

# Formage à la presse

par **René MARTIN**

*Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Mécanique de Nantes  
Ancien Chef du Service Mise en forme des matériaux  
au Centre Technique des Industries Mécaniques  
Directeur Technique Adjoint des Forges Barriol et Dallière*

<b>1. Présentation générale.....</b>	<b>B 7 510 - 2</b>
1.1 Définitions .....	— 2
1.2 Caractéristiques du procédé.....	— 2
1.3 Matériaux .....	— 5
<b>2. Techniques de formage .....</b>	<b>— 6</b>
2.1 Emboutissage .....	— 6
2.2 Pliage .....	— 6
<b>3. Outillage .....</b>	<b>— 9</b>
3.1 Caractéristiques générales.....	— 9
3.2 Conception des outillages.....	— 9
3.3 Spécifications fonctionnelles.....	— 9
3.4 Matériaux .....	— 10
3.5 Standardisation.....	— 12
3.6 Fabrication des outillages .....	— 12
<b>4. Méthodes de fabrication .....</b>	<b>— 12</b>
4.1 Gamme de fabrication.....	— 12
4.2 Lubrification .....	— 20
4.3 Contrôle qualité .....	— 22
4.4 Manutention.....	— 22
<b>Formulaire .....</b>	<b>Form. B 7 511</b>
<b>Pour en savoir plus.....</b>	<b>Doc. B 7 512</b>

**E**n fonction de la géométrie et des caractéristiques recherchées sur une pièce, ainsi que de l'importance des séries à produire, il faut, pour assurer une fabrication, réussir la conjonction de trois ensembles de facteurs, liés respectivement à la **Presse**, au **Métal** travaillé et à l'**Outillage**. Nous présentons dans cet article, avec de nombreux exemples, les différents paramètres qui conditionnent la mise au point d'une fabrication : **choix de la technique, conception des outillages, méthode de fabrication**.

Pour faciliter une exploitation pratique de ce texte, nous avons regroupé dans la fiche formulaire [Form. B 7 511] des données technologiques présentées sous forme de tableaux et d'abaques.

La production de pièces par heure sera notée tout au long de l'article p/h. On rappelle que :  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$  ou  $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2 = 0,1 \text{ hbar} = 0,102 \text{ kgf/cm}^2$ .

Notations et symboles	
Symbole	Définition
$A$	allongement à la rupture
$A_r$	allongement réparti (allongement de la tôle, obtenu lorsque l'effort de traction passe par sa valeur maximale)
$d$	diamètre du poinçon
$d_n$	diamètre du poinçon à la $n^{\text{e}}$ passe
$D$	diamètre du flan
$e$	épaisseur de la tôle
$e_0$	épaisseur du flan à l'état initial
$e_f$	épaisseur du flan à l'état final
$E$	module d'élasticité du matériau
$E_E$	énergie d'emboutissage
$F_{p,\ell}$	efforts verticaux exercés par le poinçon lors du pliage
$F_E$	force d'emboutissage
$F_R$	force maximale admissible par la pièce en cours d'emboutissage
$F_{SF}$	effort appliqué sur le serre-flan
$h$	hauteur de l'embouti
$J$	jeu = $(t - e_0)/t$
$m$	coefficient de réduction ( $m = 1/\beta = d/D$ )
$n$	coefficient d'écrouissage
$p$	pression
$q$	rapport d'emboutissage des coins
$Q_{p,\ell}$	efforts latéraux exercés sur le poinçon lors du pliage
$r$	coefficient d'anisotropie
$r_m$	rayon de matrice
$r_p$	rayon du poinçon
$R_D$	rayon de la pièce (forme finale)
$R_e$	limite d'élasticité du métal
$R_o$	rayon de l'outil
$R_r$	résistance à la rupture du métal
$s_n$	section du poinçon à la $n^{\text{e}}$ passe
$S$	surface du flan
$t$	espace libre entre poinçon et matrice
$W$	longueur pliée
$\beta$	rapport d'emboutissage ( $\beta = D/d$ )
$\xi_r$	taux de réduction ( $e_f < e_0$ ) = $(e_0 - e_f)/e_0$

# 1. Présentation générale

## 1.1 Définitions

L'emboutissage est un procédé de formage par déformation plastique à *chaud* ou à *froid* des métaux. Il transforme une feuille de métal appelée **flan** en une surface généralement non développable (carters par exemple). Le cas particulier, plus simple, du pliage délivre des pièces développables.

L'opération d'emboutissage est effectuée sur une **presse** au moyen d'un outillage dont la configuration la plus simple, appelée outil **simple effet** (figure 1a) comprend deux pièces principales : la **matrice** et le **poinçon**. L'une est bridée sur la **table** fixe, l'autre sur le **coulisseau** animé d'un mouvement rectiligne alternatif. L'outillage **double effet** comprend en plus un **serre-flan** qui assure le contrôle

de l'écoulement du métal pour prévenir la formation de plis sur la pièce finie (figure 1b).

Le formage à la main de pièces non développables en tôle mince, également appelé emboutissage, a pratiquement disparu du secteur industriel.

L'emboutissage impose à la tôle divers modes de déformation, les deux cas limites rencontrés dans la pratique étant l'**expansion** et le **rétreint** [1].

La visualisation des déformations subies en surface par une tôle pour réaliser un embouti peut être obtenue par le marquage de réseaux de cercles sur le flan figure 2a. Ceux-ci, après emboutissage de la tôle, deviennent généralement des ellipses. Les caractéristiques de ces ellipses (petit et grand diamètres) permettent de définir avec précision les modes de déformation rencontrés au cours d'une opération de formage (figures 2b et c ; article *Aptitude à l'emboutissage des tôles minces* [B 7 530]). L'application pratique de la méthode des réseaux de cercles permet, en relation avec la *courbe limite de formage* du métal travaillé, d'orienter et de faciliter la mise au point d'un embouti (§ 3.6.2).

Pratiquement, l'emboutissage par expansion (figure 3a) a lieu lorsque le flan est bloqué ; toute la déformation résulte d'une sollicitation de traction-traction et intervient sous le poinçon quelle que soit sa forme. Elle se caractérise par un amincissement de la tôle ( $e_f < e_0$ , soit  $\varepsilon_3 < 0$ ).

L'emboutissage par rétreint ou *emboutissage profond* (figure 3b) a lieu lorsque le flan est libre de glisser sous le serre-flan.

La déformation commence sous serre-flan en compression-traction et se poursuit dans l'entrée de matrice en traction.

Le rétreint conduit généralement à un épaissement des parois de la pièce ( $e_f > e_0$ , soit  $\varepsilon_3 > 0$ ).

L'existence d'une sollicitation de compression-traction dans toute la partie du flan sous serre-flan entraîne le risque de formation de plis préjudiciables soit au bon déroulement de l'opération (rupture de l'embouti), soit à l'aspect final de la pièce (plis écrasés appelés *frisures*), d'où l'utilisation d'un serre-flan qui applique la tôle sur la matrice, l'obligeant à conserver sa planéité (traction-compression-compression).

La rupture d'une pièce en cours d'emboutissage se produit généralement dans les zones de déformation en expansion (rayon de poinçon dans les emboutis profonds).

Le **pliage**, le **cambrage**, qui engendrent des pièces développables (§ 2.2), le **soyage** font appel à des modes de déformation voisins de la traction large ( $\ell_2 \approx \ell_0$ , soit  $\varepsilon_1 > 0$ ,  $\varepsilon_2 = 0$ ). Le **découpage** (préparation du flan), le **détourage** (enlèvement du métal en excès), le **poinçonnage** (exécution de trous, préparation de soyages) sont des opérations également effectuées à la presse et, en tant que telles, sont incluses dans la gamme de fabrication d'une pièce emboutie.

Une pièce est rarement obtenue avec un seul outillage, elle nécessite plusieurs opérations. On appelle **opération** toute phase de la gamme de fabrication et **passe** toute phase d'emboutissage proprement dit.

**Nota** : un important effort tant au niveau national qu'international a été fait pour uniformiser le langage de la profession Découpage et Emboutissage [2].

## 1.2 Caractéristiques du procédé

### 1.2.1 Productivité

L'emboutissage est un procédé de production rapide, les opérations peuvent s'effectuer à des cadences maximales de l'ordre de 20 000 p/h (pièces/heure) pour les petites pièces peu compliquées petits emboutis (industrie téléphonique) à 500 p/h pour les grandes pièces (industrie automobile). Les cadences sont plus élevées en

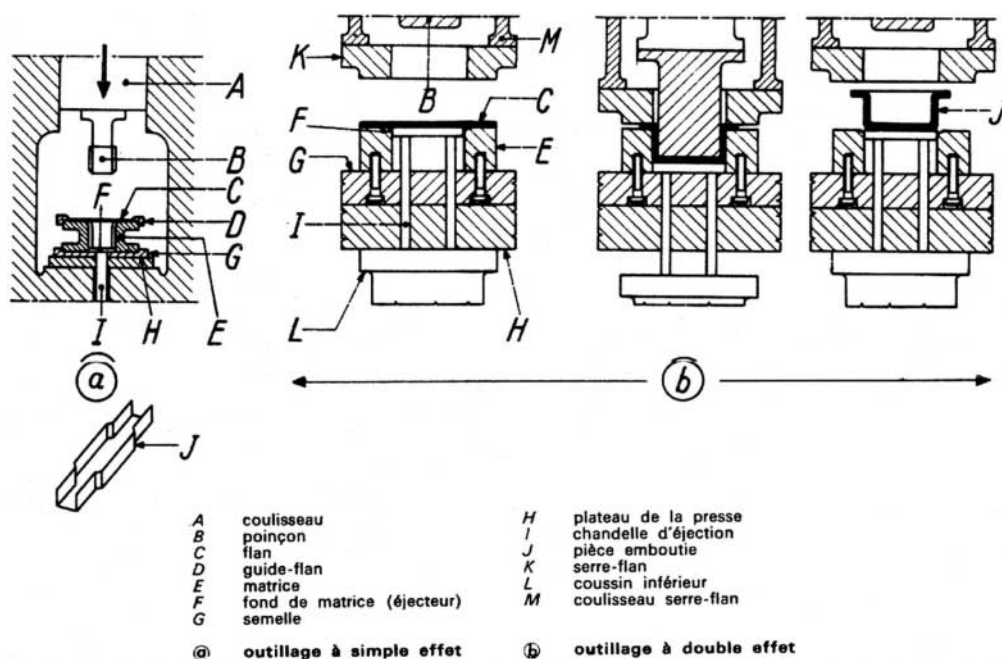


Figure 1 – Outils d'emboutissage

travail à la **volée** (la presse alimentée automatiquement ne s'arrête pas) qu'en travail de **reprise** (la presse marche au **coup par coup**, un opérateur assure son alimentation et le départ du cycle de travail).

**Exemple** : un boîtier rectangulaire 130 × 150 × 100 mm en tôle XES de 0,8 mm sera fabriqué à une cadence de 400 p/h à la volée (presse transfert) et de 200 p/h au coup par coup.

Des cadences très supérieures sont possibles en découpage, elles peuvent atteindre 72 000 p/h et de nombreux ateliers travaillent à des cadences de 30 000-36 000 p/h. Ces types de fabrication sont traités dans l'article *Découpage. Poinçonnage* [B 7 561].

## 1.2.2 Caractéristiques des pièces et limites d'application

Les caractéristiques à prendre en compte sont principalement les formes, les tolérances dimensionnelles, les états de surface, l'aspect et la résistance mécanique des pièces.

### 1.2.2.1 Formes

Les capacités et dimensions des presses permettent l'exécution de grandes pièces, telles que baignoires, pavillons de véhicules utilitaires, etc. Les limitations sont en fait d'ordre économique, la gamme de fabrication de la pièce doit limiter au maximum le nombre d'opérations et éviter, autant que possible, des recuits intermédiaires (restauration du métal) (§ 4.1.6).

La définition d'une pièce emboutie doit se limiter aux cotes et aux formes fonctionnelles, laissant au préparateur la latitude d'élaborer la gamme de fabrication la plus économique : par exemple éviter les rayons de raccordement trop petits ( $r \leq 2e$ ) et non fonctionnels, qui imposent une opération supplémentaire de conformation.

### 1.2.2.2 Tolérances

La précision des pièces est liée d'abord aux tolérances fonctionnelles de l'outillage et à un effet de retour élastique après formage, qui est d'autant plus important que la limite élastique du matériau est elle-même élevée (cas des aciers inoxydables par rapport aux aciers doux) ; cela résulte de la présence de contraintes résiduelles après formage [3].

Il se manifeste sur les pièces pliées – angle plié supérieur à l'angle du poinçon (par exemple  $92^\circ$  pour  $90^\circ$ ) –, sur les pièces cylindriques –  $\varnothing$  intérieur de la pièce, supérieur au  $\varnothing$  du poinçon –, sur les pièces de grandes dimensions, peu déformées – gauchissement ou ouverture –, Des artifices de fabrication tels que frappe de rayons ou étirage qui interviennent en fin de gamme parviennent à atténuer ce phénomène. On obtient ainsi des tolérances pouvant aller du mm sur les grandes pièces à 0,02 mm sur les petites pièces.

**Exemple** : un embouti cylindrique en acier doux de diamètre extérieur 50 mm peut être obtenu à  $\pm 0,02$  mm.

Cependant la grande majorité des pièces embouties ne nécessite pas de précision élevée (poulies, enceintes, organes de protection) et les tolérances peuvent se situer d'une façon générale autour de J 13.

