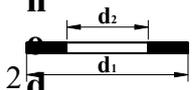
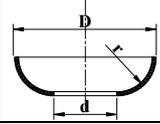
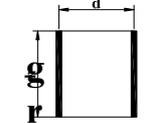
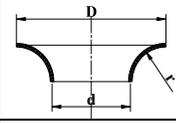
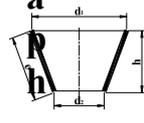
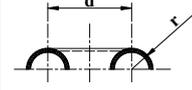
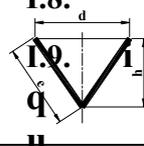
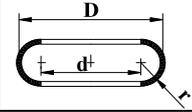
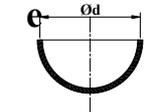
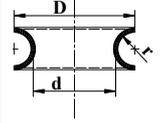
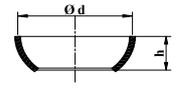
Elément	$\frac{4.S}{\pi}$	Elément	$\frac{4.S}{\pi}$
Remarque : Tous les paramètres sont rapportés à la fibre neutre.			
1 	d^2		$4.d.i$ ou $8.R.i$ ou $(S^2 + 4.i^2)$
2 	$d_1^2 - d_2^2$	9 	$2.\pi.r(d + 1.3r)$ $2.\pi.r(D - 0.7r)$
3 	$4.d.h$	10 	$2.\pi.r(d + 0.7r)$ $2.\pi.r(D - 1.3r)$
4 	$2.e.(d_1 + d_2)$ ou $2(d_1 + d_2)\sqrt{h^2 + \frac{(d_1 - d_2)^2}{4}}$	11 	$4.\pi.r.d$
5 	$2.d.\sqrt{\frac{d^2}{4} + h^2}$ ou $2.d.e$	12 	$4.\pi.r(d + 0.58r)$ $4.\pi.r(D - 1.42r)$
6 	$2.d^2$	13 	$4.\pi.r(d + 0.58r)$ $4.\pi.r(D - 1.42r)$
7 	$4.d.h$		

Tableau 6 -Les éléments des embouties

•Principe de la méthode :

La détermination d'un diamètre du flan d'un embouti cylindrique est obtenue à l'aide du théorème de Guldin.

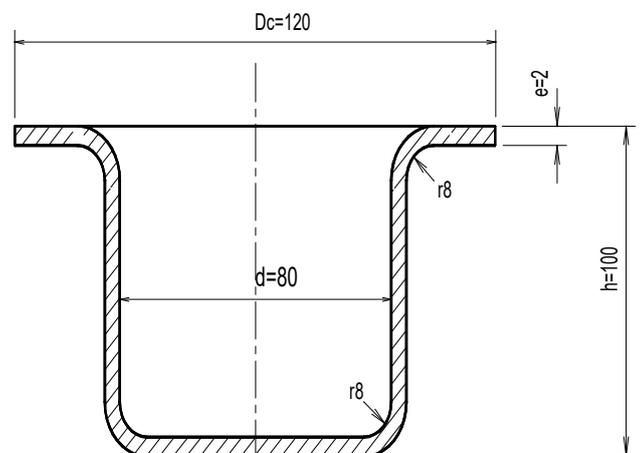
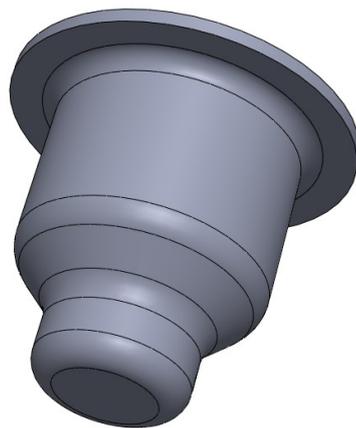
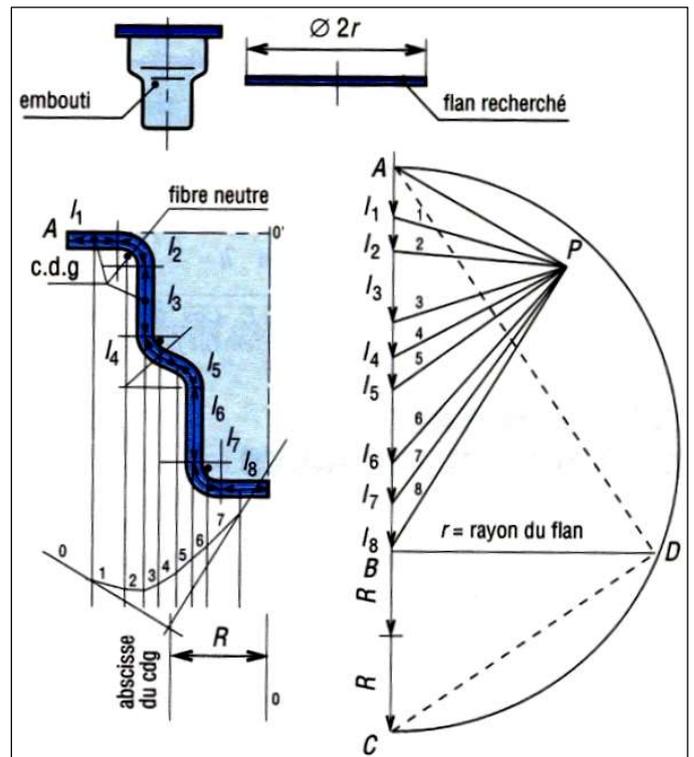
$$\pi r^2 = 2\pi(l_1 r_1 + l_2 r_2 + l_3 r_3 + \dots + l_n r_n) = 2\pi.R \sum_i (l_i)$$

$$r^2 = 2.R \sum_i (l_i)$$

$$r^2 = (2.R).(\sum_i (l_i))$$

$$BD^2 = AB \cdot BC \text{ avec : } AB = 2 \cdot R \text{ et } BC = \sum_i(l_i)$$

Donc, pour chercher r , on utilise la méthode du polygone funiculaire. Après avoir divisé le demi profil de la pièce en éléments simples, de dimension facile à estimer et situé leur centre de gravité (cdg), on les représente comme des forces qui permettent de conduire le dynamique. Les intersections des parallèles au rayon polaire avec les lignes verticales passant par le c.d.g des précédents permettent de tracer le polygone funiculaire et de trouver la distance R du c.d.g de la fibre neutre par rapport à l'axe de rotation OO' . Après avoir ajouté $2 R$ dans le prolongement de AB , on obtient la droite AC et le demi-cercle de rayon $AC/2$. la perpendiculaire élevée en B coupe le cercle en D et devient la hauteur du triangle rectangle ACD . La hauteur étant la moyenne proportionnelle entre les segments qu'elle détermine sur l'hypoténuse, on peut écrire : $r^2 = 2 R \sum l_i$.



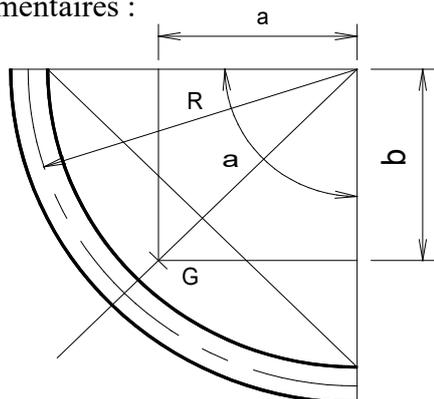
• **Méthode de traçage :**

Pour rechercher r , on utilise la méthode du polygone funiculaire :

1. Tracer la section de l'embouti ;
2. Décomposer la forme (section) en élément simples (droites ou arcs de cercles) ;
3. Calculer la longueur de chaque élément simple ;

4. Déterminer la position du centre de gravité de chaque élément simple ;
5. Tracer les lignes de rappel issues des cdg des éléments simples ;
6. Tracer le segment AB ($\sum li$) ;
7. Prendre un point P quelconque et joindre les extrémités des segments li à P.
8. Numéroté les polaires de 1 à N, en commençant par le haut.
9. Ensuite tracer une droite parallèle à la polaire 1 et coupant la 1^{ère} ligne de rappel située à gauche de la section ;
10. A ce point d'intersection, tracer une droite parallèle à la polaire 2 à partir de ce point ;
11. On procède ainsi de proche en proche avec toutes les polaires ;
12. Prolonger les polaires 1 et N qui se couperont en un point qui présentera la position du centre de gravité (r) de la section par rapport à l'axe de l'embouti
13. Tracer le segment $BC = 2r$;
14. Tracer le demi-cercle de diamètre $AC = \sum li + 2r$;
15. Au point B, tracer une droite perpendiculaire qui va couper le demi-cercle en un point D ;
16. Le triangle ACD est un triangle rectangle (puisque inscrit dans un cercle). BD est la hauteur et est égale au rayon du flan recherché. Diamètre du flan $D = 2.r$

Remarque : la figure ci-contre présente les relations permettant de trouver la position du cdg des arcs élémentaires :



$$a = \frac{180.R.\sin \alpha}{\pi.\alpha}$$

$$b = \left(\frac{180.R.\sin \alpha}{\pi.\alpha}\right).tg \frac{\alpha}{2} = a.tg \frac{\alpha}{2}$$

Figure 56 -Centre de gravité d'un arc

4.6.2. Méthode en utilisant des abaques

4.6.2.1 Cas d'un emboutis sans collerette

Démarche :

1. Joindre h et r : on obtient a_1 sur la verticale de a .
2. Joindre a_1 et d : on lit la valeur de R_f sur la verticale correspondante.