### 1.2.2.3 États de surface. Aspect des pièces finies

L'emboutissage par expansion altère peu l'état de surface, les pièces peuvent être traitées sur les chaînes de finition sans préparation préalable comme dans la carrosserie automobile où, suivant les constructeurs, les cahiers des charges imposent un indice de rugosité  $R_a$  compris entre 0,6 à 1,2 pour Renault et 1,2 à 2,0 pour Citroën. Ces écarts révèlent pratiquement que les valeurs de rugosité normalisées ne sont pas suffisamment significatives au sens *emboutissabilité* des tôles. La grosseur du grain ne doit pas être inférieure à 5 (ASTM-AFNOR) car, au-delà, il y a risque d'apparition

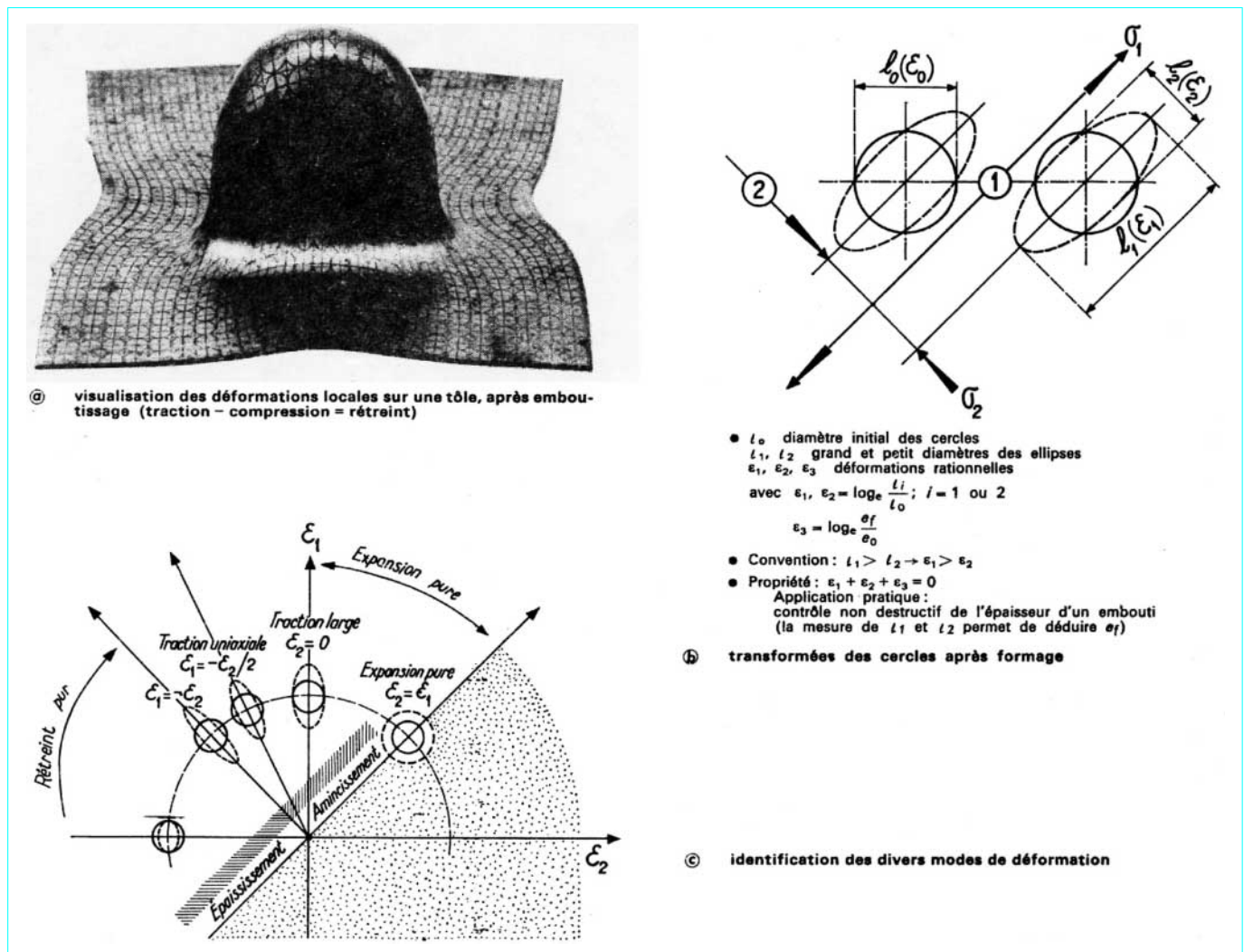


Figure 2 – Déformations subies en surface par une tôle, en cours d'emboutissage

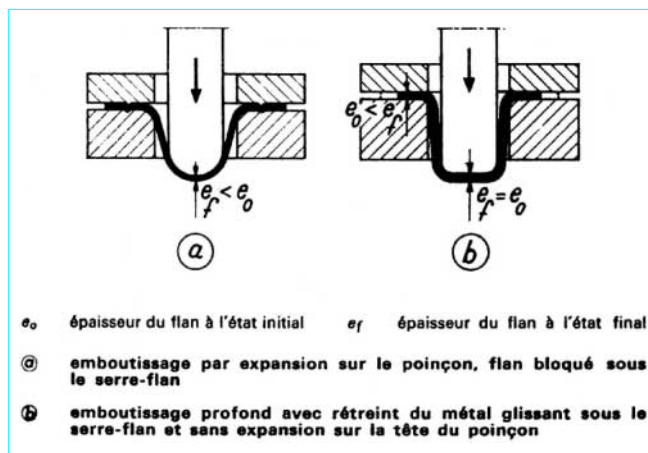


Figure 3 – Principaux modes de déformation par emboutissage

d'un état de surface comparable à celui d'une **peau d'orange** (§ 1.3.3). De plus, les pièces peu déformées (déformations comprises entre 4 et 8 %), lorsqu'elles sont issues de tôles vieilles (aciers non calmés), présentent des vermiculures (lignes de Piobert-Lüders) (articles *Ecouissage d'alliages d'Aluminium* [M 230] et *Métallurgie des tôles laminées sur trains continus* [M 3 060] du traité Matériaux métalliques). L'élimination de ces deux défauts ne peut être assurée que par un polissage long et coûteux. L'industrie automobile, par exemple, veille particulièrement à approvisionner pour les pièces dites d'aspect (carrosserie) des tôles dont le grain est compris entre 5 et 7, calmées à l'aluminium, qualité emboutissage profond, et exemptes de tout défaut d'aspect dû au laminage (tôles qualités ZES suivant AFNOR A 36-401). Cependant, des pièces telles que les paraboles de phares subissent impérativement un polissage avant aluminisation mais, afin de diminuer l'incidence de cette opération sur le prix de la pièce, on impose aux tôles des caractéristiques identiques à celles des tôles de carrosserie.

Dans l'opération d'emboutissage en rétreint, c'est surtout le frottement important sous serre-flan et au rayon de matrice qui provoque le **grippage** avec arrachement de particules métalliques sur la pièce. Les aciers inoxydables, utilisés surtout pour des pièces de présentation (ustensiles ménagers), sont très sensibles à ce phénomène. Pour combattre le grippage, il faut agir :

- soit sur la technique de formage (poinçon en matériau élastique, hydroformage, etc.) ;
- soit sur les matériaux constitutifs de l'outillage (§ 3.4) ;
- soit sur les lubrifiants (qualité extrême pression, § 4.2).

En ce qui concerne les aciers doux, l'emploi de tôles avec un état de surface spécifique leur confère une bonne résistance au grippage (produit commercialisé en France depuis 1974) [30].

#### 1.2.2.4 Résistance des pièces

Une pièce emboutie est légère du fait de l'épaisseur relativement faible des tôles ( $e \leq 2$  mm le plus souvent) ; sa rigidité est généralement renforcée par l'écrouissage qu'elle a subi et par l'exécution de nervurages si nécessaire. La résistance peut être augmentée par l'utilisation des tôles d'acier haute résistance à dispersoïdes [4] (addition de V, Nb, T, Be en faible quantité : 0,01 à 0,2 %).

Les pièces embouties sont généralement exemptes de défauts initiateurs de rupture tels que dédoublement, inclusions, et gros grains (§ 1.3.3). En effet, la sévérité de l'emboutissage, si elle est extrême, conduit à la rupture en cours de formage et assure ainsi un auto-contrôle.

Pour les pièces obtenues avec les tôles d'acier laminé à froid qualité Emboutissage (E et ES : AFNOR A 36-401) il ne semble pas que l'on ait à craindre de risques de fragilisation résultant de l'écrouissage.

**Exemple** : un embouti profond en tôle qualité XES conserve une température de transition supérieure à  $-30$  °C ( $KCV \geq 3,5$  daJ/cm<sup>2</sup>).

## 1.3 Matériaux

L'emboutissage fait appel aux **propriétés plastiques** des matériaux. La **ductilité**, caractéristique principale des métaux à former à froid, diminue quand la déformation augmente, le matériau **s'écrouit**. Elle augmente avec la température (emboutissage à chaud). L'acier doux (0,20 % C max) est de loin le plus largement utilisé, suivi par les aciers inoxydables, l'aluminium, le laiton et le cuivre ; ils s'emboutissent à froid dans les épaisseurs courantes ( $e \leq 6$  mm). Les métaux moins ductiles : Mg, alliages à haute résistance (TA 6 V), Zn, etc., s'emboutissent à chaud.

### 1.3.1 Caractéristiques conventionnelles

La ductilité n'est pas une caractéristique directement mesurable, elle résulte des propriétés mécaniques telles que : limite élastique  $R_e$ , charge de rupture  $R_r$ , allongement réparti  $A_r$ , allongement à la rupture  $A$ , qui sont déterminés par l'essai de traction. La mesure de la dureté par essais Rockwell B' (aciers) et Vickers (autres alliages) donne une information de la résistance du métal.

Pour corréler ces caractéristiques à la formabilité on a tenté de les introduire dans des expressions telles que :  $R_e/R_r$ ,  $(R_r - R_e)$ ,  $(R_r - R_e)/A$ ,  $R_e A$  qui varient dans le même sens que l'aptitude au formage des matériaux. Ces trois valeurs n'étant pas indépendantes et l'essai de traction n'étant qu'un mode de sollicitation bien précis, ces caractéristiques ne peuvent pas, en fait, rendre compte précisément de la formabilité des tôles.

Les valeurs numériques propres à chaque matériau et leur méthode de détermination font l'objet de normes spécifiques aux métaux en feuilles (article *Métallurgie des tôles laminées sur trains continus* [M 3 060] du traité Matériaux métalliques).

L'acier extra doux (0,10 % C)  $R_e/R_r = 0,65$ ,  $A \geq 38$  %,  $HRB' \leq 50$  est plus apte à l'emboutissage qu'un acier demi-dur (0,45 % carbone)  $R_e/R_r = 0,7$ ,  $A \geq 22$  %,  $HRB' \leq 80$ .

**Nota** : HRB' pour les tôles d'épaisseur comprise entre 0,5 et 3 mm (NF A 03170).

### 1.3.2 Caractéristiques rationnelles

Bien que déterminées par l'essai de traction, ces caractéristiques [5] [6] rendent mieux compte de l'aptitude au formage des matériaux car elles traduisent deux importantes propriétés plastiques des métaux (article *Aptitude à l'emboutissage des tôles minces* [B 7 530]).

#### 1.3.2.1 Coefficient d'écrouissage $n$

Déterminé à partir de la relation  $\sigma = k\epsilon^n$ , il traduit la propriété du matériau à répartir les déformations sur toute la surface du flan, donc à subir la déformation en expansion ; elle est d'autant plus grande que  $n$  est élevé (laiton UZ 33 :  $n \approx 0,50$  – tôle d'acier doux :  $n \approx 0,200$ ). Cette grandeur est surtout significative pour les aciers doux.

#### 1.3.2.2 Coefficient d'anisotropie $r$

Il est défini par le rapport des déformations en épaisseur et en largeur d'une éprouvette de traction après sollicitation :  $r = \epsilon_2/\epsilon_3$ . Il permet de juger de l'aptitude de la tôle à s'opposer à l'amincissement. Plus  $r$  est élevé, plus le métal sera susceptible de subir l'emboutissage profond :

acier doux :  $1,0 \leq r \leq 1,7$  ;

acier inoxydable austénitique :  $r \approx 0,90$ .

Ces coefficients ne sont pas normalisés, on trouvera dans l'article déjà mentionné des exemples illustrant leur intérêt pratique.

### 1.3.3 Structure métallographique

**Nota** : on se reportera à article *Métallographie* [M 90] du traité Matériaux métalliques.

#### ■ Grosseur et forme du grain

Le grain doit être équiaxe et sa grosseur ne doit pas être inférieure à 5 (AFNOR NF A 04-102) sous peine d'apparition de la peau d'orange.

#### ■ Inclusions

Elles sont composées d'oxydes, de silicates, etc. contenus dans le laitier au cours de l'élaboration. Elles constituent des solutions de continuité au sein de la tôle, entraînant la rupture en cours de formage (rupture en *bois pourri*, lignes pailleuses, etc.).

#### ■ Dédoublures

Elles proviennent au niveau lingot d'un chutage insuffisant de la retassure dont les parois oxydées n'ont pu se souder hors du laminage. Elles ont les mêmes effets que les inclusions.

Inclusions et dédoublures s'étendent parfois sur plusieurs dizaines de mètres, rendant la tôle impropre à l'emboutissage.

### 1.3.4 Essais d'emboutissabilité

Il existe principalement 2 types d'essais simulatifs destinés à qualifier les métaux d'emboutissage (article *Aptitude à l'emboutissage des tôles minces* [B 7 530]) :

— essai d'emboutissage à flan bloqué (essai Erichsen) : NF A 03-652. Il traduit, par l'indice  $IE$ , l'aptitude d'un métal à travailler en expansion. Tôle qualité ES :  $10 < IE < 12,5$  mm ;

— essai Swift : (non normalisé) il caractérise, par la valeur limite du rapport  $\varnothing$  flan/ $\varnothing$  poinçon (LDR), l'aptitude d'un métal à se déformer en rétreint. Tôle qualité ES :  $2 < LDR < 2,3$ .

L'existence de quantité d'autres essais montre que les essais simulatifs ne peuvent prétendre définir précisément l'aptitude au formage des tôles minces. Le seul essai normalisé en France, l'essai à flan bloqué, doit être tout au plus, dans beaucoup de cas, considéré uniquement comme un contrôle qualité de la tôle.

## 2. Techniques de formage

### 2.1 Emboutissage

Suivant les caractéristiques mécaniques (conventionnelles et rationnelles) et l'épaisseur des tôles à travailler, on utilise deux techniques : l'**emboutissage à froid** et l'**emboutissage à chaud**.

#### 2.1.1 Emboutissage à froid

L'emboutissage à froid 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 simple effet** équipées d'un **coussin** élastique situé sous la table de la presse. Dans les autres cas, on utilise 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 d'éjecteurs (figure 1b) soit par *passage au travers* (la pièce traverse la matrice pour être récupérée par dessous).

L'**emboutissage triple effet** (figure 4) consiste à réaliser un **contre-embouti** à l'aide du poinçon inférieur, guidé dans le fond de la matrice, tout ou partie du poinçon supérieur fait office de matrice. Cette disposition permet de supprimer une opération de reprise. L'emboutissage à froid emploie généralement des tôles d'épaisseur inférieure à 4 mm. Il est possible à froid d'emboutir des tôles atteignant environ 7 mm d'épaisseur.

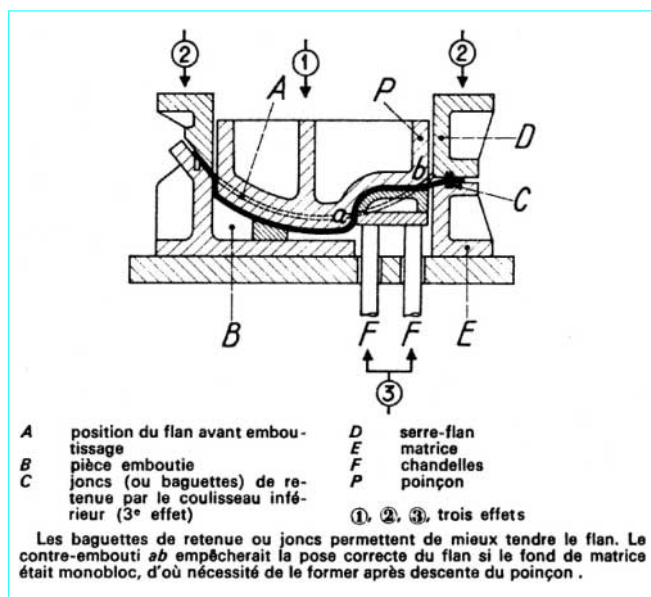


Figure 4 – Outillage à triple effet

#### 2.1.2 Emboutissage à chaud

Il est réalisé exclusivement sur presses hydrauliques.

##### 2.1.2.1 Aciers

L'emboutissage à chaud est réservé aux matériaux peu ductiles (E 24 - A 52) et aux tôles fortes dont le formage nécessite d'importants efforts (épaisseur supérieure à 7,0 mm pour l'acier).

**Exemple** : un fond de réservoir en acier de 5 mm d'épaisseur et de  $\varnothing 1\,250$  mm, embouti à chaud sur une presse de 9 000 kN, nécessite, à froid, une presse de 20 000 kN (2 000 tf).

L'emboutissage à chaud est à simple ou double effet, les cadences de production sont inférieures à celles de l'emboutissage à froid.

La fabrication de fonds standards de réservoirs en acier A 52 ou similaire reste le plus important domaine d'application.

La manutention, très automatisée, permet de fabriquer des fonds de  $\varnothing 1\,900$  mm, épaisseur 5 mm, à raison de 50 p/h avec des précisions de  $\pm 0,3\%$  sur le développement. L'aspect des pièces finies est moins bon que celui des produits formés à froid.

Lorsque la pièce doit répondre à des conditions de sécurité (appareils à pression), elle doit présenter après formage les caractéristiques minimales imposées par le traitement thermique de normalisation du produit utilisé. Cette condition peut être remplie soit par un contrôle des températures en cours de formage ( $t_{\text{pièce}} \geq 700\text{ °C}$  par exemple), soit par un traitement de normalisation après emboutissage.

Des essais ont montré que l'emboutissage à chaud d'acier inoxydable en tôle mince apporte un important accroissement des capacités de formabilité [7].

##### 2.1.2.2 Autres matériaux

###### 2.1.2.2.1 Aluminium et alliages

L'élévation de température est un facteur favorable dont l'effet va croissant jusqu'à 450-490 °C, pour autant que la température du poinçon n'excède pas 50 °C. Les alliages à durcissement structural (A-U4G1) peuvent être emboutis à ces températures et refroidis rapidement, ce qui permet d'éliminer une opération de trempe.

###### 2.1.2.2.2 Titane

Les nuances alliées TA 6 V ou TA 5 E, peu ductiles, nécessitent une chauffe entre 300 et 500 °C.

###### 2.1.2.2.3 Alliages réfractaires

Ils peuvent être emboutis à chaud mais, pour les mêmes raisons qu'en forgeage, la fourchette de température est étroite.

###### 2.1.2.2.4 Magnésium

S'emboutit à chaud entre 200 et 350 °C.

## 2.2 Pliage

### 2.2.1 Généralités

Technique très répandue, elle intéresse aussi bien les pièces de grandes dimensions (longerons de camions en acier E 24, épaisseur 5 mm, longueur 6 m, presse de 30 000 kN) que les petites pièces de l'industrie électromécanique (pattes de fixation laiton UZ 33, épaisseur 1 mm, sur outils à suite 120 coups/min, presse 500 kN).

Dans l'épaisseur de la tôle, la face du flan en contact avec le poinçon travaille en compression, la face opposée en traction. De ce fait le critère qualité d'un matériau se ramène à un **rayon de pliage minimal** exprimé en fonction de l'épaisseur.

**Exemple :** pliage à  $180^\circ$  :

— acier de construction E 24-1 :

$$r = 0,5 e \text{ pour } e < 3 \text{ mm}$$

— acier inoxydable Z2 CN 18-10 :

$$r = 0,5 e \text{ pour } e < 3 \text{ mm}$$

— aluminium A 5 :

$$r = 0,5 e \text{ pour } e < 6 \text{ mm}$$

Pliage à  $90^\circ$  (tableaux **1**, **2** et **3** en [Form. B 7 511]).

Les outillages sont d'exécution aisée, les pièces pliées étant **développables**. Les outillages de pliage en V sont réalisés en acier de construction au carbone ou en des aciers peu alliés. Les outillages en U, plus sollicités à l'usure, sont exécutés en aciers à outils (§ 3.4.2.1).

Les **presses plieuses**, surtout utilisées pour le pliage en V, sont directement dérivées des presses d'emboutissage [8]. Elles sont hydrauliques ou mécaniques, à col de cygne, leur coulisseau est très long (2 à 6 m). Les presses destinées au pliage en U sont des presses simple effet.

Les presses à **tablier plieur** n'utilisent pas d'outillages, elles sont utilisées en chaudronnerie pour le formage des tôles de grandes dimensions.

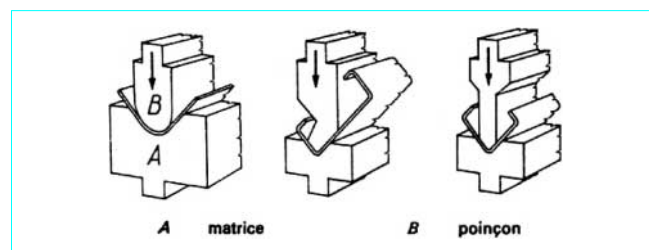


Figure 5 – Pliage en V

## 2.2.2 Pliage en V, pliage en U

### 2.2.2.1 Presses. Outillages

Il existe deux techniques de pliage :

- le pliage en V (figure 5) ;
- le pliage en U (figure 6).

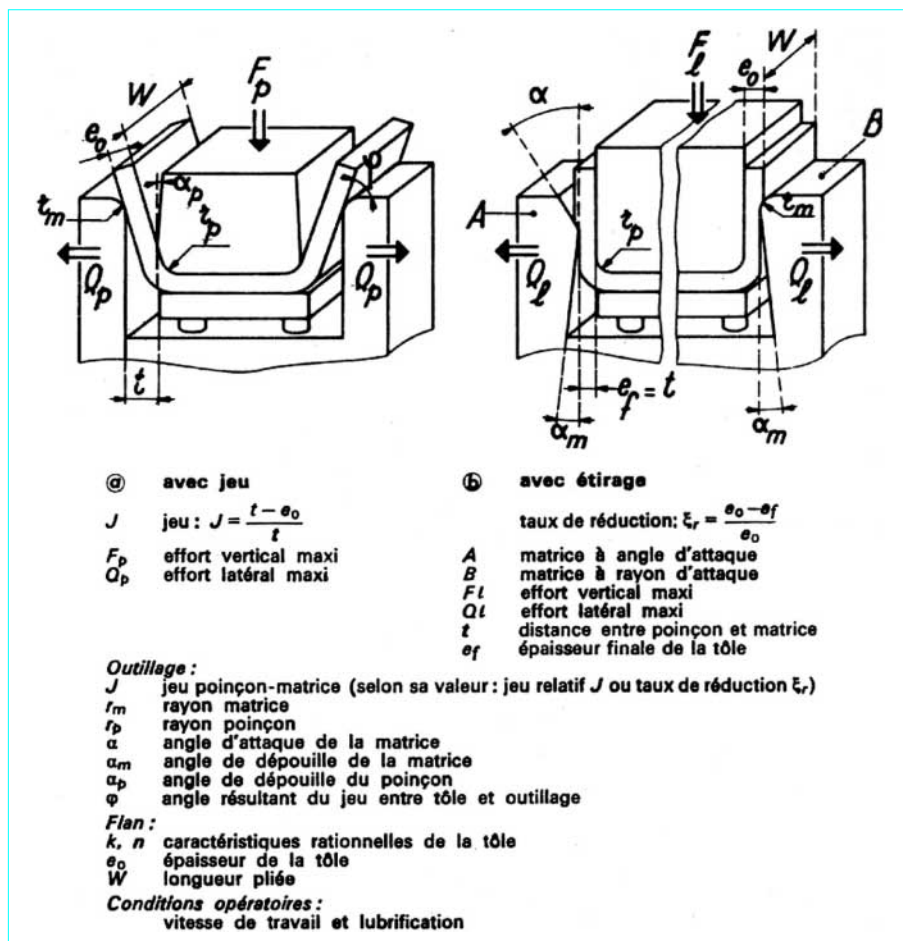


Figure 6 – Pliage en U

#### 2.2.2.2 Effort de pliage

### ■ Pliage en V

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

$$F = \frac{C \cdot R_r \cdot W \cdot e}{L}$$

avec  $F$  en daN,  $R_f$  en hbar,  $W$  en mm,  $e$  en mm,  $L$  en mm.

Le coefficient  $C$  et les notations sont fournis à la figure 7 [9].

### ■ Pliage en U

La formule empirique suivante permet d'approcher l'ordre de grandeur des efforts poinçons :

$$F = 0,5 e \cdot W \cdot R_r$$

avec  $F$  en daN,  $e$  en mm,  $W$  en mm,  $R_r$  en hbar.

Des abaques résultant d'une étude récente [10] permettent de calculer plus précisément les efforts verticaux ( $F_p$ ,  $F_\ell$ ) et latéraux ( $Q_p$ ,  $Q_\ell$ ) développés lors du pliage des tôles minces (figure 6 et figures 1 et 2 en [Form. B 7 511]).

**Exemple :** pliage d'un acier inoxydable austénitique : longueur pliée 40 mm ; épaisseur  $e_0 = 2,5$  mm ; jeu  $J = 10$  % ;  $r_p = 2$  mm ;  $r_m = 1$  mm ;  $t = e_0 (1 + J) = 2,75$  mm.

L'abaque de la figure **8** donne  $F_p = 27 \text{ kN}$  (2,7 tf), celui de la figure **9**, donne  $Q_p = 14 \text{ kN}$  (1,4 tf).

### 2.2.2.3 Précision des pièces

La principale difficulté du pliage consiste à maîtriser le retour élastique qui apparaît systématiquement si la zone écrouie est relativement localisée (exemple : rayon de pliage). C'est en fait la maîtrise du retour élastique qui conditionne avec la qualité de l'outillage la précision des pièces.

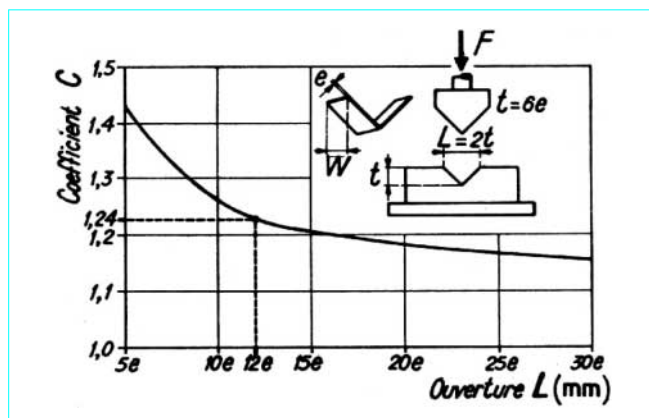
#### 2.2.2.3.1 Pliage en V

**Nota :** le lecteur pourra se reporter à la référence [9].

On peut annuler le retour élastique par une frappe à fond de matrice mais cette solution présente l'inconvénient de surcharger les machines et de n'être applicable qu'aux presses mécaniques.

Il est préférable de diminuer l'angle de la matrice. Cette diminution sera d'autant plus importante que la limite élastique du matériau est élevée.

**Exemple :** pour le pliage à  $90^\circ$  d'une tôle d'épaisseur 0,8 mm, rayon de pliage : 1 mm, construire l'angle matrice à  $88^\circ$  pour laiton UZ 36,  $89^\circ$  pour acier doux,  $88^\circ$  pour acier dur (tableau 4 en [Form. B 7 511]).



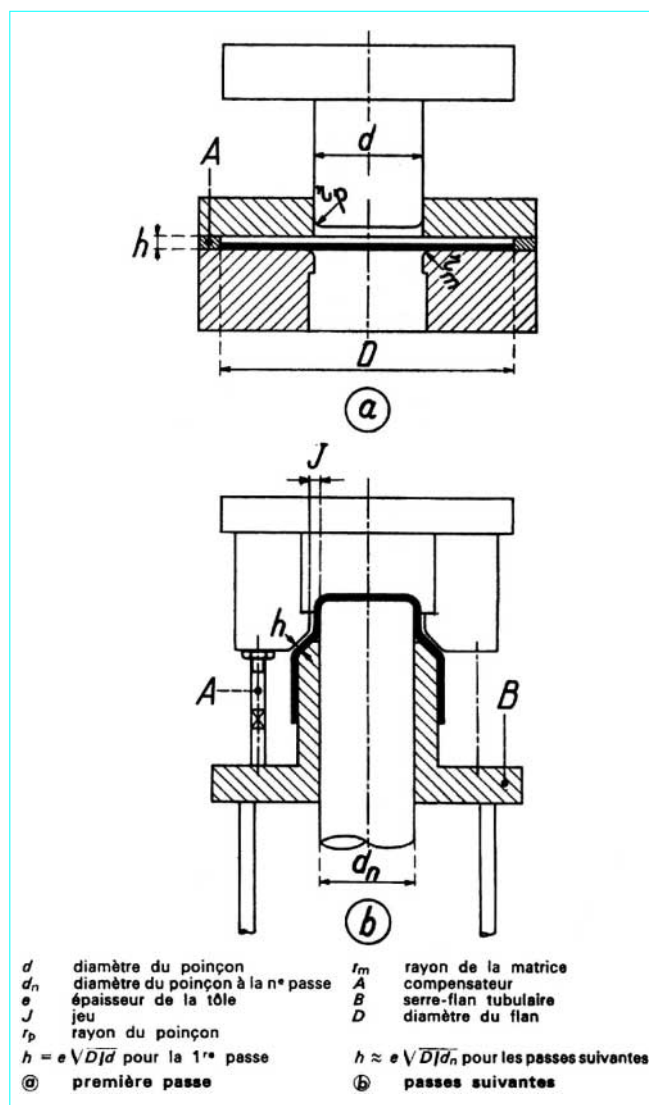
**Figure 7 – Détermination du coefficient  $C$  pour le calcul de l'effort vertical  $F$**

Le retour élastique d'une pièce après pliage est particulièrement sensible pour les grands rayons de pliage. La correction de rayon de pliage pour un rapport rayon/épaisseur tôle  $> 10$  est donnée par la formule suivante :

$$\frac{R_o}{e} = \frac{\frac{R_D}{e}}{1 + 3 \frac{R_D \cdot R_e}{F \cdot e}}$$

avec  $E$  module d'élasticité de la tôle,  
 $e$  épaisseur,  
 $R_e$  limite d'élasticité de la tôle,  
 $R_D$  rayon de la pièce (forme finale),  
 $R_o$  rayon de l'outil.

L'abaque (figure **3** en [Form. B 7 511]) est donné pour le pliage de l'acier ( $E = 2,1 \times 10^4$  hbar).



**Figure 8 – Outillages de première passe et passes suivantes : disposition des compensateurs**

## 3.2 Conception des outillages

La fonction première d'une presse est de fournir un *effort nominal* et une *énergie* ; s'il existe une certaine précision dans le guidage des coulisseaux, il est quand même recommandé de concevoir l'outillage de sorte qu'il assure au mieux le guidage de ses parties en mouvement : poinçon par rapport à la matrice (§ 3.3.4).

La fabrication des outillages d'emboutissage est généralement assurée sur machines-outils conventionnelles, de façon que l'on recherche, au niveau de leur conception au bureau d'études, à les réaliser en plusieurs parties pour faciliter les opérations d'usinage (critère économique = coût horaire machine + coût matière).

Dimensionnement des outils : les outils ne sont que rarement calculés par les formules issues de la résistance des matériaux car l'on ne connaît pas avec exactitude l'intensité des sollicitations que subit chaque partie de l'outillage. L'emprise de l'empirisme à ce niveau conduit généralement à un dimensionnement surabondant. Seules, les opérations de pliage et d'étirage se prêtent à des calculs d'efforts, assez précis.

L'outil ne doit pas être une source d'accident pour l'opérateur. Il faut donc lui assurer une alimentation aisée et une extraction facile des pièces, de sorte que le temps de l'action manuelle sous l'outillage soit très court.