Remarque :

Le monogramme comporte 3 échelles, repères I, II et III, pour les valeurs de d et R_f . Elles naturellement à utiliser en concordance.

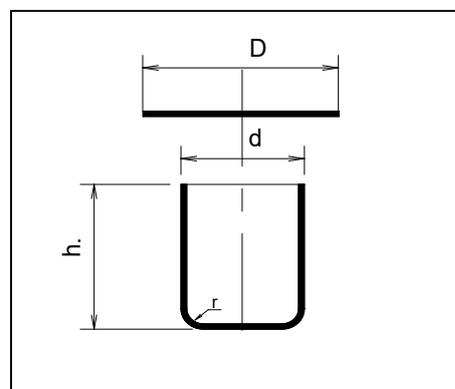
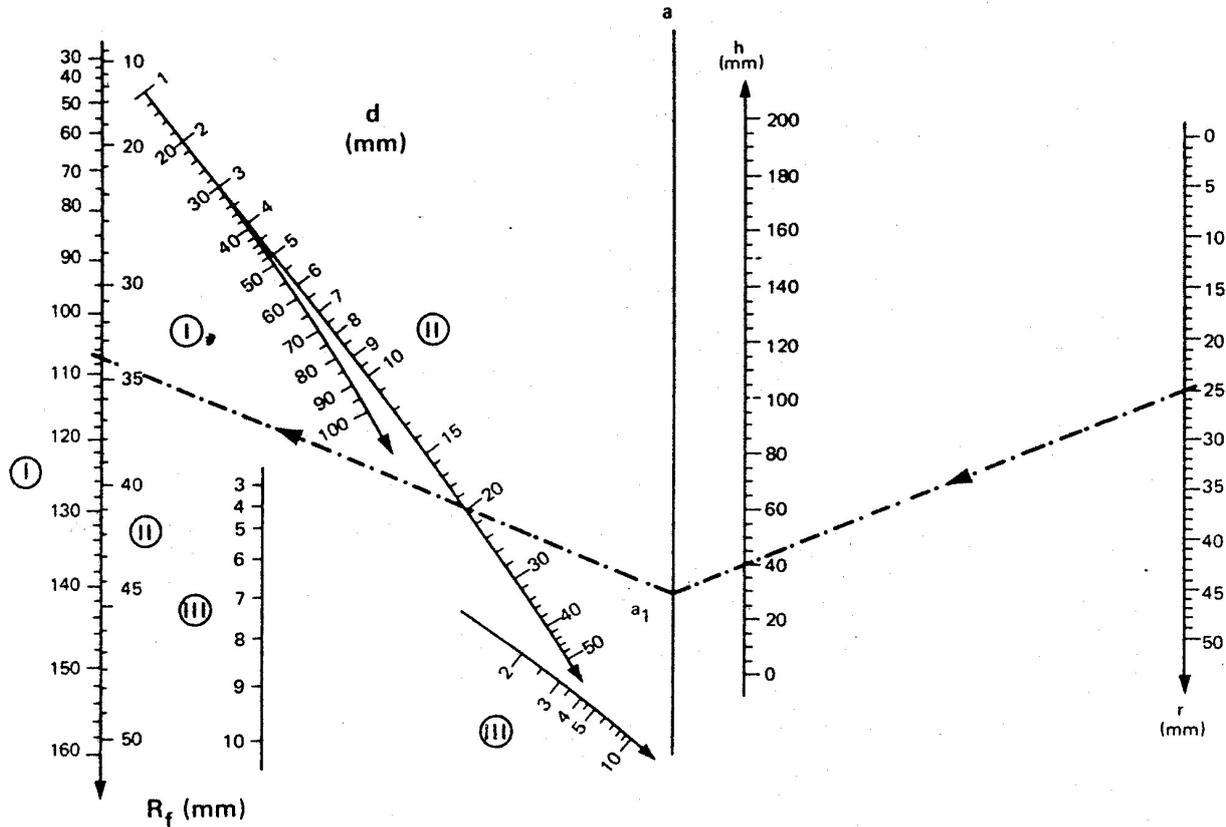


Figure 57 - Emboutis sans collerette

📖 Abaque :



• Exemple :

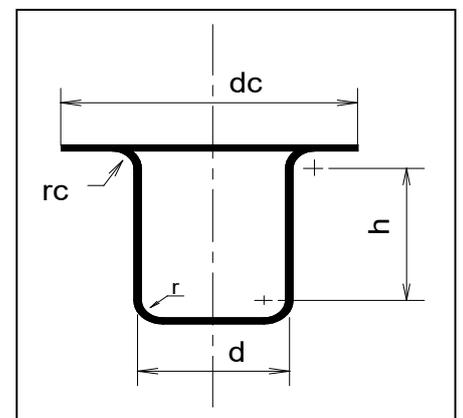
▪ Données : $r=10$ mm ; $h=80$ mm ; $d=100$ mm

▪ Résultat :

$\Rightarrow R_f = \dots\dots$ mm

$\Rightarrow D_f = \dots\dots$ mm

4.6.2.2 Cas d'un emboutis avec collerette



Démarche :

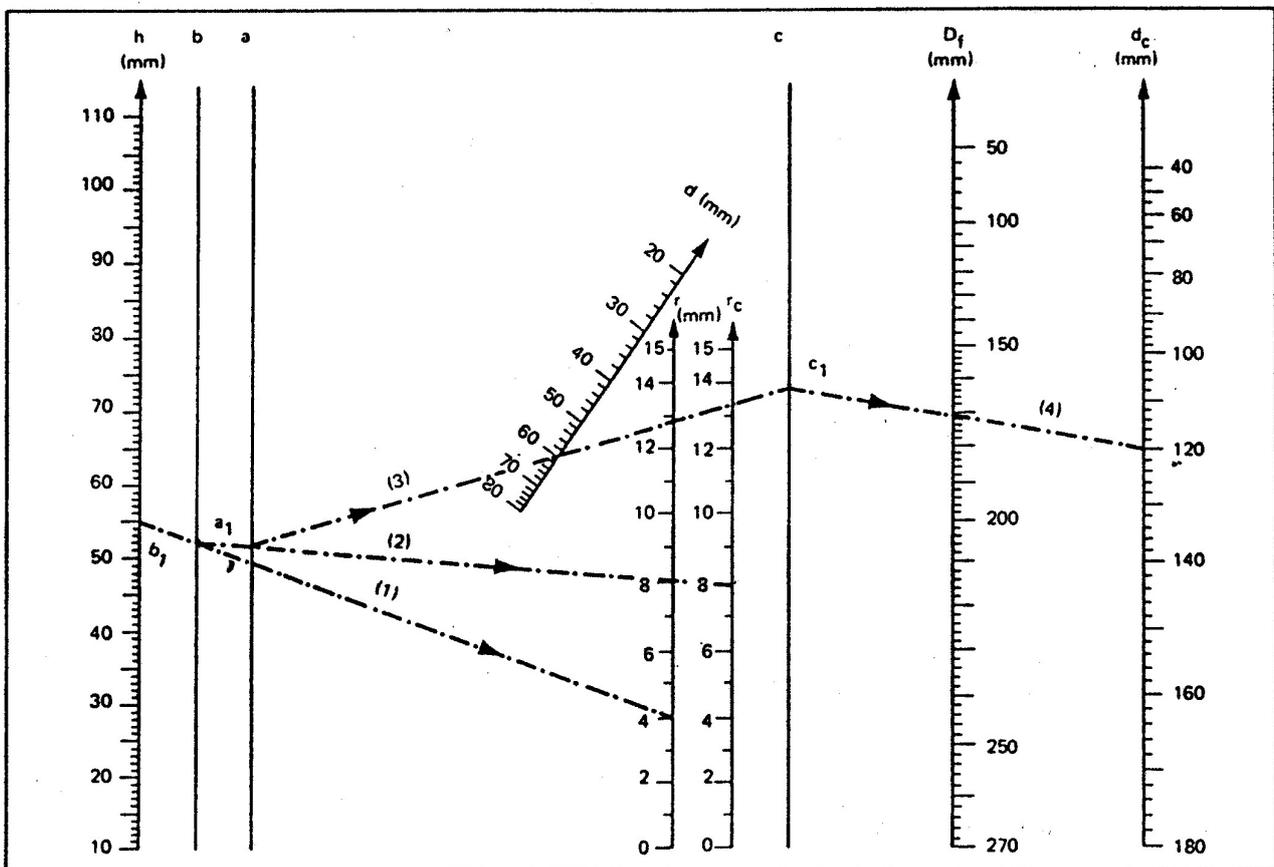
3. Joindre h et r : on obtient le point b₁ sur la verticale b.
4. Joindre b₁ et r_c: on obtient le point a₁ sur la verticale a.
5. Joindre a₁ et d: on obtient le point c₁ sur la verticale c.
6. Joindre c₁ et d_c: on lit la valeur de D_f sur la verticale correspondante.
7. on lit la valeur de D_f sur la verticale correspondante.

Exemple :

h=55mm, r=4mm, r_c=8mm, d=60mm, d_c=120mm

On obtient D_f=170mm

Figure 58 - Emboutis avec collerette



4.7. Détermination de nombre de passe

Après le calcul du diamètre du flan D, on doit établir le coefficient de réduction global

(total) $m_g : m_g = \frac{d_n}{D}$

Ou d_n : Diamètre intérieur de l'embouti

D : diamètre du flan

n : nombre des opérations ou passes

Quand $m_g < m_{1min}$, on doit appliquer plus qu'une opération d'emboutissage. Pour établir le coefficient de réduction on tient compte d'un diamètre critique d_n , à ne pas dépasser, au risque de provoquer la striction localisée puis la rupture de la tôle. Les coefficients de réduction m_{1min} admissible pour plusieurs valeurs de e/D (commun pour l'acier, cuivre, laiton et aluminium

100* e/D	2	1,5	1	0,75	0,6	0,4	0,2	0,15	0,08	0,06
m_{1min}	0,48	0,5	0,53	0,54	0,55	0,56	0,58	0,6	0,63	0,64

Pour n opérations nous avons :

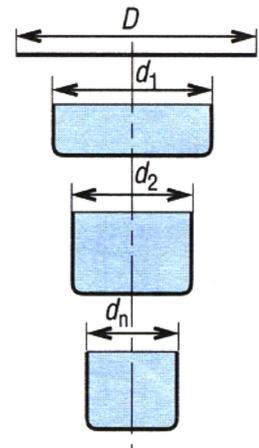
$$m_{gn} = \frac{d_n}{D} = \frac{d_1}{D} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{d_3}{d_2} \cdot \frac{d_4}{d_3} \dots \frac{d_n}{d_{n-1}}$$

Si on pose :

-La réduction de la première passe : $m_1 = \frac{d_1}{D}$

-La réduction de la deuxième passe : $m_2 = \frac{d_2}{d_1}$

-La réduction de la $n^{\text{ème}}$ passe : $m_n = \frac{d_n}{d_{n-1}}$



Le nombre d'opération n peut être donné par : $m_{gn} = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \dots m_n$

Or on a en emboutissage $m_2 = m_3 = m_4 = \dots = m_n$

Ce qui implique que : $m_{gn} = \frac{d_n}{D} = m_1 \cdot m_2^{n-1}$

D'où le nombre d'opération est égale à : $n = 1 + \frac{\log d_n - \log (m_1 D)}{\log m_2}$

Avec m_1 et m_2 dépendant de la matière de la tôle et donnés par le tableau suivant.

Matière	Coefficients de réduction	
	m_1	m_2
Tôle d'emboutissage ordinaire –doux	0,6	0,80
Tôle d'emboutissage spécial –mi dur	0,55	0,75
Tôle en acier inoxydable austénitique	0,51	0,80
Tôle en acier inoxydable ferritique	0,57	0,80
Cuivre	0,58	0,85
Laiton	0,53	0,75
Aluminium recuit	0,50	0,8
Duraluminium recuit	0,55	0,9

Tableau 7 - Coefficients de réduction

4.8. Vitesse d'emboutissage

Elle se définit comme la vitesse du poinçon au moment de l'attaque de la tôle. Une vitesse trop faible, tend à générer un écrouissage trop important sur le métal, le rendant moins malléable. Une grande vitesse tend à empêcher la propagation de la force du poinçon jusqu'au niveau du flan. Cette altération pouvant alors se traduire par une rupture du flan.

D'après BLISS, il existe une vitesse optimale pour chaque métal, ces vitesses sont reportées dans le tableau 7.

Matériau	Vitesses
l'acier	200
le zinc	200
les aciers doux	280
l'aluminium	500
le laiton	750

Tableau 8 -vitesses d'emboutissage

4.9. Effort d'emboutissage

L'effort nécessaire pour emboutir des pièces cylindriques dépend tout d'abord des diamètres de l'embouti et du flan primitif, de l'épaisseur et du type de matériau. Il dépend également de la pression de serre-flan, de la vitesse d'emboutissage, de rayon de la matrice, du jeu entre poinçon et matrice et de la lubrification. Cet effort (et cette énergie) résulte de la somme de l'effort de formage proprement dit (F) { d'énergie (W) } et de l'effort serre-flan (F_{sf}) qui permet de choisir la presse approprié.

4.9.1. Effort de serre flan

L'effort de serre flan est donné par :

$$F_{sf} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_f^2) k_s \text{ Pour la première passe.}$$

$$F_{sf} = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) k_s \text{ Pour la deuxième et passes suivantes}$$

k_s : pression spécifique en N/mm^2 .

Matière	Pression (N/mm^2)
Acier doux – $e < 1mm$	2,5 à 3,0
Acier doux - $e > 1mm$	1,8 à 2,5
laiton	1,5 à 2,5
Cuivre	1,2 à 1,5
aluminium	0,8 à 1,2
bronze	2,0 à 2,5

Tableau 9 -Pression des matériaux

4.9.2. Effort de poinçon

On pratique pour les pièces cylindriques, l'effort est déterminé d'après le tableau suivant :

Opération	Effort (N)	Energie (J)	Observations																					
<p><i>Pièce cylindrique</i></p> <p>1-1^{ère} passe</p> <p>2-n-ième passe</p>	$F_E = K \pi d e R r$	$W_E = \frac{K_1 h F_E}{1000}$	<table border="1"> <tr> <td>d/D</td> <td>0.55</td> <td>0.6</td> <td>0.65</td> <td>0.7</td> <td>0.75</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>1</td> <td>0.86</td> <td>0.72</td> <td>0.6</td> <td>0.5</td> <td>0.4</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.8</td> <td>0.77</td> <td>0.74</td> <td>0.7</td> <td>0.67</td> <td>0.64</td> </tr> </table>	d/D	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	K	1	0.86	0.72	0.6	0.5	0.4		0.8	0.77	0.74	0.7	0.67	0.64
d/D	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8																		
K	1	0.86	0.72	0.6	0.5	0.4																		
	0.8	0.77	0.74	0.7	0.67	0.64																		
<p><i>Pièce quadrangulaire</i></p> <p>$h = \text{hauteur}$ $L = 2(a+b)$</p>	$F_E = e R r$ $(2K_A \pi r + K_B L)$	$W_E = \frac{0.7 h F_E}{1000}$	<p>$K_A = 0.5$ pour les emboutis peu profonds $= 2$ pour les emboutis dont $h=5$ à $6r$.</p> <p>$K_B = 0.2$ pour un jeu important et pas de SF $= 0.3$ à 0.5 si écoulement facile et faible SF. $= 1$ si fortes pressions SF.</p>																					
<p><i>Pièce quelconque</i></p>	$F_E = p e R r$	$W_E = \frac{h F_E}{1000}$																						

Tableau 10 - Effort de poinçon

5. Chapitre VI : *LE CINTRAGE*

5.1. Définition

Le cisailage est la séparation totale ou partielle d'un élément métallique à l'aide de deux lames dont l'une au moins est mobile.

5.2. Principe

Le cintrage des tôles s'obtient par un effort de flexion provoqué :

- Par pression (à la main ou à la machine)
- Par chocs (au marteau ou au maillet)

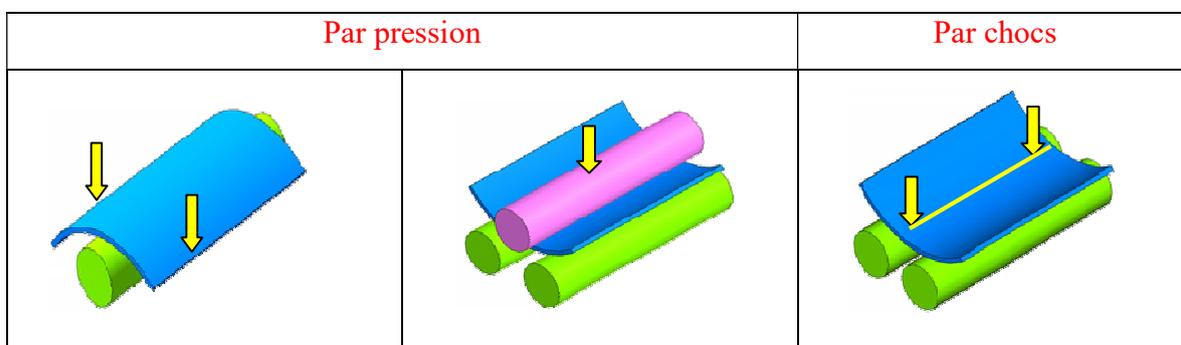


Tableau 11 -Principe de cintrage

Cintrer une tôle c'est lui donner, partiellement ou totalement une forme cylindrique ou conique.

Le cintrage peut être :



5.3. Longueur développée

Lors du cintrage les fibres qui sont à l'extérieur s'allongent, alors que celles qui sont à l'intérieur sont comprimées et se raccourcissent ; il existe une ligne qui reste constante lors du cintrage et qui délimite ces deux zones, LA FIBRE NEUTRE, elle subit ni allongement ni compression. Le calcul de la longueur développée se fera suivant la fibre neutre (FN).

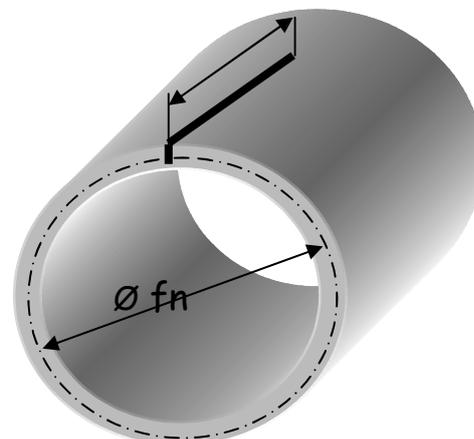
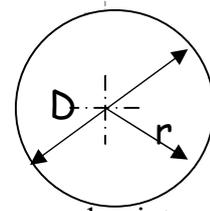


Figure 59 -principe

$$L_D = \text{Périmètre} = \pi \times D = (\pi \times 2 \times r)$$



5.4. Machines à cintrer les tôles :

Elles sont fréquemment désignées sous le nom de "rouleuses" ; les organes de cintrage sont constitués par des rouleaux traités en acier dur, d'une grande résistance à la flexion.