## 3.3 Spécifications fonctionnelles

Nota : le lecteur pourra se reporter à la référence [18].

### 3.3.1 Rayon du poinçon

Le rayon du poinçon  $r_p$  (figure 8) ne doit pas être trop faible pour éviter le décalottage du fond de la pièce (amincissement local de la tôle traduisant une déformation locale en expansion), ni trop important pour éviter les risques de plis ; en principe il ne doit pas être inférieur au rayon de matrice.

Dans le cas où la pièce exige un faible rayon, il faut prévoir une opération supplémentaire de conformation (§ 4.1.7.3).

### 3.3.2 Rayon de matrice $r_m$ (figure 8)

Généralement :  $5e \leq r_m \leq 10e$ .

Une valeur plus précise de  $r_m$  est donnée par [9] (figure 5 en [Form. B 7 511]) :

— en première passe :

$$r_m = k\sqrt{D-d} \cdot e$$

avec  $k = 0,8$  pour acier doux ;

$k = 0,9$  pour aluminium ;

— en deuxième passe :

$$r_m = (d_1 - d_2)/2$$

avec  $d_1$  :  $\varnothing$  en première passe ;

$d_2$  :  $\varnothing$  en deuxième passe.

### 3.3.3 Jeu $J$ entre poinçon et matrice

Le jeu radial entre poinçon et matrice doit être plus grand que l'épaisseur nominale du métal embouti, pour tenir compte des tolérances sur l'épaisseur des métaux en feuilles :

$$e < J < e\sqrt{D/d}$$

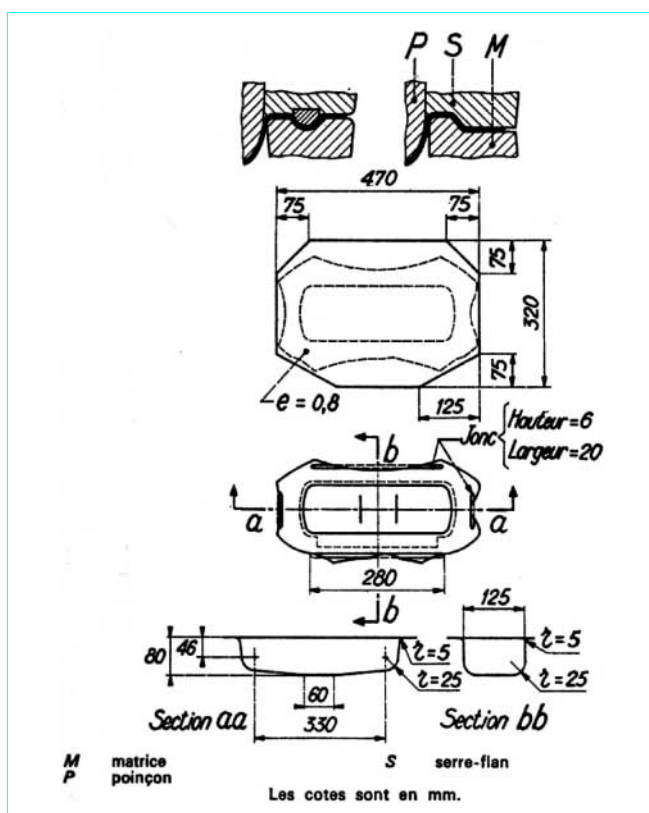


Figure 9 – Joncs de retenue. Application à un embouti comportant de grandes parois droites

### 2.2.2.3.2 Pliage en U

La précision des angles peut être obtenue de l'une des solutions préconisées pour le pliage en V, auxquelles il est possible d'ajouter l'étirage des ailes. Dans ce dernier cas, il est recommandé d'utiliser des matrices à angle d'attaque jusqu'à des étirages de 20 % et des matrices à rayon d'attaque au-delà (figure 6b) [10] (figure 4 en [Form. B 7 511]).

## 3. Outillage

### 3.1 Caractéristiques générales

L'outil qui exécute une opération dans la gamme de fabrication d'une pièce peut être monté seul ou groupé sur une même presse.

Généralement dans ce cas, un opérateur sert deux outillages. Sur les presses transfert les outillages sont montés en ligne sur le plateau de la presse. Les petites pièces de grandes séries, fabriquées à haute cadence (supérieure à 120 coups/min), sont exécutées sur **outils progressifs** (ou outils à suivre) [16] ; dans ce cas, la découpe du flan est telle que la pièce reste attachée en deux points au moins à la bande jusqu'à la dernière opération. Les différentes parties de l'outillage sont assemblées sur un même bloc (figure 24, § 4.1.7.1).

Dans tous les cas de groupage d'outils, on détermine les efforts nécessaires à chacun d'eux ; cela permet d'une part de vérifier que l'effort nominal de la presse est suffisant, et d'autre part de disposer ces outils de façon que le point d'application de l'effort résultant soit le plus près possible de l'axe du coulisseau de la presse [17].

$\sqrt{D/d} = \sqrt{\beta}$  tient compte de l'épaississement de la tôle en fin d'emboutissage (déformation en rétreint) :

$$J \leq 1,2 e \text{ (maximum) [11]}$$

### 3.3.4 Guidage

Les outils progressifs exécutant des opérations précises sont guidés par des colonnes à billes précontraintes ; ces colonnes ont l'avantage de tenir les grandes cadences. Dans les autres cas, on utilise des bagues autolubrifiées.

**Outils de grandes dimensions :** lorsque la sollicitation est symétrique, le guidage n'est pas nécessaire. Dans les autres cas, on utilise soit des guidages à caissons, soit des guidages à colonnes. Le poinçon des outillages montés sur presse double effet est généralement guidé par le serre-flan.

### 3.3.5 Serre-flan

D'une manière générale, la surface du serre-flan doit être développable. Le serre-flan de première passe d'un outil d'emboutissage profond est plan et les pressions à appliquer pour éviter la formation de plis ne peuvent être déterminées avec précision qu'expérimentalement (§ 4.1.3.3).

L'utilisation de **compensateurs** placés sur la matrice, dont l'épaisseur, au moins égale à  $\sqrt{D/d}$ , empêche la formation de plis tout en ne nécessitant pas de réglages précis de l'effort de serre-flan (figure 8). Cette disposition est très utile sur les outils des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> passes pour assurer une meilleure maîtrise des pressions de contact sur la pièce (figure 8).

L'emboutissage des pièces peu profondes (expansion) et des pièces à grandes parois peu déformées entraîne la formation de plis ou une mauvaise conformation (*ventre* des parois droites). Le serre-flan comporte alors des joncs qui empêchent ou diminuent le glissement de la tôle sous serre-flan (figure 9). Pour contrôler l'écoulement du métal dans la matrice, plusieurs joncs peuvent être disposés les uns à la suite des autres. Des joncs de retenue sont également utilisés lors des opérations de calibrage par étirage des pièces, types cônes, paraboles, etc.

Les pièces en sollicitation mixte nécessitent des pressions de serre-flan plus élevées dans les zones d'expansion que dans les zones de rétreint. Pour parvenir à ce résultat, on exécute une portée de serre-flan : par rapport au contact idéal serre-flan/matrice, les zones correspondant aux parties de flan sollicitées en rétreint seront légèrement en creux (figure 10).

## 3.4 Matériaux

### 3.4.1 Caractéristiques générales

Les outils de presse, et par conséquent les matériaux, doivent répondre à deux groupes de propriétés.

- Propriétés liées à la tenue en service :**
  - résistance à l'usure (associée à la dureté) ;
  - résistance aux chocs ;
  - ténacité ou capacité d'absorber de fortes charges sans rupture brutale.
- Propriétés liées à la mise en œuvre :**
  - usinabilité (dureté) ;
  - susceptibilité aux déformations après traitement thermique.

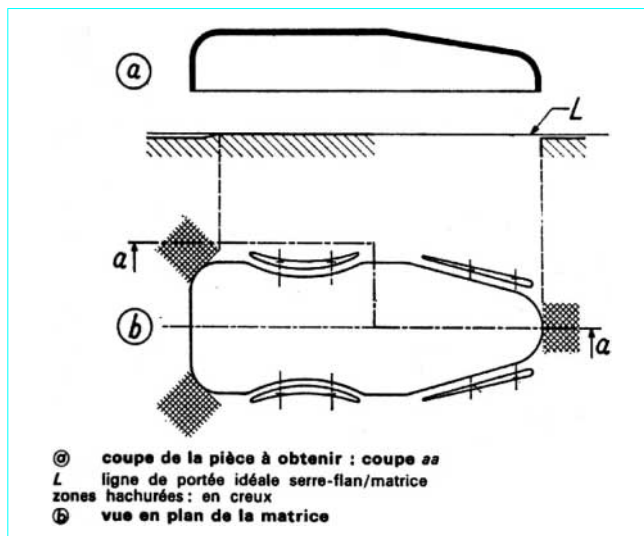


Figure 10 – Portées de serre-flan

Pratiquement, le choix du matériau résultera, en fonction des besoins précis d'une fabrication, d'un compromis entre les valeurs attachées à chacune de ces propriétés.

### 3.4.2 Emboutissage à froid

#### 3.4.2.1 Parties actives

Elles sont constituées par le poinçon, la matrice et le serre-flan.

##### 3.4.2.1.1 Alliages ferreux

Les outillages sont généralement exécutés intégralement en acier, cas des pièces de faibles dimensions, ou en fonte avec ou sans inserts d'acier pour les pièces de grandes dimensions.

#### ■ Aciers

Les qualités et la dénomination des aciers à outils sont définies par les normes NF A 35-590 et A 35-591 [19].

Les aciers les plus employés sont :

- les aciers non alliés au carbone (groupes 11 et 12) Y 105-Y 120 ;
- les aciers indéformables (groupe 22) :
  - aciers au manganèse 90 MV 8-90 MCW 5 (sous-groupe 221),
  - aciers au chrome : à 5 % : Z 100 CDV 5 et à 12 % : Z 200 C 12 et dérivés : Z 200 CD 12-Z 160 CDV 12 ;
- les aciers rapides, employés dans les cas particuliers où une grande résistance à l'usure est nécessaire.

La résistance à l'usure croît avec la quantité de martensite résultant du traitement thermique et avec la proportion de carbures libres que l'on ne rencontre que dans les aciers à 12 % de chrome et les aciers rapides. La ténacité et la résistance au choc varient en sens inverses. La martensite se forme à partir d'une vitesse critique de trempe fonction de la composition de l'acier et de la taille de la pièce, toutes ces propriétés de trempabilité sont développées dans les articles *Transformations dans les aciers* [M 1 115], *Traitements dans la masse* [M 1 134] et *Traitements superficiels* [M 1 135] du traité Matériaux métalliques.

Les outillages doivent être trempés d'autant plus énergiquement (nature du fluide de trempe : eau, huile, air, etc.) que leur trempabilité est plus faible.

Dans ce cas, on doit s'attendre, pour les pièces présentant de grandes variations de section, à des déformations importantes ; cela risque d'entraîner un prix de revient plus élevé des opérations de finition des outillages (rectification).

Une bonne connaissance des traitements thermiques et l'utilisation des courbes en refroidissement continu apportent une aide efficace dans le choix des aciers à outils [12] [20] [21] (tableaux 5, 6, 7, 8 et 9 en [Form. B 7 511]).

#### Fontes

Elles sont du type Ft 32 pour les petites séries ou du type alliées (fonte Meehanite), trempées superficiellement pour supporter des conditions sévères de frottement.

Pour l'emboutissage des aciers inoxydables, les fontes sont traitées pour obtenir une dureté Brinell comprise entre 400 et 450 HB.

#### 3.4.2.1.2 Alliages non ferreux

##### Bronzes d'aluminium (AMPCO, Inoxyda, etc.) à très haute dureté 350 HB

Ils sont utilisés pour l'emboutissage d'aciers inoxydables car ils atténuent le grippage.

##### Alliages de zinc

Ces alliages (Kayem, Kirskit) de bonne moulabilité se prêtent bien à la réalisation de formes compliquées. La coulée est faite dans des moules, dont la précision doit permettre de limiter les opérations de finition à l'ajustage, au polissage et à l'usinage des faces d'appui.

Le métal, utilisé par refusion pour différents outils, intervient peu dans le prix de revient des pièces à fabriquer. Cependant, en dépit de ses avantages, son emploi pour l'emboutissage profond des aciers reste exceptionnel du fait de sa faible résistance à l'usure. Ces outils sont généralement utilisés pour le travail en petite série (laitons et aluminiums).

##### Alliages à bas point de fusion

Le procédé *Jewelform* développé et breveté en Grande-Bretagne utilise un alliage de Sn (13 %), Pb, Bi, Cd, appelé Jewelite, dont le point de fusion est de l'ordre de 150 °C, et une presse hydraulique double effet de 1 250 kN (au maximum) qui comporte le dispositif de fusion du métal (figure 11).

Ce procédé ne nécessite que peu d'usinage : la plaque porte matrice, la plaque serre-flan et un modèle (exécuté soit en chaudronnerie, soit avec une pièce déjà existante).

Ce procédé, très peu utilisé en France, est destiné essentiellement aux industries dont les séries sont faibles (aéronautique par exemple) et où les matériaux à former sont essentiellement des alliages d'aluminium et des alliages de cuivre.

##### Carbures métalliques

Ils sont réservés aux opérations d'étirage du fait de leur très grande résistance à l'usure. Ils sont constitués par des carbures frittés – carbures de tungstène – difficiles à usiner ou par des carbures de titane dans une matrice perlitique – Ferro-TiC – Ce dernier est facilement usinable (50 % de carbure au lieu de 60-90 % environ), mais nécessite un traitement thermique de trempe. Pour une pièce de  $\varnothing 110$  mm, hauteur  $h = 130$  mm en acier doux, étirée à 20 % de l'épaisseur initiale, un outillage en Ferro-TiC réalise 200 000 pièces sans usure appréciable.

#### 3.4.2.1.3 Matériaux non métalliques

**Outils en résine :** sur un modèle réalisé en plâtre, bois ou matière plastique, on coule une ou plusieurs couches de résine époxy (parfois chargée de fibre de verre) qui constitue la partie travaillante de l'outil.

La consolidation de l'outil est assurée en remplissant cette coquille par un *béton* de résine comprenant de la grenaille de fonte, du sable et un liant.

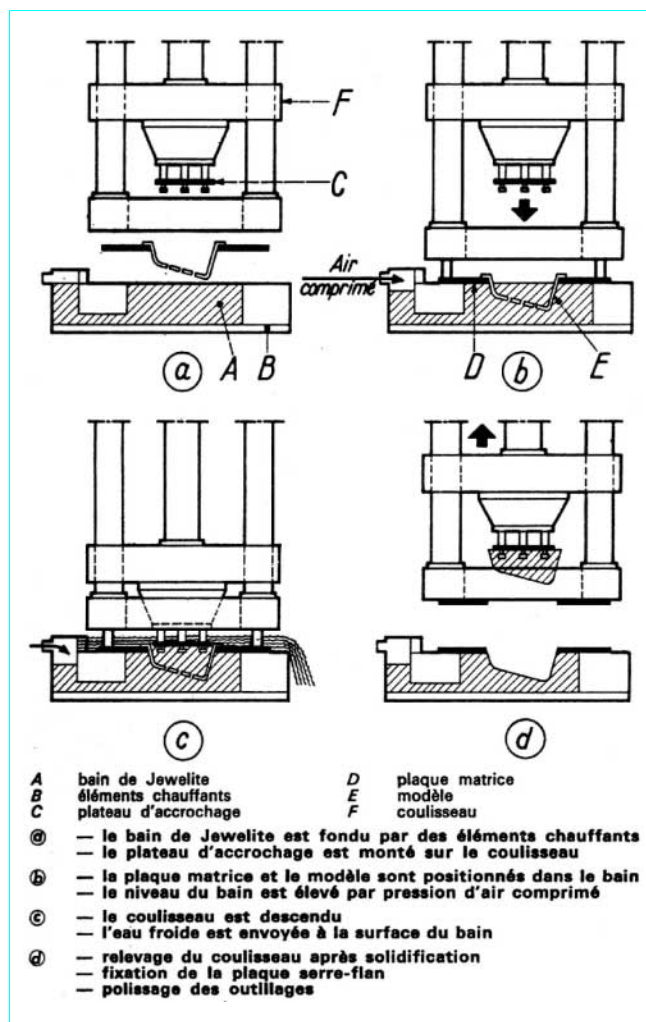


Figure 11 – Procédé Jewelform

Cette technique, surtout employée par l'industrie automobile, se limite aux préséries (200 pièces maximum). Du fait de leur mauvaise conductivité thermique et de leur instabilité en température, ces résines ne peuvent pas être employées pour des opérations de formage entraînant des températures de contact tôle-outil trop importantes ( $T < 150$  °C environ).

#### 3.4.2.2 Parties non actives

Cela ne concerne pratiquement que les outils pour travail à froid, les outils d'emboutissage à chaud étant, en général, totalement en fonte.

##### Bâtis d'outils :

- fonte Ft 18 ou Ft 22 sans exigence particulière ;
- fonte GS ( $R_f = 37$  HB) pour les bâtis chargés ;
- acier A 37 ( $36 < R_f < 44$  HB,  $E \geq 20$  HB) pour les semelles peu chargées ;
- acier A 52 ( $R_f = 51$  à 61 HB,  $E \geq 33$  HB) dans le cas d'efforts importants.

Ces aciers sont utilisés à l'état de livraison.

#### ■ Autres parties :

- CC 35 ou CC 45 pour les pièces subissant de très fortes pressions sont utilisés à l'état recuit (semelles) ou traité ( $R_r = 80$  à  $100$  HB) pour plaques porte-poinçons, chandelles de serre-flan ;
- XC 65 (tôle bleue) pour plaque de choc de poinçon ;
- 16 NC 6, 18 CD 4 ou même XC 18 (pièces peu chargées), cémentés et trempés pour pièces de frottement (colonnes de guidage).

### 3.4.3 Emboutissage à chaud

Les outils d'emboutissage à chaud des tôles d'acier sont généralement en fonte Ft 26. Les outils destinés à des petites séries comprennent souvent un ensemble de pièces spéciales et standard assemblées sur une semelle ou directement sur le plateau de la presse.

Pour les matériaux (A-U4G1, A5, A-G3, A-G5) qui s'emboutissent à des températures inférieures à  $500^\circ\text{C}$ , les outillages diffèrent peu de ceux qui sont employés pour l'emboutissage à froid. Pour les grandes séries, l'outil peut comporter un dispositif de chauffage incorporé.

## 3.5 Standardisation

Aucune standardisation n'existe à l'échelle nationale. Les normes AFNOR concernant les outillages de presses portent sur :

- les bagues de guidage (NF E 63-050 à 057) ;
- les plaques de frottement (NF E 63-058 à 071) ;
- les poinçons de découpe (NF E 63-100 à 106) ;
- les guidages à billes (NF E 63-120 à 125).

Il existe dans le commerce des éléments standardisés très souvent issus des normes DIN et des recommandations AWF (Sèves, G. Besson, Sustan, Danly Europ) : ce sont principalement les colonnes, les bagues, les plaques de guidage, les goupilles, les poinçons de découpe-poinçonnage, les pilotes, les unités de poinçonnage et les plaques rectifiées.

Toutefois, de nombreuses entreprises développent, pour leurs propres besoins, des standards qui portent sur les dimensions des blocs, les guidages, les passages de chandelles, les hauteurs de rehausses, la visserie, etc. et permettent d'exécuter plus rapidement et plus économiquement un outillage.

## 3.6 Fabrication des outillages

### 3.6.1 Usinage

La fabrication des outillages met en œuvre les moyens d'usinage classiques en construction mécanique, fraisage, rabotage, tour, rectification. Des machines à raboter les poinçons ou à usiner des profils, ainsi que les tours à reproduire sont très utilisés. Les machines à commande numérique sont employées dans l'industrie automobile pour l'exécution de gros outils – procédé UNISURF de la Régie Nationale des Usines Renault – destinés à la fabrication de pièces de carrosserie.

L'intérêt de l'usinage par **électro-érosion**, qui s'applique surtout à l'exécution de matrices, a été très rapidement ressenti à tous les niveaux. Il permet d'usiner directement à la forme des aciers traités aux plus hauts niveaux de dureté.

### 3.6.2 Mise au point. Méthode des grilles

Avant la fabrication en série, l'outillage peut nécessiter une ou plusieurs mises au point qui conduisent à des reprises de forme (agrandissement de rayons, amélioration des portées de serre-flan, etc.), la détermination des conditions opératoires (pressions de serre-flan, choix du lubrifiant, etc.), la détermination de la forme de flan optimale.

Ces opérations, dans le cas de pièces complexes, sont souvent longues. De nouvelles méthodes de travail sont appelées à se développer : basées sur l'utilisation des courbes limites de formage (article *Aptitude à l'emboutissage des tôles minces* [B 7 530]) : la méthode des grilles permet, par le marquage de réseaux de cercles sur les parties du flan qui deviendront les zones critiques de la pièce (zones de rupture ou de striction), de visualiser l'écoulement du métal et de mesurer les déformations locales. Il devient ainsi possible de quantifier, en termes de formabilité, les améliorations apportées par chacune des interventions de mise au point et par-là même de mieux guider le choix des conditions opératoires. Cette technique, en cours de développement, est actuellement surtout utilisée dans la recherche de la forme optimale du flan. Le marquage des grilles sur le flan est réalisé au moyen d'une attaque électrolytique [21].

## 4. Méthodes de fabrication

### 4.1 Gamme de fabrication

#### 4.1.1 Règles générales

À partir du dessin de la pièce, le bureau d'études établit les données du devis en estimant :

- les dimensions du flan, l'importance des chutes : coût matière ;
- la gamme de fabrication en particulier le nombre de passes : coût outillage ;
- l'effort maximal et les courses utiles pour réaliser la pièce (choix de la presse) : coût machine.

À l'exécution, on effectue une détermination plus exacte du flan, puis on définit plus précisément la gamme de fabrication pour le dessin et l'exécution des outils.

#### 4.1.2 Calcul du flan

Le calcul de flan doit conduire à l'estimation de la quantité suffisante de matière nécessaire à la réalisation de la pièce.

##### 4.1.2.1 Emboutissage profond

Les variations d'épaisseur du produit fini sont relativement faibles et aucun moyen ne permet actuellement de les prévoir ; nous admettons donc, dans la pratique, que la pièce finie aura en tout point la même épaisseur que celle du flan. D'où, puisqu'il y a conservation du volume, la surface du flan sera égale à celle de la pièce.

On décompose la pièce en volumes simples (cylindres, tores, parallélépipèdes, etc.) dont on calcule la surface.

Ce calcul peut être conduit en appliquant le théorème de Guldin : l'aire engendrée par une courbe tournant autour d'un axe qui ne la coupe pas est égale à  $2\pi$  fois le produit de sa longueur par la distance de son centre de gravité à l'axe (figure 12) :

$$S = 2\pi \cdot \overline{OG} \cdot \widehat{AB}$$

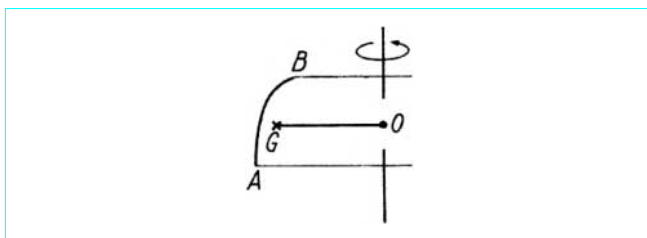


Figure 12 - Théorème de Guldin :  $S = 2 \pi \overline{OG} \cdot \widehat{AB}$

#### 4.1.2.1 Pièces axisymétriques

Le flan est circulaire de diamètre  $D = 1,13 \sqrt{\text{surface de la pièce}}$ .

On dispose pour le calcul du diamètre du flan, de formules (tables adaptées à certaines pièces types [14] [23], d'abaques (tableau 10 et figures 6 et 7 en [Form. B 7 511]), et l'on peut utiliser à titre de contrôle les méthodes graphiques telles que le polygone funiculaire de Varignon (figure 8 en [Form. B 7 511]).

#### 4.1.2.2 Pièces non axisymétriques (figure 13a)

Le calcul de la surface est réalisé suivant le même principe général (décomposition de la pièce en volumes élémentaires et calcul de leur surface) mais, dans ce cas, la forme issue du calcul (figure 13b) n'est pas optimale pour l'emboutissage, elle devra être corrigée pour assurer un bon écoulement de la matière.

##### ■ Pièces rectangulaires ou carrées

Les méthodes de correction de la forme du flan vont du pan coupé à 45°, d'obtention économique, au raccordement par des courbes, qui imposent l'exécution d'un outil mais produit un flan dont l'écoulement sous serre-flan est facilité, augmentant ainsi les possibilités d'emboutissage (figures 13c et d).

La profondeur d'un boîtier en tôle XES 1,2 mm, de base rectangulaire 430 × 195, rayon de parois  $r_p = 20$  mm, sera au maximum égale à 100 mm avec le flan (figure 13c) et passera à 130 mm avec le flan (figure 13d).

Les pièces à grands rayons de paroi, dont le rapport longueur/largeur est inférieur ou égal à 1,3, sont embouties à partir de flans circulaires dont le diamètre est :

$$D = 1,13 \sqrt{\text{surface de la pièce}}$$

##### ■ Pièces à bases elliptiques

On considère qu'elles sont issues de cylindres tangents de rayons respectifs  $R_1$  et  $R_2$  (figure 14) et l'on calcule les rayons des flans correspondants. La figure 14 montre la méthode de raccordement entre les courbes obtenues.

##### ■ Pièces à base quelconque

Le développement se fait suivant les mêmes principes et le raccordement entre courbes et droites s'effectue suivant les indications de la figure 15.

Toutes ces méthodes sont basées sur des considérations géométriques et expérimentales. De ce fait, la forme du flan pourra, si nécessaire, être améliorée lors des opérations de mise au point par la méthode des grilles.

#### 4.1.2.3 Emboutis profonds subissant un laminage (ou étirage)

Dans ce cas, on calcule le volume de métal pour faire la pièce (surface × épaisseur initiale de la tôle) et l'on détermine, par la formule suivante, la valeur approchée du diamètre du flan :

$$D \approx 1,13 \sqrt{\frac{V_{\text{pièce}}}{e_0}}$$

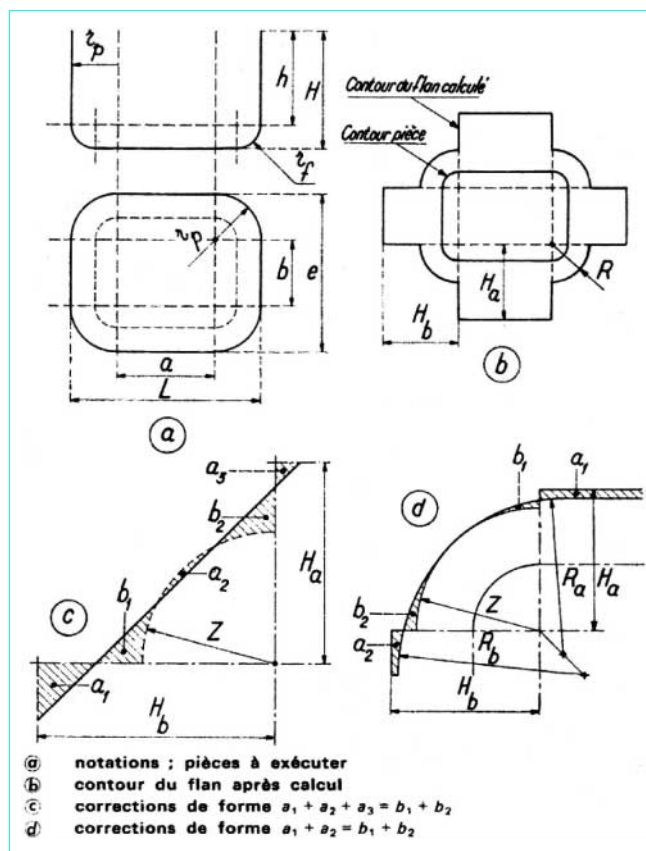


Figure 13 - Détermination du flan pour pièces à base rectangulaire ou carrée

#### 4.1.2.2 Emboutissage par expansion

Le flan étant bloqué sous le serre-flan, la déformation s'effectue exclusivement par perte d'épaisseur de la tôle en contact avec le poinçon. La valeur et la localisation des amincissements s'avèrent difficilement prévisibles et rendent impossible la détermination exacte du flan. Cette détermination n'est cependant pas indispensable du fait de l'absence d'écoulement du flan sous serre-flan.

Dans ces conditions on développe un certain nombre de courbes de la pièce, puis on les affecte de coefficients empiriques. Une ligne AB (figure 16) sera ramenée sur le flan à une ligne  $A'B' = 0,75 AB$  dans le cas d'une tôle qualité XES ou  $A'B' = 0,90 AB$  dans le cas d'une tôle TC.

#### 4.1.3 Estimation des efforts

##### 4.1.3.1 Effort d'emboutissage

La connaissance des efforts de formage est nécessaire pour guider le choix de la presse. Les modèles de calcul théoriques actuels (article *Théorie de la plasticité* [A 350] dans le traité Sciences fondamentales) se révèlent d'une part insuffisamment précis et d'autre part peu pratiques d'emploi.