5.4.1. Différents types de machines

5.4.1.1 Cintreuse type « Planeur »

La disposition des rouleaux entraîneurs permet le dégauchissage des tôles minces et moyennes d'où leur désignation : Type PLANEUR

	Machine à trois rouleaux :	Machine à quatre rouleaux :
	Les 2 rouleaux entraîneurs sont situés dans un plan vertical, le rouleau cintréur se déplace obliquement.	Cette machine comporte deux rouleaux cintréurs C1 et C2, qui permettent l'amorçage sans retourner la tôle.
Principe		
Exemple et observations		<p>Ce type de machine est conçu pour le cintrage des tôles moyennes et épaisses. Ce dispositif est très avantageux pour le cintrage de pièces lourdes et encombrantes. Amélioration de la machine à 3rouleaux ; un rouleau cintréur supplémentaire évite le retournement de la tôle lors du croquage.</p>

Tableau 12 -Les machines de cintrage

LE CROQUAGE :

Le principal avantage de ces machines est d'effectuer elles mêmes le croquage des extrémités mais dans un sens seulement pour la machine à 3 rouleaux; il faut donc retourner la tôle pour amorcer les deux. La machine à 4 rouleaux supprime cet inconvénient.

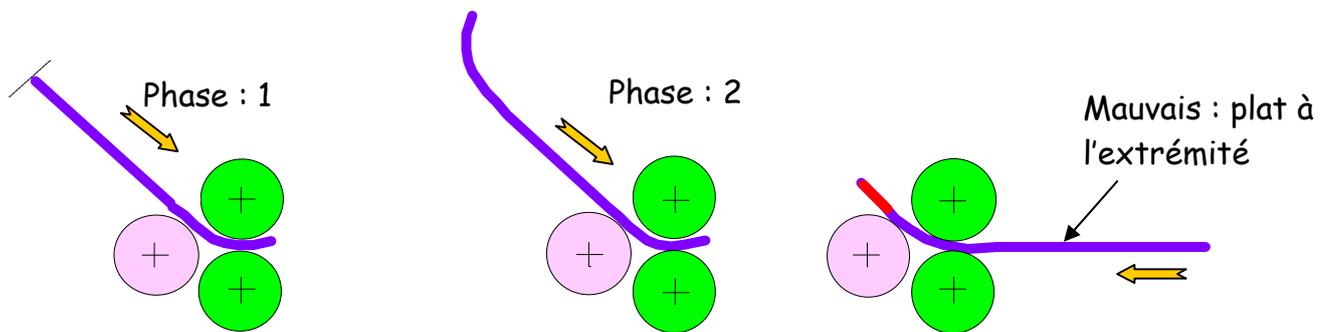


Figure 60 -Principe de croquage

Pour obtenir un cintrage total avec ce type de machine, il est donc nécessaire de « croquer » les extrémités.

D'une façon générale, le cintrage s'exécute en plusieurs passes en serrant de plus en plus le rouleau cintrreur. Les génératrices du cylindre sont parallèles aux rouleaux.

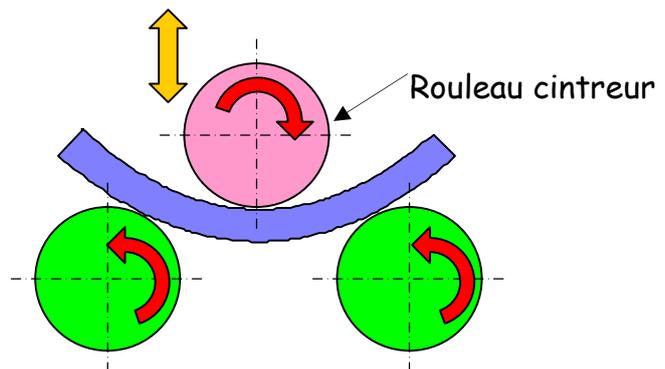
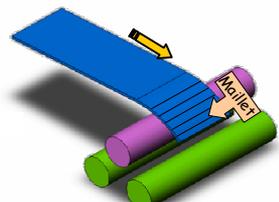
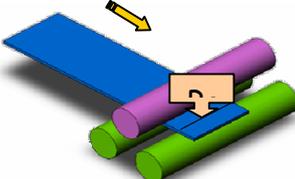


Figure 61 -Cintrage total

5.4.1.2 Cintreuse type « Pyramidal »

L'action du rouleau cintrreur ne se fait pas sentir dès l'extrémité de la tôle, laissant subsister ainsi un plat à chaque extrémité.

LE CROQUAGE :

<p>Sur tôles minces</p>	<p>Se fait avec un maillet sur un des rouleaux en frappant régulièrement suivant les génératrices ; (commencer par le bord)</p>	
<p>Sur tôles moyennes</p>	<p>Il se fait avec la panne du marteau à garnir, en avançant progressivement suivant les génératrices.</p>	

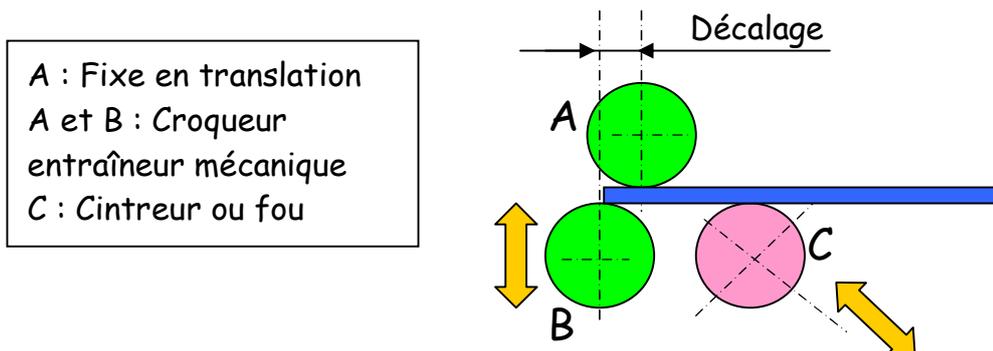
<p>Sur tôles épaisses</p>	<p>Il s'exécute à la presse entre une matrice et une panne de rayon approprié au cintrage à obtenir. Le croquage peut également être effectué sur presse plieuse avec outillage standard par plis successifs</p>	

Tableau 13 -Le croquage pour différentes épaisseur de pièce

5.4.1.3 Cintreuse à 3 rouleaux asymétrique

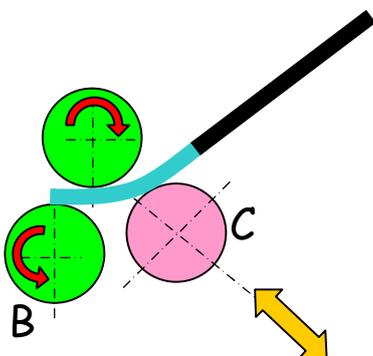
Cette machine est une amélioration de la machine à trois rouleaux type planeur ; elle est caractérisée par un léger décalage du rouleau inférieur par rapport au rouleau supérieur.

La tôle, encastrée entre les deux rouleaux croqueurs A et B, est maintenue en position sans exiger un serrage aussi énergique que celui demandé par le type planeur à trois ou quatre rouleaux. Cet avantage permet d'assurer une capacité de croquage égale à la capacité de cintrage.

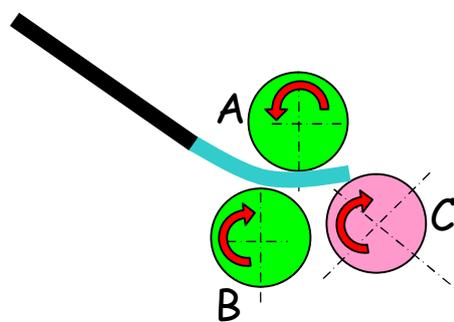


CROQUAGE :

Semblable à celui exécuté sur machine type planeur. On peut procéder à un seul croquage, puis sortir la tôle et la présenter en engageant l'extrémité amorcée.



PH 1 : Amorcage d'une extrémité



PH 2 : Retournement de la pièce

Dans les travaux de série, toutes les tôles sont d'abord croquées et reprises ensuite pour le cintrage.

5.1.1.4 CINTRAGE A LA PRESSE

Il est obtenu par réglage de la course du coulisseau d'une profondeur convenable dans la matrice (Point mort bas PMB).

On peut aussi garnir l'empreinte de la matrice d'un certain nombre de cales de façon à repérer la profondeur de descente du poinçon

Les tôles épaisses peuvent se cintrer à la presse hydraulique soit horizontale, soit verticale. Elles peuvent se cintrer également à la presse-plier.

A l'inverse des rouleaux qui agissent par pression continue, les presses travaillent par pressions successives.

On utilise généralement une empreinte en V ou en U reposant sur la table de la presse, et une panne arrondie montée sur le porte-poinçon. Pour obtenir un meilleur résultat, on soude sur la panne une tôle épaisse cintrée à un rayon légèrement inférieur au rayon de la pièce à obtenir.