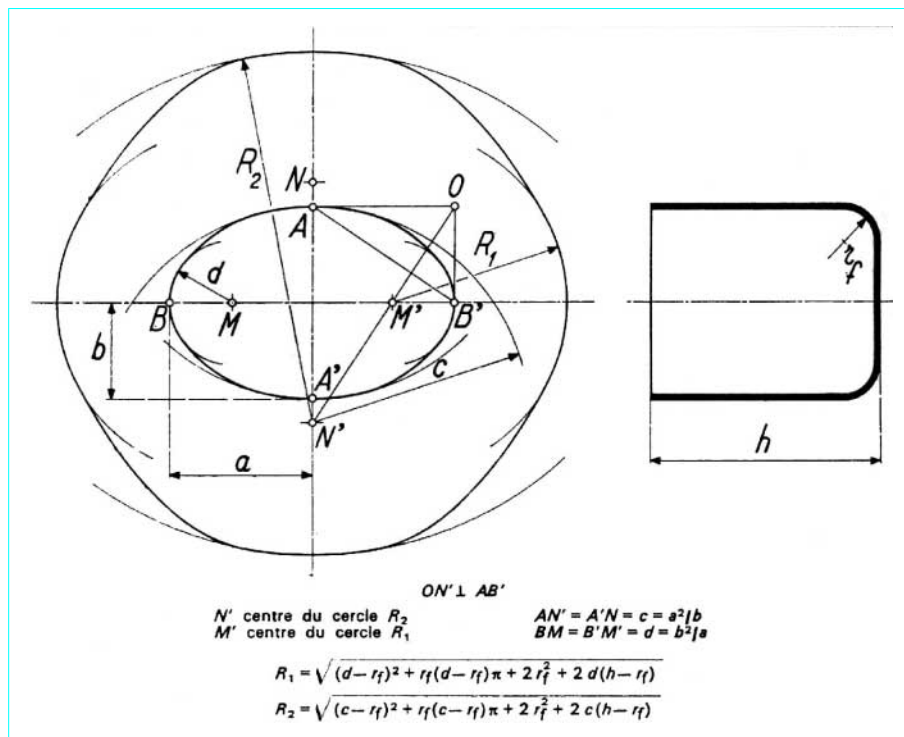


Figure 14 – Détermination du flan de pièce à base elliptique

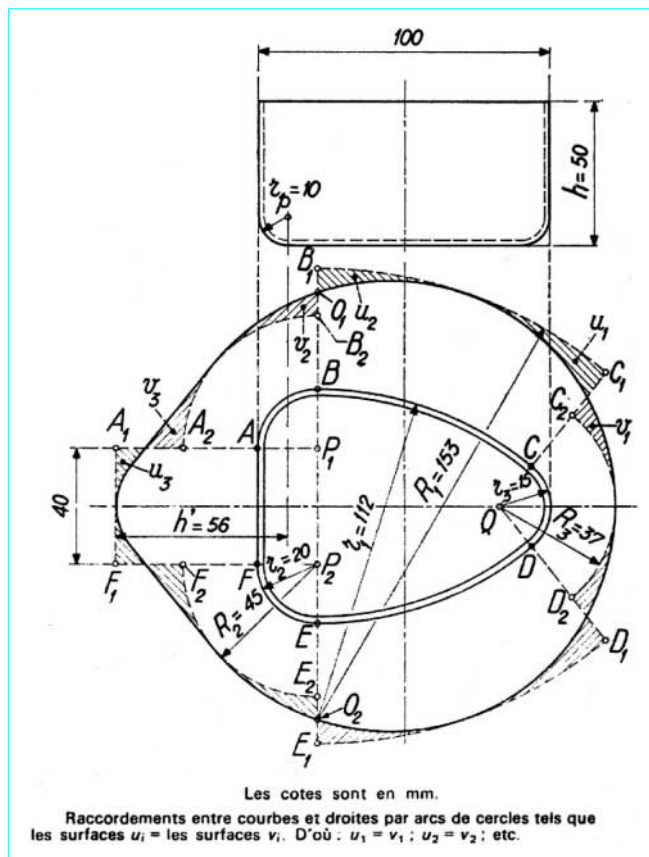


Figure 15 – Détermination du flan de pièce à base quelconque

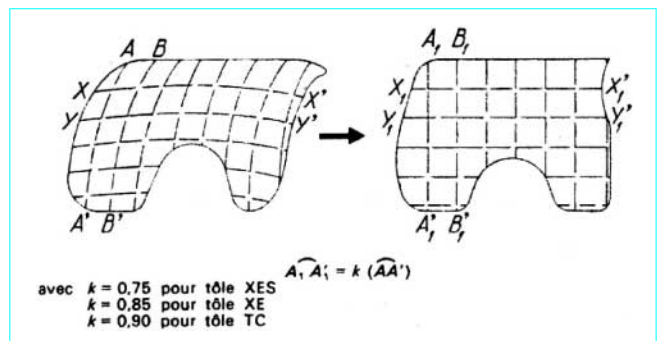


Figure 16 – Détermination de la forme du flan pour emboutis en expansion

L'approche, qui consiste à considérer que l'effort maximal d'emboutissage  $F_P$  ne peut être supérieur à l'effort  $F_R$  qui provoquerait la déchirure de la pièce, est dans la majorité des cas suffisante :

$$F_P \leq F_R = L \cdot e \cdot R_r$$

avec  $e$  (mm) épaisseur de la tôle,  
 $F_R$  (daN) force maximale admissible par la pièce en cours d'emboutissage,  
 $L$  (mm) périmètre de la pièce,  
 $R_r$  (hbar) résistance à la rupture.

#### 4.1.3.1.1 Pièces cylindriques

■ 1<sup>re</sup> passe : effort maximal :

$$F_R = \pi \cdot d \cdot e \cdot R_r$$

avec  $d$  (mm) diamètre du poinçon ;  
 $F_R$  en daN,  $e$  en mm,  $R_r$  en hbar.

Cette valeur est pondérée par un coefficient qui prend en compte le rapport de réduction :

$$F_P = k \cdot F_R$$

Suivant les auteurs  $k$  prend des valeurs différentes [23] [24]. Wassilieff [9] propose :

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

L'effort maximal d'emboutissage intervient généralement au premier tiers de la course.

■ **Passes suivantes** : effort maximal :

$$F_R = 0,5 F_{R(n-1)} + 5 d_n \cdot e \cdot R_r \cdot \lg \left( \frac{d_n - 1}{d_n} \right)$$

avec  $n$  nombre de passes,

$F_{R(n-1)}$  effort maximal pour la  $(n-1)^e$  passe.

Des abaques [14] [23] permettent également de déterminer les efforts d'emboutissage (figure 9 en [Form B 7 511]).

#### 4.1.3.1.2 Pièces quadrangulaires

Parmi les formulations proposées [23] [24], celle qui conduit à l'estimation maximale [12] est donnée par :

$$F_R = R_r \cdot e (2 \pi \cdot r_c \cdot k_A + L \cdot k_B)$$

avec  $k_A = 0,5$  pour emboutis peu profonds,

= 2,0 pour emboutis dont  $h = 5 r_c$  à  $6 r_c$

( $h$  hauteur,  $r_c$  rayon de coin) ;

$k_B = 0,2$  pour jeu important, pas de serre-flan,

= 0,3 à 0,5 pour écoulement facile, faible pression de serre-flan,

= 1 pour fortes pressions de serre-flan.

#### 4.1.3.1.3 Pièces de forme quelconque

On utilise les relations exprimées au paragraphe 4.1.3.1.

#### 4.1.3.2 Efforts d'étirage

Les efforts d'étirage peuvent être calculés au moyen d'abaques qui donnent les efforts nécessaires au pliage avec étirage (§ 2.2.2.2) en remplaçant  $W$  (longueur pliée) par le demi-périmètre de la pièce [10].

#### 4.1.3.3 Effort serre-flan

On utilise la formule :

$$F_{SF} = p \cdot S$$

avec  $S$  (mm<sup>2</sup>) surface du flan en contact avec la matrice,

$p$  (hbar) pression spécifique,

$F_{SF}$  (daN) effort serre-flan.

Le tableau 11 en [Form. B 7 511] donne quelques valeurs de pressions de serre-flan en fonction des métaux travaillés. Ces valeurs correspondent à des minimums, elles peuvent être insuffisantes pour éviter totalement la formation de plis.

Pratiquement, on cherche rarement à l'évaluer.

#### 4.1.3.4 Énergie d'emboutissage

Son calcul n'est indispensable que pour les opérations sur presse mécanique, les groupes moteurs de presses hydrauliques fournissant à chaque instant l'énergie nécessaire (dans les limites de l'énergie hydraulique admissible) :

$$E_E = F_E \cdot h \cdot X$$

avec  $E_E$  (J) énergie d'emboutissage,

$F_E$  (daN) effort au coulisseau,

$h$  (m) hauteur de la pièce,

$X$  coefficient.

$X$  est donné par le tableau 12 en [Form. B 7 511] [9].

Lorsque l'emboutissage s'effectue sur presse simple effet avec coussin inférieur, il faut ajouter l'énergie nécessaire au déplacement du serre-flan :

$$E_{SF} = F_{SF} \cdot h$$

avec  $F_{SF}$  (m) effort serre-flan,

$h$  (daN) hauteur de la pièce.

L'énergie totale absorbée par l'opération est égale à :

$$E_T = E_E + E_{SF}$$

soit

$$E_T = h (F_E \cdot X + F_{SF})$$

#### 4.1.4 Détermination du nombre de passes

##### 4.1.4.1 Généralités

La réussite de l'opération d'emboutissage (pièce non déchirée) sera assurée si les efforts admissibles par la paroi (partie de la pièce déjà formée sur le poinçon) sont supérieurs à ceux nécessaires pour poursuivre la déformation sous serre-flan et au rayon de matrice. Les efforts de déformation sous serre-flan sont d'autant plus importants que le diamètre du flan est grand et que la limite élastique du matériau est élevée. C'est pourquoi la réduction d'un flan de diamètre  $D$  (ou de rayon de coin  $R$  dans les emboutis quadrangulaires) connaît une limite :  $\beta_L = D_{max}/d$  (appelée également LDR : Limit Drawing Ratio), fonction du matériau et du rapport  $D/e$ . L'abaque (figure 10 en [Form. B 7 511]) [14] donne les valeurs maximales de  $\beta_L$  pour les laitons qualité UZ 28 à UZ 36, tôles d'acier qualité ES (ligne I) et pour les tôles d'acier TC, E, ainsi que l'aluminium (ligne II). Lorsque le rapport  $D/d = \beta_L$  est supérieur à  $\beta_L$ , la pièce doit être exécutée en plusieurs passes de telle sorte que  $D/d_1 = \beta_1 < \beta_L$ , puis  $d_1/d_2 = \beta_2 < \beta_1 \dots$ . En fait  $\beta_L = \beta_1 \cdot \beta_2 \dots \beta_n$ . Le coefficient  $\beta$  est appelé *rapport d'emboutissage* ; on utilise plus fréquemment en France la notation inverse  $1/\beta = m$  appelé *coefficient de réduction*. Le tableau 13 en [Form. B 7 511] donne les coefficients de réduction successifs à appliquer suivant les métaux (ces valeurs sont issues de l'expérience).

Exemples de formes données aux passes intermédiaires :

a) *pièce sans collerette ou avec une petite collerette*. Les emboutis intermédiaires ont la forme de la figure 17 ;

b) *embouti profond avec une grande collerette*. Les rapports de réduction sont généralement incompatibles avec les possibilités de déformation de la tôle. On exécute souvent une passe de préparation dite *en boule* ; le volume de métal de la boule est égal à celui de l'embouti (figure 18).

Si le rapport d'emboutissage est tel que plus de quatre passes sont nécessaires, il est souvent plus avantageux d'effectuer un recuit (§ 4.1.6) dès la seconde passe. Le métal ayant retrouvé ses propriétés plastiques d'origine, on peut reprendre l'emboutissage de troisième passe avec le rapport de réduction  $m_1$ .

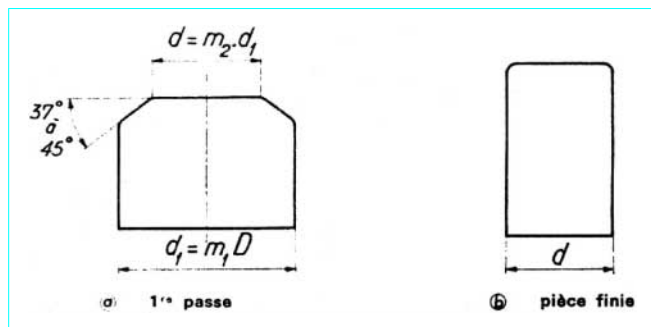


Figure 17 – Pièce sans collerette ou avec petite collerette : formes données aux passes intermédiaires

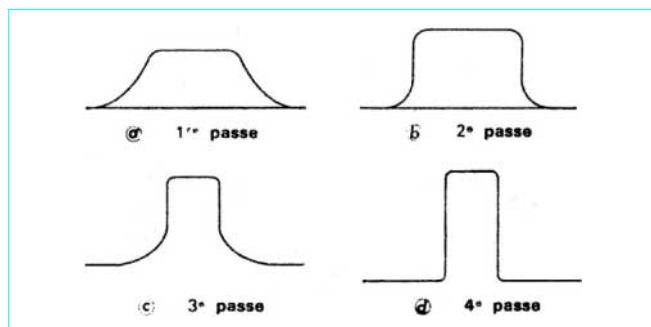


Figure 18 – Embouti profond avec grande collerette : formes données aux passes intermédiaires

Le nombre de passes nécessaires à l'exécution de pièces cylindriques ou rectangulaires peut être diminué en utilisant la technique d'emboutissage par retournement qui permet un accroissement de 25 % du rapport de réduction (figure 19). Un embouti cylindrique  $d = 80$  mm qui nécessite un flan  $D = 230$  mm, soit  $m = 0,35$ , sera exécuté en deux passes par retournement et en trois passes par la méthode d'emboutissage classique. Cet accroissement des performances est dû à l'influence des chemins de déformations sur la formabilité des métaux qui se révèlent bénéfiques dans le cas de l'emboutissage par retournement.

#### 4.1.4.2 Emboutis quadrangulaires et ovales

##### 4.1.4.2.1 Emboutis ovales et quadrangulaires à grands rayons de paroi

Les emboutis à grands rayons de paroi et les ovales sont assimilés à des emboutis cylindriques en posant :

$$D = 1,13 \sqrt{S}$$

avec  $S$  surface du flan,

$$d = 1,13 \sqrt{s_p}$$

avec  $s_p$  aire de la section droite du poinçon.

Les coefficients de réduction à appliquer sont les mêmes que ceux du paragraphe 4.1.4.1.

##### 4.1.4.2.2 Emboutis quadrangulaires à faible rayon de paroi

L'embouti est réalisable en une seule passe si, d'une part, sa profondeur est inférieure à 6 fois le rayon de paroi ( $h < 6r$ ) pour l'acier et 20 fois pour l'aluminium et si, d'autre part, le cylindre inscrit peut s'emboutir en une seule passe (figure 20).

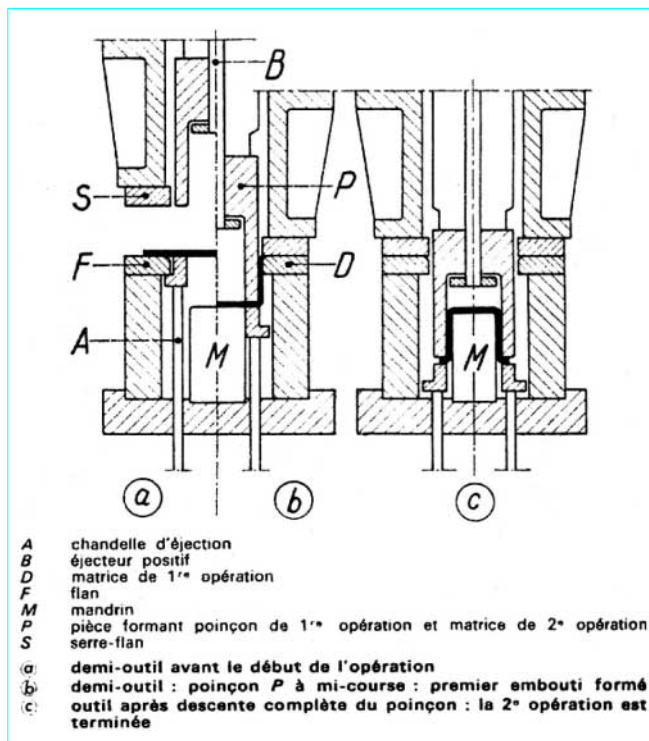


Figure 19 – Emboutissage par retournement

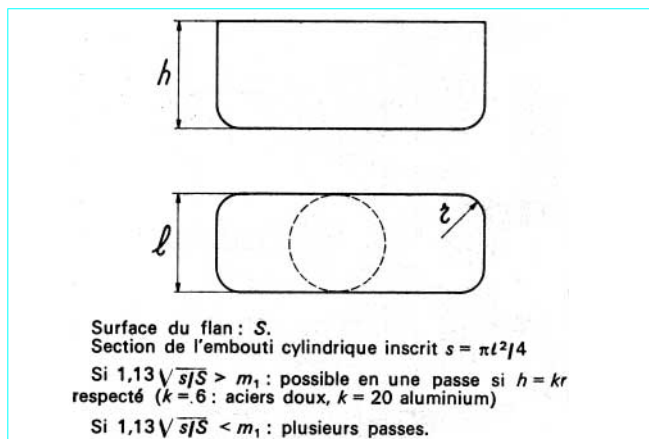


Figure 20 – Détermination des passes sur emboutis rectangulaires

Si plusieurs passes sont nécessaires, leur nombre est au moins égal à celui que nécessiterait l'embouti cylindrique inscrit et les sections de chacun des poinçons devront être telles que :

$$s_n \geq s_{(n-1)} \cdot m_n^2$$

avec  $m_n = d_n / d_{(n-1)}$  coefficients de réduction d'emboutis cylindriques (tableau 13 en [Form. B 7 511]).

Il faut de plus tenir compte du rapport d'emboutissage  $q$  des coins  $q_t = r_p / R$  (notations : figure 13) :

- forme homothétique à la pièce à obtenir : méthode droite ;
- forme comosée de courbes : méthode galbée.

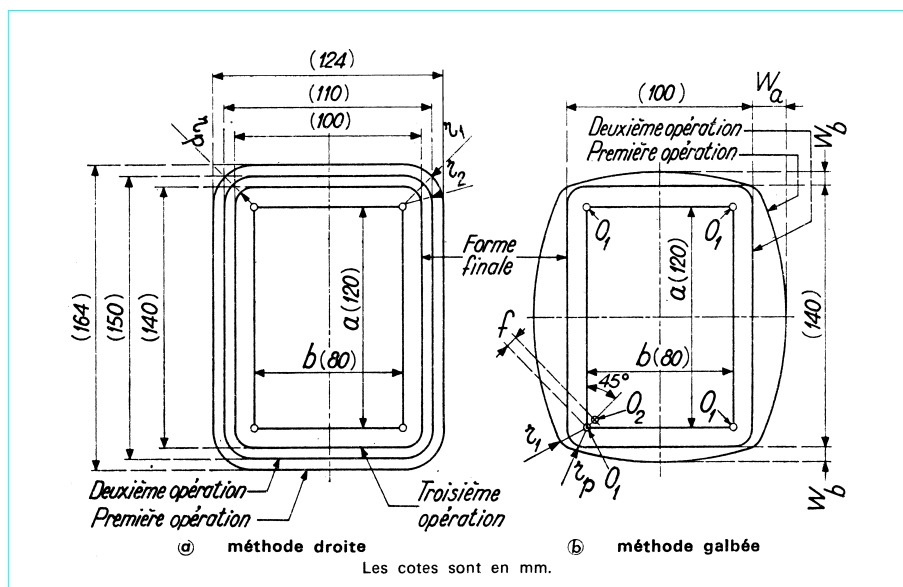


Figure 21 – Formes données lors des passes successives sur emboutis rectangulaires

Le tableau 14 en [Form. B 7 511] donne les rapports  $q_1$  admissibles pour chaque méthode. Les rapports  $q$  des passes suivantes sont toujours  $q = 0,60$ .

Les formes à donner aux différentes ébauches intermédiaires sont basées sur les principes énoncés au paragraphe 4.1.4.1 (figure 21).

#### 4.1.4.2.3 Pièces de révolution générées par une conique (paraboles, cônes, hémisphères, etc.)

L'exécution est relativement aisée par formage sur matériaux élastiques (§ 2), elle nécessite un grand nombre de passes sur outillage rigide : on effectue un embouti étagé inscrit dans le profil de la pièce, puis on termine par un étirage et une frappe (figure 22).

#### 4.1.5 Vitesse d'emboutissage

Nous appelons vitesse d'emboutissage la vitesse  $V$  de pénétration du poinçon dans la matrice :

- presses hydrauliques :  $1 < V < 10$  m/min ;
- presses mécaniques :  $10 < V < 70$  m/min.

La vitesse d'emboutissage, dans les gammes permises par les presses industrielles, n'a pas d'influence sensible sur les caractéristiques rationnelles et conventionnelles des métaux en feuilles, mais c'est un facteur déterminant pour assurer la réussite des emboutis profonds. En effet, on est généralement contraint, pour ce type de fabrication, à utiliser des vitesses peu élevées (quelques mètres/minutes) pour permettre un écoulement contrôlé du métal sous serre-flan et au rayon matrice. La vitesse contribue, en parallèle des pressions de serre-flan sur la tôle et de la nature des lubrifiants, à établir des conditions spécifiques de frottement qui conditionnent également la qualité de l'emboutissage. On peut donner comme ordre de grandeur des vitesses maximales d'emboutissage :

- acier inoxydable = 15 m/min ;
- acier doux = 28 m/min ;
- laiton et aluminium = 30 m/min.

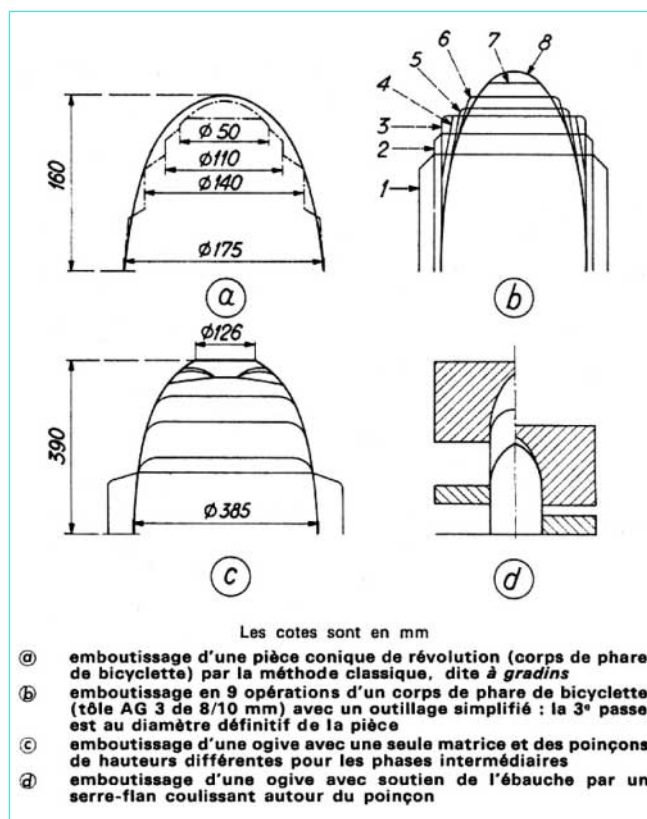


Figure 22 – Emboutissage de pièces pointues de révolution [31]

4.1.6 Recuit

**Nota :** on se reportera à l'article *Écrouissage d'alliages d'Aluminium* [M 230] du traité Matériaux métalliques.

L'emboutissage provoque un écrouissage qui modifie les caractéristiques de ductilité du matériau. La charge à la rupture  $R_r$  augmente mais la limite élastique  $R_e$  croît plus vite (à la limite  $R_e = R_r$  et il n'y a plus de possibilité de déformation) (§ 1.3.1 et 4.1.4).

On élimine les effets de l'écrouissage pour deux causes principales :

a) *formabilité* : si le nombre de passes est supérieur à 4, les rapports de réduction sont trop faibles et il devient plus économique d'effectuer un recuit ;

b) *tenue de la pièce en service* : si la pièce doit présenter des caractéristiques de ductilité proches de celles du métal d'origine (appareils à pression).

Il existe deux possibilités :

— le *recuit de restauration* ou *recuit d'adoucissement* qui s'effectue à basse température. Il ne restitue qu'une partie des propriétés mécaniques sans modifier la structure du métal.

Laiton : 200 à 300 °C, acier doux :  $\approx$  400 °C ;

— le *recuit de recristallisation*, effectué à des températures plus élevées, rend au métal ses propriétés initiales et reconstitue une structure équiaxe (tableau 15 en [Form. B 7 511]). Plus le taux d'écrouissage est élevé, plus basse sera la température de recuit.

Du point de vue résistance, c'est le recuit de recristallisation qui assure le maximum de sécurité.

Précautions

Un embouti n'est jamais déformé de façon homogène et les zones à écrouissage critique seront affectées par un important grossissement du grain, qui entraînera :

- un risque de peau d'orange néfaste aux pièces de présentation (§ 1.2.2.3) ;
- un risque de rupture lors des opérations d'emboutissage suivantes (§ 1.3.3).

4.1.7 Opérations auxiliaires

4.1.7.1 Découpage du flan

Le découpage du flan est effectué à l'aide d'outils de découpe type outil parisien (article *Découpage. Poinçonnage* [B 7 561]) (grandes séries) ou de grignoteuses (petites séries). Lorsque la forme du flan le permet (§ 4.1.2.1.2), on utilise une cisaille. Dans le cas de travail dans la bande, si la pièce ne nécessite qu'une seule passe, on effectue le découpage du flan et l'emboutissage dans le même coup de presse (figure 23). Cela présente l'inconvénient d'une usure importante de l'arête de coupe. Dans les autres cas (opérations sur outil à suite), le flan n'est pas découpé, mais son contour est déterminé par l'intermédiaire d'un *détaché* qui, tout en maintenant la pièce au squelette, permet l'emboutissage profond (figure 24). Pour plus de précision, se reporter à l'article *Découpage. Poinçonnage* [B 7 561].

4.1.7.2 Détourage

L'anisotropie des tôles, cause des cornes d'emboutissage (article *Aptitude à l'emboutissage des tôles minces* [B 7 530]), varie en fonction des livraisons de tôles et interdit, de ce fait, la possibilité d'obtenir une pièce aux contours acceptables.

Le détourage est l'opération qui donne à la pièce son contour définitif par enlèvement de matière excédentaire ; elle procède du découpage, et s'effectue avec un outil de forme (figure 25). Cer-

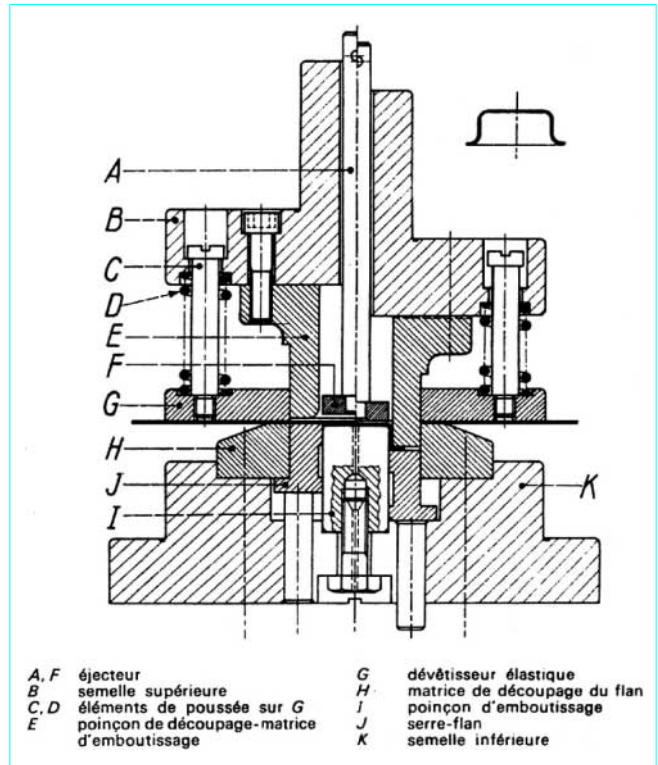


Figure 23 – Outil composé pour découpage du flan et emboutissage sur presse simple effet

tains outillages sont conçus de façon à effectuer le découpage du flan, l'emboutissage et le détourage au cours d'un même coup de presse (figure 26).

Le détourage de pièces sans collerette est réalisé par rognage sur des machines à molettes ou parfois (pièces cylindriques) au tour.

4.1.7.3 Calibrage. Conformation

Ce sont les opérations de finition qui donnent à la pièce sa forme ou sa cote définitive.

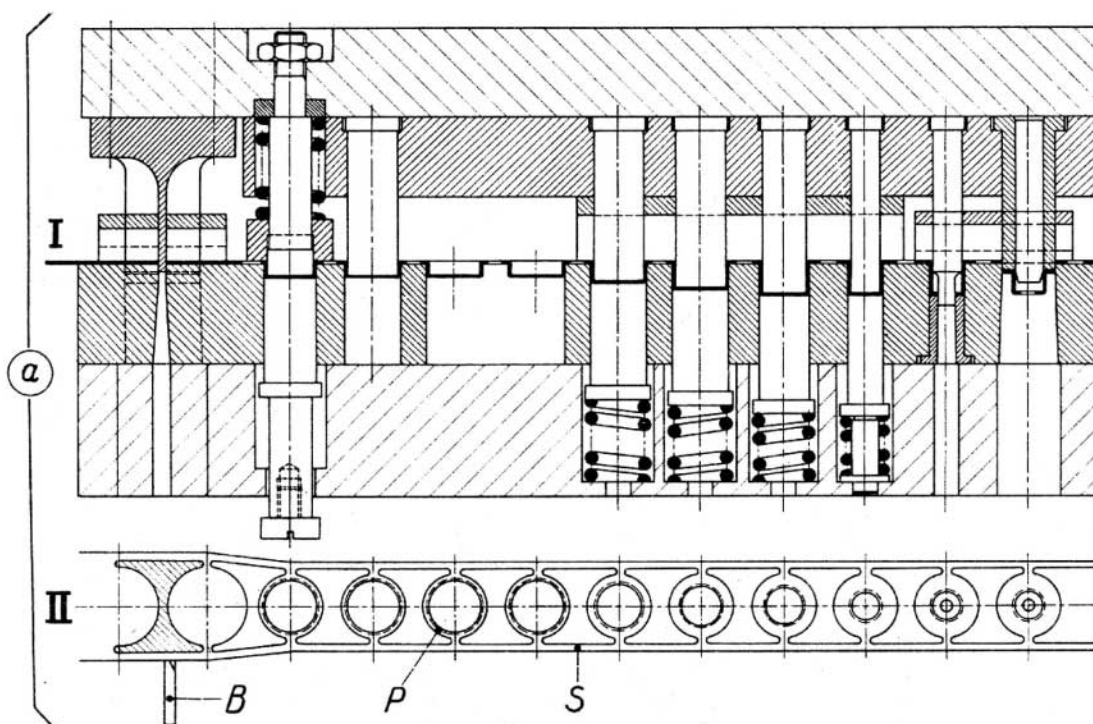
La conformation permet d'obtenir les cotes finales des rayons de collerette et des rayons de paroi que l'on n'a pas pu avoir pour des raisons fonctionnelles (§ 3.3.1 et 3.3.2).