Amorçage des extrémités

Cintrage d'un tiers environ
A une extrémité

Cintrage d'un tiers
a l'autre extrémité

Cintrage alter-
-natif d'un coté
et de l'autre

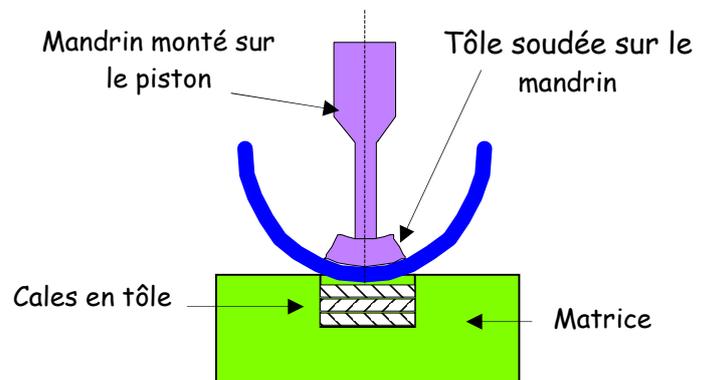
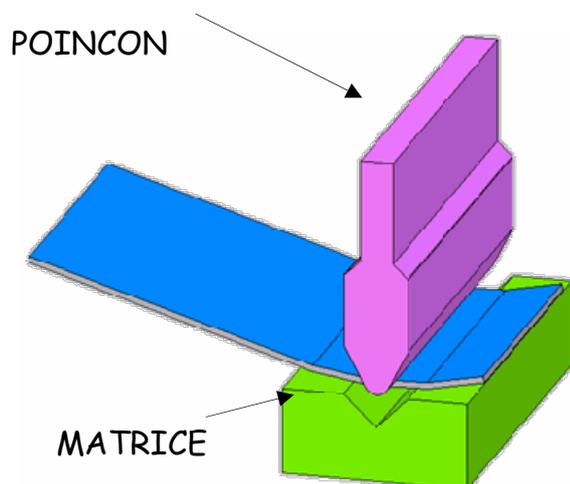
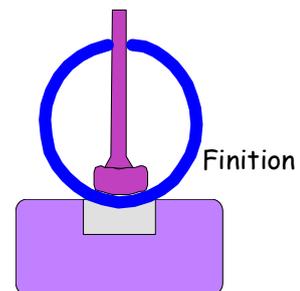


Figure 62 -Principe de cintrage à la presse

5.5. CINTRAGE D'UN TRONC DE CÔNE

5.5.1. Le Croquage

Il faut exécuter le croquage des extrémités puis la mise au gabarit ; deux gabarits de vérification sont utilisés : un pour la grande base, l'autre pour la petite. Il faut également s'assurer de la rectitude des deux génératrices extrêmes.

5.5.2. Le Cintrage

- **TÔLES MINCES** : Le cône se façonne facilement à la main sur une bigorne conique ; le terminer en rectifiant les deux extrémités au maillet.
- **TÔLES MOYENNES ET EPAISSES** : Les troncs de cônes sont formés soit avec une cintrouse, soit à la presse par plis successifs.

5.5.3. Machines utilisées :

Cintrouse type pyramidal à trois rouleaux, donnant le meilleur résultat ; on emploie également la cintrouse type planeur en plaçant une butée côté petit diamètre pour permettre une rotation de la tôle ; les génératrices du cône doivent rester parallèle à l'axe des rouleaux.

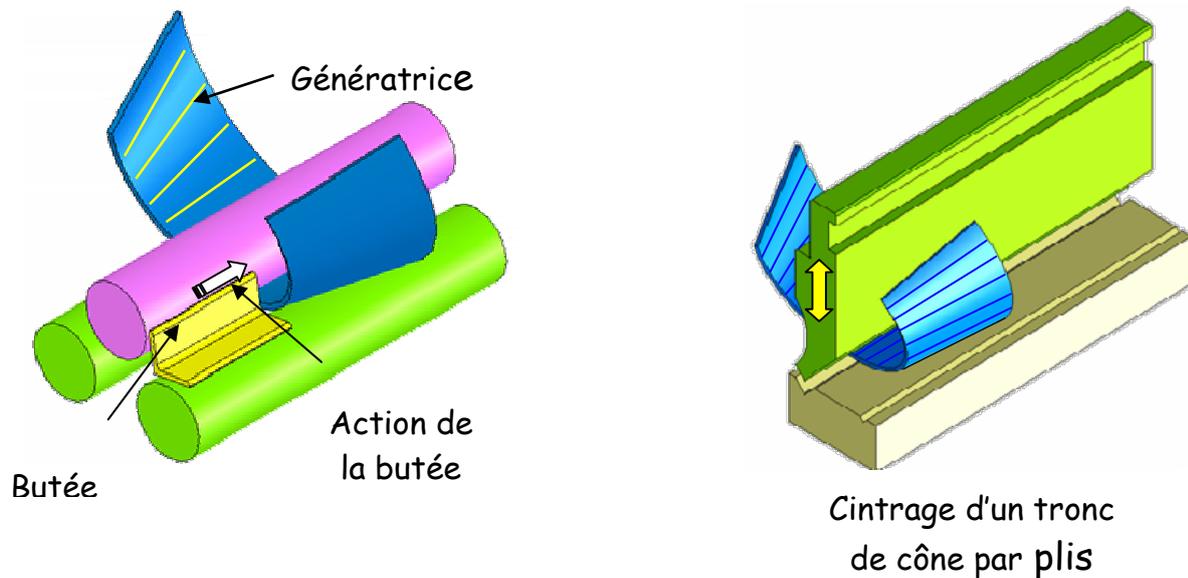


Figure 63 -Machines utilisées

6. Chapitre VII : Découpage Thermique et Jet d'eau

6.1. L'oxycoupage

6.1.1. Définition :

L'oxycoupage est un procédé d'obtention de pièces par découpage par action thermique avec combustion par action de l'oxygène.

6.1.2. Principe de l'oxycoupage

Le principe de base de l'oxycoupage fut donné par Lavoisier en 1776 lorsqu'il réalise l'expérience de la combustion d'un fil de fer dans une atmosphère d'oxygène. Après diverses études réalisées en Europe, le premier chalumeau coupeur industriel fut présenté à Liège en 1905. Avec un matériel et des gaz bien adaptés, l'oxycoupage permet de couper des épaisseurs d'aciers alliés et faiblement alliés de 3 à 1500 mm.



Figure 64 -Machines utilisées

6.1.2.1 Définition de l'oxycoupage

La rouille est le résultat d'un phénomène d'oxydation. Au contact de l'air ambiant, le fer s'oxyde lentement. Certaines atmosphères corrosives comme l'air salin accélèrent ce processus. A température élevée et en présence d'oxygène pur, l'oxydation est encore plus rapide. Elle est pratiquement instantanée. Le fer brûle se transformant en oxydes liquides.

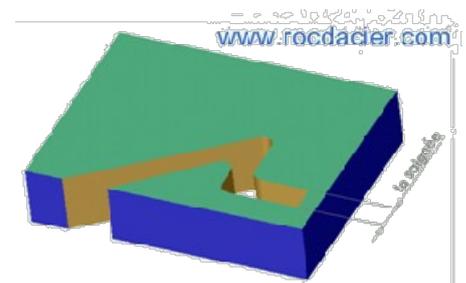


Figure 65 -Pièce oxycoupée

Le déplacement contrôlé de cette combustion crée un vide de matière : la SAIGNEE.

L'oxycoupage n'est pas une fusion mais bien une combustion du fer. Seul le fer, et sous certaines réserves de composition, l'acier remplissent cette condition.

La flamme oxyacétylénique résulte de la combustion d'un mélange d'oxygène et d'acétylène. Dans le dard se produit une combustion primaire :

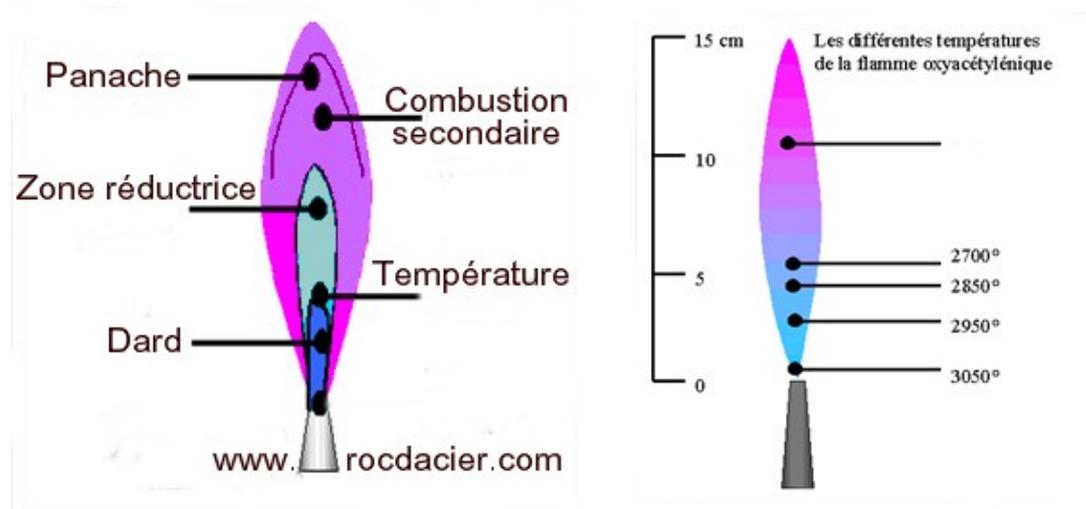


Figure 66 -Combustion primaire au niveau du dard

6.1.2.2 Mécanisme de l'oxycoupage

Pour obtenir une coupe nette, il faut localiser la combustion du métal, c'est le rôle du jet de coupe qui assure deux fonctions :

- ✓ L'apport nécessaire en oxygène pour entretenir la combustion,
- ✓ L'évacuation des oxydes qui se forment dans la saignée.

Tel un outil, le jet de coupe progresse dans le métal. Il doit donc être :

- ✓ Cylindrique, pour « façonner » des parois de
- ✓ Rigide, pour traverser et conserver son profil sur toute l'épaisseur de la pièce.

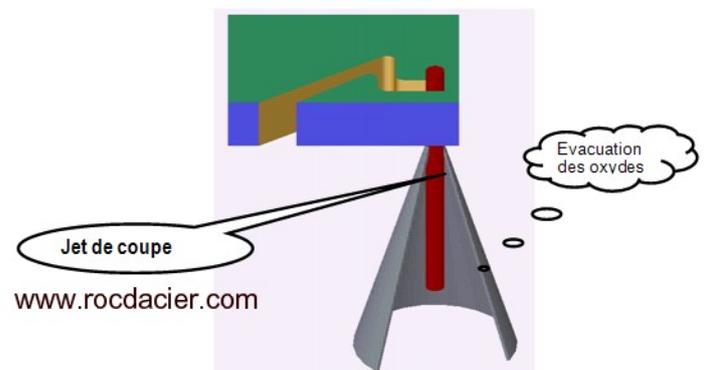


Figure 67 -Mécanisme de l'oxycoupage

6.1.2.3 La flamme de chauffe

La combustion du fer avec l'oxygène pur dégage une forte chaleur. Toutefois, au début de l'opération d'oxycoupage et pour amorcer la réaction, il est nécessaire de chauffer localement le métal. Pendant la coupe, le jet d'oxygène tend à refroidir le bord supérieur de la saignée. Pour ces deux raisons, une source de chaleur supplémentaire est nécessaire, c'est la flamme de chauffe.

Elle est généralement constituée de plusieurs petits dards répartis autour et à proximité du jet de coupe ; cette disposition permet un déplacement dans toutes les directions. La flamme de chauffe est le facteur essentiel qui conditionne le temps d'amorçage de la réaction d'oxydation et elle influe très largement sur la qualité de l'arête supérieure de la saignée.

6.1.3. Outillages et moyens utilisés

6.1.3.1 L'oxycoupage manuel :

Le chalumeau découpeur : la buse sera adaptée au gaz carburant acétylène ou propane

- Le Ø de la buse
- La pression des gaz
- La vitesse d'avance

Sont déterminés par l'épaisseur de la tôle à couper

Réglage de la flamme

- Allumer et régler la flamme de chauffe
- Ouvrir le jet d'oxygène de coupe
- Diminuer l'acétylène en excès

Epaisseur e (mm)	Diamètres des orifices d'oxygènes de coupe (mm)	Pressions d'oxygènes au chalumeau (bars)	Vitesses de coupes (mètres /heure)
5	0,6	1,5	20
8	0,8	1,5	17
10	1	1,5	15
15	1	2	12
20	1	2,5	11,5
25	1,5	2,5	10
30	1,5	2,5	9,5
40	2	3	8,5
50	2	3,5	7
75	2	4	5,5
100	2,5	4	4,5

Tableau 14 -Choix des paramètres d'oxycoupage

L'amorçage des coupes

S'exécute en partant d'un bord de la pièce pour les contours extérieurs ou depuis un trou préalablement percé pour les contours intérieurs. Découper en maintenant le dard à 2 ou 3mm de la pièce.

Les moyens de guidage

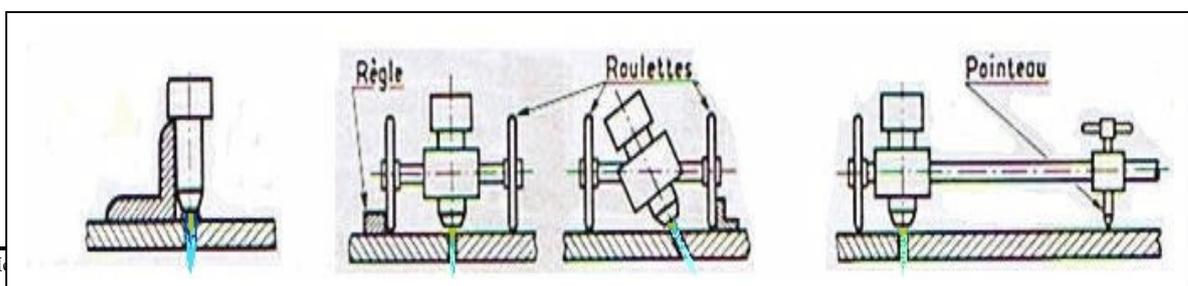


Figure 68 - Sur le bord d'un profilé/ Support à roulette pour la coupe rectiligne/ Compas guide pour la coupe circulaire

6.1.3.2 L'oxycoupage automatique

Une machine de coupage thermique a pour fonction de déplacer un outil (chalumeau d'oxycoupage), à une vitesse donnée sur une trajectoire donnée au-dessus de la pièce à découper.

La forme des pièces à réaliser est fournie par un « gabarit » que la machine doit suivre pendant tout le déroulement de l'opération de coupage (gabarit « physique », ou programme numérique). Les déplacements d'outil à réaliser sont donc essentiellement de type XY et les déplacements Z ne concernent éventuellement que l'ajustement de la distance verticale outil/pièce.

Lorsque le gabarit de guidage est un dessin de la pièce à réaliser, la machine doit comporter une aire de lecture couvrant une aire de coupage. Elle possède donc des mouvements XY ou à chariots croisés mais sa charpente est en général du type porte-à-faux.

Lorsque le guidage est assuré par programme numérique, la nécessité d'une table de lecture disparaît.

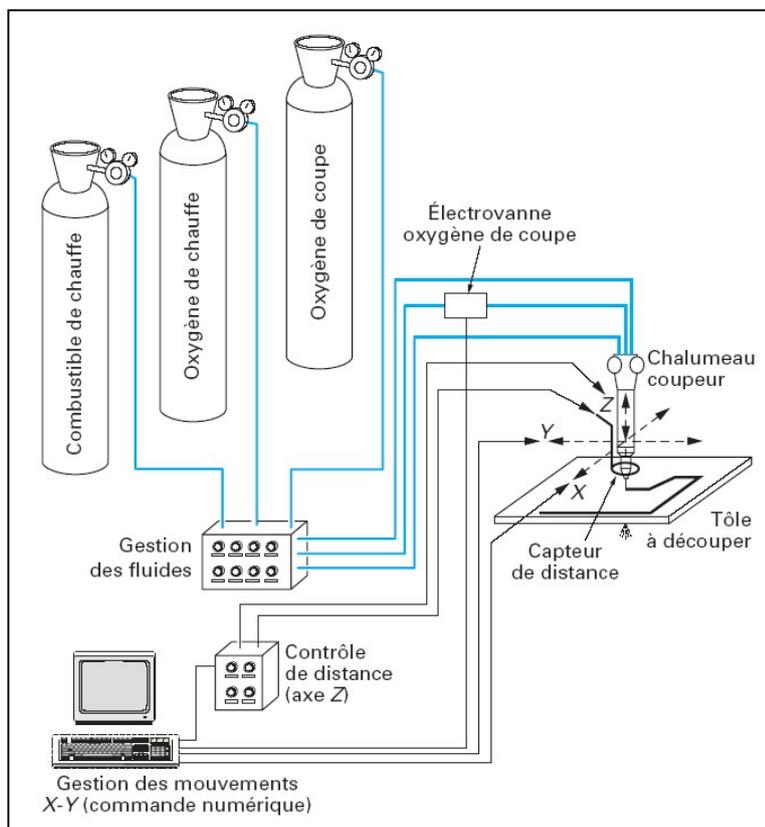


Figure 71 - principe d'une installation oxycoupage



Figure 69 - machine de coupage à gabarit



Figure 70 - machine de coupage à programme numérique

6.1.3.3 Gaz de chauffe

La flamme de chauffe a trois rôles :

- Porter localement le métal à une température suffisante (1300 °C) pour que la réaction fer-oxygène puisse s'initier et ensuite s'entretenir ;
- Assurer la stabilité de la coupe, en particulier sur des tôles calaminées ou grasses ou revêtues ou peintes ;
- Autoriser les meilleurs compromis entre vitesse et qualité de coupe.

Gaz	T _{max} (°C)	Remarque
acétylène C ₂ H ₂	3 170	gaz très performant, mais nécessitant quelques précautions d'emploi
propane C ₃ H ₈	2 840	gaz d'emploi plus sûr, mais de performances plus modestes

Tableau 15 - Les combustibles de l'oxycoupage

6.1.3.4 Matériaux pouvant être coupés par l'oxycoupage

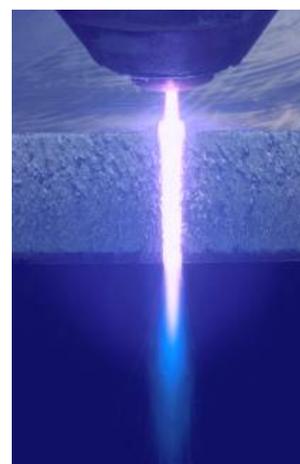
L'oxycoupage permet de couper les aciers non alliés ou faiblement alliés. Les équipements peuvent être simples et légers, même pour couper des épaisseurs importantes (200 à 300 mm).

Pour le coupage des aciers alliés et inoxydables, il existe une variante du procédé qui consiste à injecter de la poudre de fer dans le flux d'oxygène ; celle-ci en brûlant augmente l'apport thermique et produit des oxydes de fer capables de diluer les oxydes de chrome et de nickel particulièrement réfractaires. Cette technique dite d'oxycoupage à la poudre de fer, est employée en sidérurgie, pour des épaisseurs de plus de 50 mm. Elle tend à être remplacée par le coupage au plasma.

6.2. Le coupage plasma :

6.2.1. Principe :

Le PLASMA est un procédé de découpe par fusion localisée dans lequel le jet de gaz ou d'air comprimé chasse le métal porté à une température de fusion. La température générée par l'arc électrique est voisine de 18000°C. Le terme PLASMA est utilisé lorsque la matière gazeuse n'est plus composée d'atomes et de molécules, mais d'ions et d'électrons. Ces derniers apparaissent lors de la scission des molécules



et des atomes. Cet état est atteint lorsque plusieurs conditions

Figure 72 -Le coupage plasma

sont réunies (gaz, pression, température élevée). On nomme PLASMA, le quatrième état de matière.

6.2.2. Fonctionnement du PLASMA :

- a)Création d'un arc électrique: Entre une électrode en tungstène ou en zirconium et la pièce à couper, un arc électrique est créé. L'arc est très localisé.
- b) Ouverture du gaz ou du mélange plasmagène : Grace à une convection forcée au travers d'un orifice de faible diamètre, l'arc et le gaz sont dirigés sur une zone très précise. Le gaz devenu PLASMA dont le débit est suffisant, permet de chasser le métal en fusion.
- c) Découpe: Après l'amorçage et le début de la coupe, il suffira de garder une hauteur constante, manuellement ou automatiquement sur certaines installations (machines de découpes) et de se déplacer pour effectuer la découpe voulue

6.2.3. Gaz plasmagènes :

Les gaz plasmagènes ont pour rôle de faciliter l'amorçage de l'arc électrique et aussi de réduire l'usure des buses et des tuyères.

Le choix du gaz, du mélange gazeux ou éventuellement d'un fluide additionnel (eau en général), utilisé pour la génération du plasma se fait en fonction de la nature des travaux envisagés et, plus particulièrement, de la nature des matériaux à couper ainsi que de leur épaisseur.

- ☉ air comprimé
- ☉ oxygène
- ☉ azote
- ☉ argon/hydrogène (mélange binaire)
- ☉ argon/hydrogène/azote (mélange ternaire)

6.2.4. Différentes torches pour la découpe PLASMA:

Certaines torches PLASMA utilisent aussi en plus d'un vortex de gaz, un vortex d'eau pour concentrer davantage le jet de PLASMA

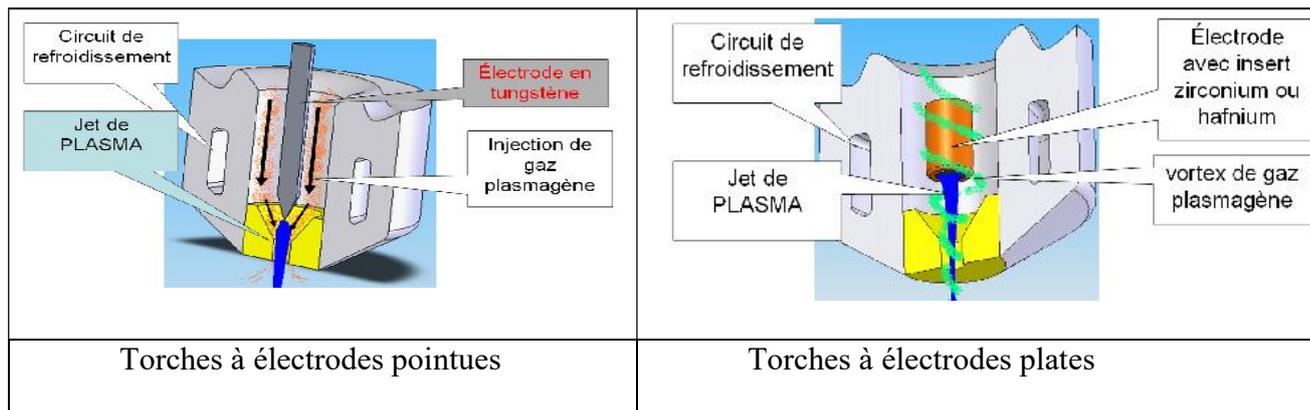


Figure 73 - Les différents torches

6.2.5. Avantages et inconvénients du PLASMA:

Les installations PLASMA ont pour avantage de pouvoir découper des épaisseurs fines et des matériaux inoxydables, à la différence du procédé par oxycoupage. En effet, tous les matériaux conducteurs d'électricité pourront être utilisés par le PLASMA. Concernant les épaisseurs, il y a peu de contraintes de nos jours. Avec ce procédé, il est possible de couper jusqu'à environ 70 mm sur certaines installations. La précision du PLASMA est appréciable. Grâce à la fusion localisée, la déformation est plus faible et permet des précisions de 0,2 mm environ sur des installations récentes.

6.3. Le découpage au jet d'eau

La technologie de découpe du jet d'eau est apparue presque en même temps que la découpe par laser et est complémentaire

à ce dernier : elle permet de découper des matériaux que le laser ne peut découper ou peine à découper:

- les matériaux tendres comme le cuivre
- les matériaux hautement réfléchissants comme l'aluminium et l'inox,
- les matériaux hétérogènes tels que les composites,
- les matériaux craignant la chaleur tels que les produits alimentaires, le cuir, le textile... ,
- les grosses épaisseurs de quelques centimètres
- ou encore des matériaux divers tels que le verre...

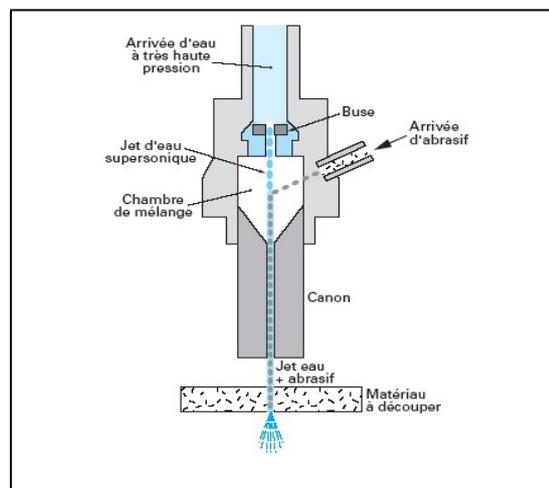


Figure 74 - Jet d'eau

6.3.1. Principe de la découpe par jet d'eau

La découpe par jet d'eau utilise l'énergie cinétique de particules d'eau (le plus souvent chargée de particules abrasives) projetées à grande vitesse environ **800 à 1000 m/s** sur le matériau à découper. Dans ce but, on applique une pression **d'environ 3800 bars** avec un débit d'eau allant de **0,5 à 10 litres/minute**. La découpe est ainsi réalisée par arrachement de matière. La puissance du jet d'eau peut être encore amplifiée en y ajoutant des abrasifs, des polymères ou le mélange des deux. En effet, les polymères empêchent la diffusion du jet en permettant de conserver l'énergie cinétique du jet et d'améliorer la découpe pour des épaisseurs plus importantes. Ils permettent également de le rendre unidirectionnel et ce pour un travail plus rapide, de meilleure qualité, de plus grande précision. L'un des polymères les plus utilisés est le "Super-Water" à base de polyacrylamide.

6.3.2. Application du découpage par jet d'eau

L'utilisation du jet d'eau haute pression pure ou chargée d'abrasifs peut être employée sur une large gamme de matériaux métalliques ou non-métalliques...

Les technologies par jet d'eau permettent de découper de nombreux matériaux hétérogènes et homogènes (verre, textile, cuir, céramique, métal, papier, composites, plastiques, nid d'abeille, pierre, carton...) et l'utilisation en milieu très contrôlé (agro-alimentaire). De plus, elle permet une découpe à froid ce qui la positionne fortement sur des marchés tels que l'électronique, le nucléaire.

6.3.3. Installation d'un poste de découpe par jet d'eau

- Groupe de pompage raccordé au réseau de distribution d'eau potable (filtrage, adoucissement)
- Table de découpe XY de taille variable équipée d'un ou plusieurs têtes de découpe
- Baie de commande informatique (CAO-CFAO)

6.3.4. Caractéristiques de la découpe par jet d'eau

- Universalité des applications
- Pas de contact direct machine/matière
- Travail à froid, sans altération des propriétés mécaniques
- Découpe de matériaux épais et hétérogènes
- Formes illimitées et précises (+/- 0,1 mm)
- Pas d'émanation toxique

Le concept de ce procédé est de provoquer la rupture de la matière au point d'impact d'un jet d'eau très fin et de très haute énergie. Le déplacement de ce jet d'eau permet d'obtenir un trait de coupe.

Cet outil de production est particulièrement bien approprié aux petites séries ainsi qu'à la réalisation de modèles sans cesse différents avec des matériaux de toute nature jusqu'à des épaisseurs importantes.

Les fluides utilisés pour la découpe sont variés et le choix dépend de la nature du matériau à découper, il existe :

- ❖ Jet d'eau pure : Ce procédé de base permet la découpe de tous les matériaux de faible résistance mécanique (caoutchouc (<10cm), matériaux plastiques, composites, mousses, bois....)
- ❖ Jet d'eau avec abrasif : L'adjonction d'abrasif dans ce procédé permet le transfert de l'énergie cinétique de l'eau vers des particules d'abrasif qui effectuent le travail de coupe (titane (<5cm), acier, acier inoxydable, aluminium, cuivre, pierre, marbre, céramique...)

6.3.5. Techniques mises en œuvre

Une machine de découpe par jet d'eau peut être utilisée pour découper toute sorte de matériaux, à condition de choisir la tête de découpe adéquate, de régler les paramètres du jet, de définir les commandes numériques nécessaires et d'y adjoindre pour les matériaux durs des abrasifs, des polymères ou les deux.

✓ Inconvénients de ce procédé

- La découpe par jet d'eau pose des problèmes de nuisances sonores (régies par différentes normes AFNOR).
- Ne coupe pas les corps creux dans de bonnes conditions (dépouille importante).
- Précision dimensionnelle inférieure aux autres procédés ($> \pm 0,2$).
- Mouillage des pièces.
- Difficultés pour le perçage des pièces (exemple : délaminage possible des stratifiés demande un perçage préalable).
- Vitesse de découpage inférieure au Laser.
- Usure assez rapide des buses et des canons.
- Traitement des boues (matière coupée).
- Protection de la machine (glissières et roulements).
- Ne coupe pas les métaux.

6.4. Le découpage Laser

6.4.1. Définition :

laser : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplification de la lumière par émission stimulée de radiation).

- Le découpage au laser est un procédé d'obtention de pièces par découpage par action thermique avec fusion au laser.
- Les lasers industriels peuvent se répartir en deux sortes:
 - ☉ Les lasers à solide de type Yag Nd
 - ☉ Les lasers moléculaires CO₂.



Figure 75 - Le découpage laser

6.4.2. Principe de coupage laser

Il met en œuvre une énergie de rayonnement par émission photonique, sous forme d'un faisceau concentré de lumière cohérente et monochromatique, c'est-à-dire d'une seule longueur d'onde. Le laser CO₂, couramment utilisé en découpe, a une longueur d'onde de **10,6 μm**. L'absorption de cette énergie par la pièce à l'impact du faisceau, focalisé par lentille ou miroir (en général la dimension de la tache focale est inférieure à 0,2 mm² et la densité de puissance en ce point est de 1 000 à 6 000 kW/cm²), provoque une fusion/vaporisation du matériau, les fumées et éléments liquéfiés étant expulsés de la saignée par l'effet cinétique d'un jet de gaz de vitesse élevée, injecté dans l'axe du faisceau au travers d'une buse de faible diamètre (0,7 à 2 mm).

La tête de coupage, communément appelée tête de focalisation, est alimentée par une source laser ainsi que par une source de gaz d'assistance.

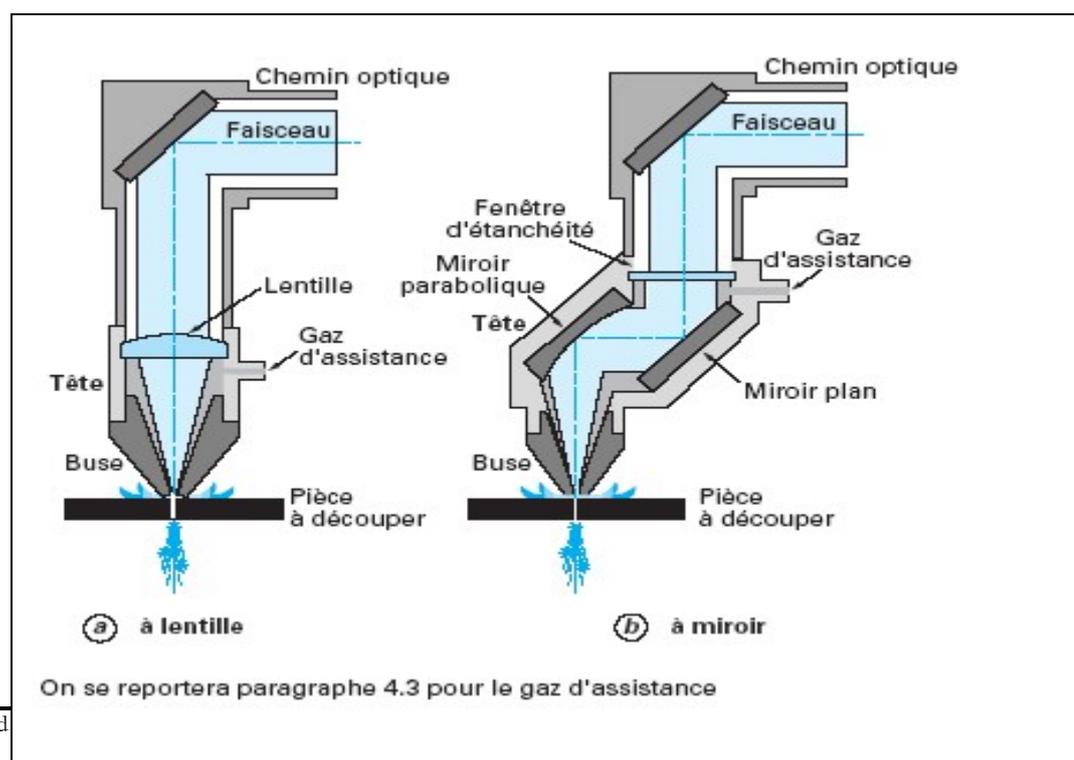


Figure 76 -principe de focalisation laser

6.4.3. Les avantages du procédé :

- Grande vitesse de découpe : 5 m/min pour tôle acier ép. 3 mm
- Précision dimensionnelle.
- Économie de matière par largeur de saignée réduite.
- Zone affectée thermiquement (ZAT) de faible largeur, de 0,5 à 0,6 mm pour une tôle d'acier (4 fois plus en plasma).
- Formes découpées non limitées.
- Pas d'effort de coupe sur la pièce (pas de contact).
- Pas d'usure d'outil.

6.4.4. Les inconvénients :

- Certaines matières ne pourront être découpées en raison de la réflexion (cuivre et alu par exemple) ou en raison de leur transparence (verre).
- Gaz toxiques dégagés durant le coupage des matières synthétiques (aspiration et filtrage nécessaire).
- Ne coupe pas les corps creux ou multicouches.
- Danger dû au Laser (protection des opérateurs).

6.5. Comparaison des différents procédés de découpage

6.5.1. Apparition des procédés

La figure suivante regroupe les principales étapes du développement de chaque procédé, soit :

- A : découverte du principe de base ;
- B : première ébauche technologique, maquette de laboratoire ;
- C : premier appareil à vocation réellement industrielle ;
- D : démarrage des applications dans l'industrie ;
- E : période de croissance technique du procédé et recherche des conditions opératoires optimales ;
- F : maturité à peu près complète en milieu industriel.

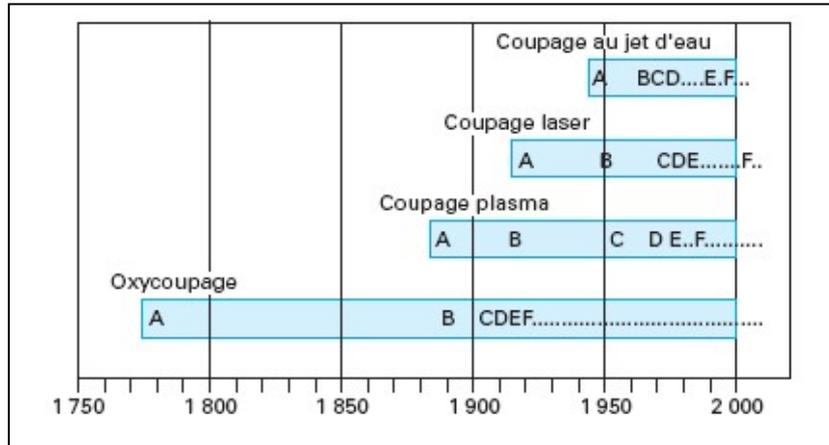


Figure 77 - : les principales étapes du développement des procédés

6.5.2. Epaisseurs découpées

Le tableau suivant précise les valeurs limites d'épaisseur en fonction des matériaux possibles pour chaque procédé :

Oxicoupage	Coupage plasma	Coupage laser CO2	Coupage au jet d'eau
3 à 600 mm 600 < e < 2 000 mm possible mais très rare Aciers non alliés ou faiblement alliés Aciers non alliés ou faiblement alliés exclusivement	0,4 à 50 mm Aciers non alliés ou faiblement alliés	0,4 à 25 mm Aciers non alliés ou faiblement alliés	2 à 100 mm Aciers non alliés ou faiblement alliés
	0,4 à 150 mm Aciers inoxydables	0,4 à 15 mm Aciers inoxydables	2 à 100 mm Aciers inoxydables
	0,4 à 200 mm Alliages d'aluminium	0,4 à 5 mm Alliages d'aluminium	2 à 100 mm Alliages d'aluminium

Tableau 16 - Valeurs limites d'épaisseur, pour les principaux matériaux métalliques, pour chaque procédé

Bibliographie

- [1] **Découpage-Emboutissage-Pliage - Fiches techniques**, CETIM
- [2] **Cours mise en forme des métaux**, AMIR BEB RHOUMA
- [3] **Précis de fabrication**,
- [4] **Production 2** , GOZLAN MAHDIA , BADEREDDIN SAIDI, HAMROUNI LOTFI

Webographie

<https://www.scribd.com/document/352146569/1-Cours-plier-Emboutissage-pdf>
<https://www.decitre.fr > ... > Bâtiment > Technologies industrielles>
<http://tspeed.free.fr/formroulage.htm>
<https://fullmetaltechno.wordpress.com/2012/08/13/plier-de-toles-vision-des-differents-procedes/>