Le calibrage donne à la pièce une cote précise ( $\pm 0,01$  mm minimum). Dans le cas des pièces pliées et coniques, le calibrage implique une frappe à fond de course. Le calibrage des pièces obtenues par rétreint (cylindriques, etc.) se fait par laminage de la paroi (figure 6) identique au pliage.

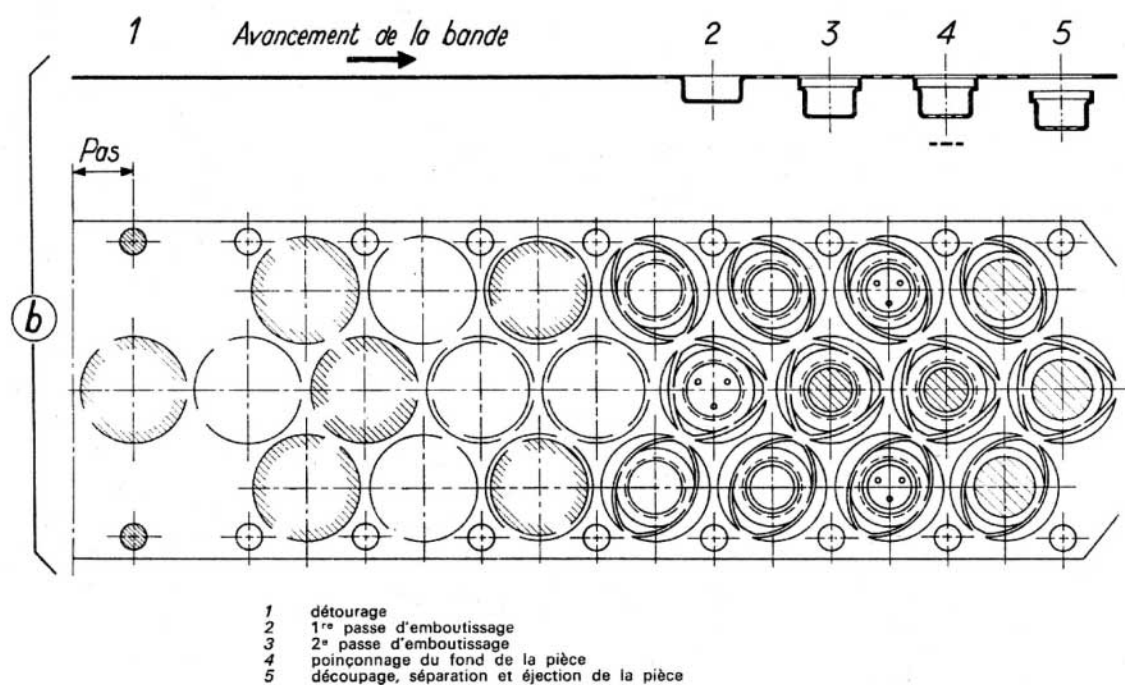
Les aciers doux et les laitons se prêtent très bien à ce type d'opération (40 % en une seule passe pour les laitons).

On peut effectuer simultanément une passe d'emboutissage et d'étrépage si  $m \geq 0,85$ .

La forme d'entrée de la matrice a une grande importance et les conditions opératoires données au paragraphe 2.2.2.1 sont applicables à l'étrépage des corps creux.



- B butée de départ  
 P pièce  
 S squelette  
 I schéma de la bande en cours d'opération  
 II préparation des détachés  
 @ 1<sup>er</sup> exemple : outil à suivre, livraison pièce squelette



- 1 détournage  
 2 1<sup>re</sup> passe d'emboutissage  
 3 2<sup>e</sup> passe d'emboutissage  
 4 poinçonnage du fond de la pièce  
 5 découpage, séparation et éjection de la pièce  
 @ 2<sup>e</sup> exemple : détail des opérations de presse pour la fabrication de viroles

Figure 24 – Emboutissage profond sur outils à suivre

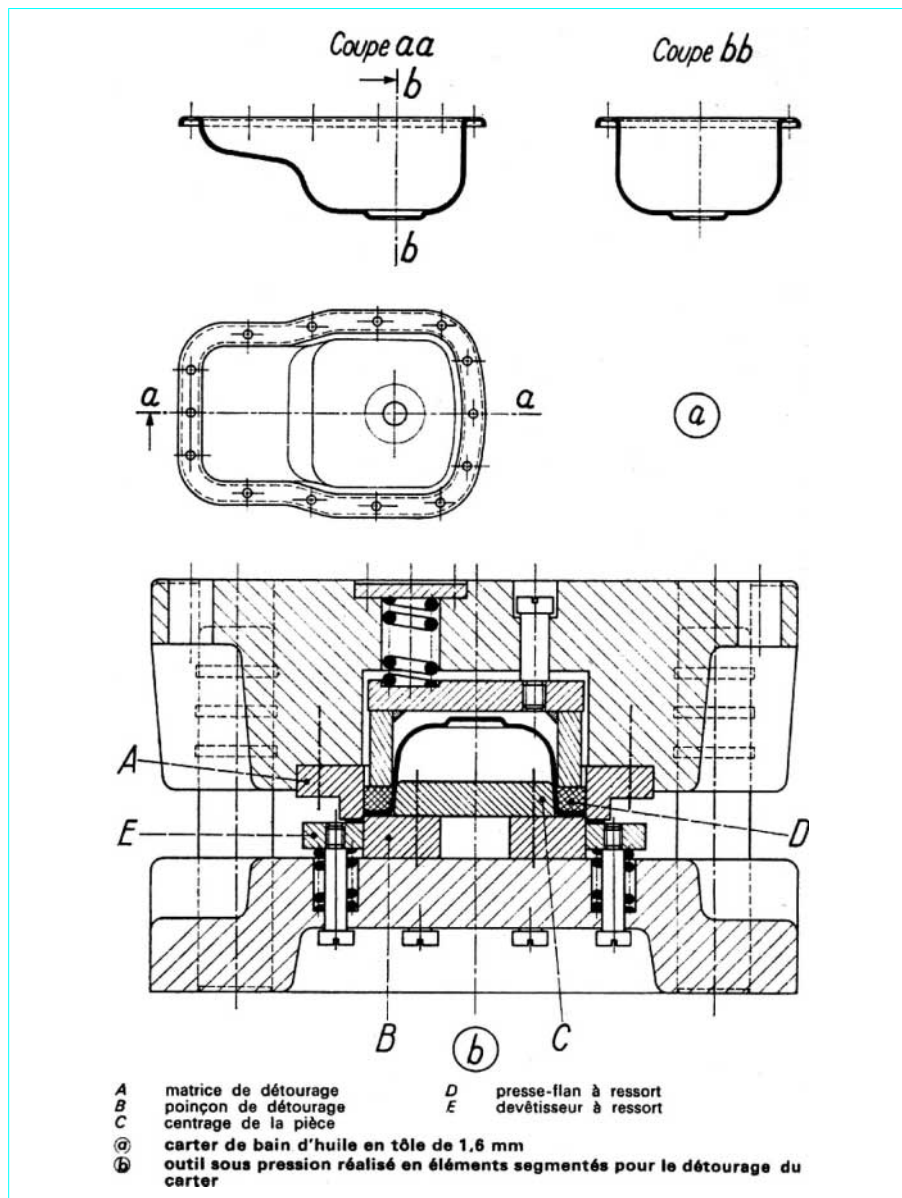


Figure 25 – Outil de détournage

## 4.2 Lubrification

### 4.2.1 Rôle

Dans le formage à froid des métaux en feuilles, pratiquement toute l'énergie mécanique absorbée par la déformation plastique et les frottements tôle-outillage est transformée en énergie thermique. La contribution des forces de frottement en emboutissage peut représenter 20 à 40 % de l'énergie totale absorbée. Elle sera d'autant plus faible que les produits lubrifiants seront de bonne qualité, leur action ayant pour conséquence :

- l'augmentation de la longévité de l'outillage (diminution des efforts de frottement et des températures de contact) ;
- une meilleure régularité et une amélioration de la qualité dans la production des pièces embouties (état de surface, aspect) ;

— la possibilité de réaliser des pièces difficiles (formes complexes ou emboutis profonds) pour lesquelles les conditions aux limites *tôle-outillage* sont apparemment devenues prépondérantes par rapport aux conditions opératoires, forme du flan, pression de serre-flan, vitesse d'emboutissage.

Il résulte de l'analyse de l'opération d'emboutissage qu'il existe pour un métal donné (acier doux, acier inox, etc.) quatre facteurs principaux qui déterminent le comportement des lubrifiants :

- la pression de contact  $p$  tôle sous serre-flan :  
quelques hbar <  $p$  < 100 hbar
- la vitesse de glissement  $v_g$  tôle-outillage :  
quelques m/min <  $v_g$  < 45 m/min
- la température moyenne  $T_m$  des pièces :  $30\text{ °C} < T_m < 80\text{ °C}$  ;

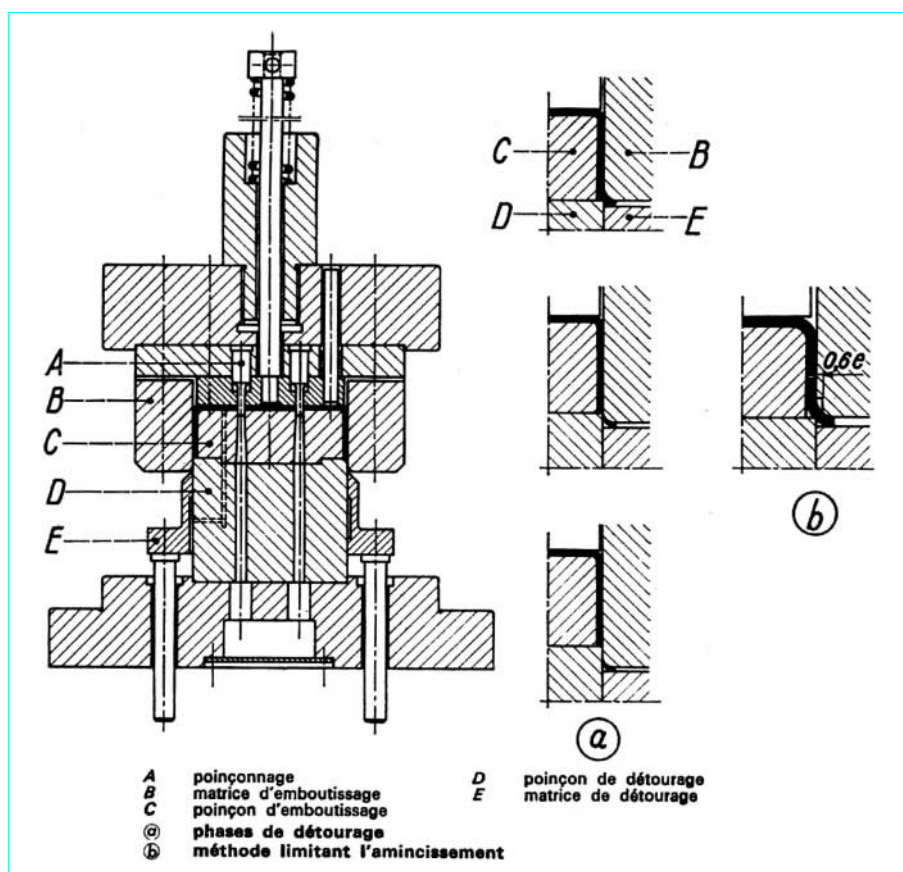


Figure 26 – Outil composé d'emboutissage-détournage

— la nature des contacts : c'est-à-dire la longueur des arcs de contact (plusieurs mm) et l'état de surface recouvrant les aspects morphologiques et physico-chimiques (rugosité, tension superficielle, etc.).

Par rapport au processus tribologiques rencontrés en mécanique générale, la longueur des arcs de contact et les états de surface rendent spécifiques les phénomènes de lubrification rencontrés dans les procédés de mise en forme des métaux [25].

#### 4.2.2 Nature des lubrifiants utilisés

Il existe actuellement deux classifications provisoires qui méritent d'être citées. L'une émane de l'ASTM [26], elle vise à consolider la terminologie, la nomenclature des fluides pour le travail des métaux en feuilles. Elle n'implique aucune évaluation de la qualité des produits ni de leur convenance pour une opération donnée. Son intérêt est relativement limité pour les utilisateurs. L'autre, plus récente, d'origine allemande, a été élaborée par le GTS [27] ; elle comprend, outre une liste des produits utilisés en emboutissage, une liste de lubrifiants, leur définition, les préparations avant application, les conditions d'application, les effets secondaires (corrosion par exemple) et les impératifs de nettoyage. Elle tend donc à fournir à l'utilisateur une possibilité de choisir son lubrifiant. C'est pourquoi le SNDE se propose de l'adopter pour la France. Suivant leur nature et leur composition, les lubrifiants sont classés en 5 grandes catégories [26] :

##### I) Huiles et fluides à base d'huile :

- A – Huiles minérales, non compoundées ;
- B – Graisses non compoundées, contenant des composants chlorés ou sulfurés ;
- C – Huiles minérales, compoundées.

Mélange d'huile minérale et graisse contenant des composants sulfurés ou chlorés (ces composants pouvant être gras ou non), contenant des composés de l'azote, du phosphore ou des lubrifiants solides.

##### II) Émulsions aqueuses et dispersions :

- A – Émulsions d'huile dans l'eau (huiles solubles).  
Émulsion d'huile de la classe IA ou de mélanges de la classe IB ;
- B – Émulsions d'eau dans l'huile à partir d'huiles et de graisses de la catégorie I ;
- C – Émulsions colloïdales à partir d'huiles et de graisses de la catégorie I,
- D – Dispersions physiques des huiles et graisses de la catégorie I.

##### III) Solutions chimiques (solutions vraies et solutions colloïdales) :

- A – Organique – Systèmes organiques solubles dans l'eau, donnant des solutions claires, transparentes, de faible tension superficielle ;
- B – Inorganique ;
- C – Mixtures – Mélanges de solutions organiques et inorganiques.

##### IV) Lubrifiants solides

- A – Poudres
  - a) cristalline, telle que graphite, sulfure de plomb, mica, bisulfure de molybdène, talc, chaux, carbonate de calcium, oxyde de zinc et sulfure de zinc,
  - b) polymérique, telle que polyéthylène et PTFE,
  - c) amorphe, telle que savons et cires ;

B – Matériaux vitreux

Borates, verres, phosphates ;

C – Graisses et pâtes ;

D – Films secs liés par particules, résine, ou à l'état vitreux ;

E – Revêtements de conversion chimique, phosphate, oxalate.

#### V) Divers.

Matériaux chlorurés ou sulfurisés sans huile, matériaux organiques tels que alcools, glycols, polyols, esters, composés du phosphore, etc. et dispersions de lubrifiants solides (classe IV) dans des produits organiques.

### 4.2.3 Choix des produits

Hormis les conditions d'amélioration de l'aptitude au formage, il faut considérer les caractéristiques de protection contre la corrosion, le comportement vis-à-vis du matériau, la stabilité, la facilité d'application, de nettoyage, de préparation et de stockage, ainsi que les caractéristiques d'hygiène et de sécurité (toxicité en particulier). Pour guider le choix de l'utilisateur, le producteur fournit des spécifications précisant l'ensemble de ces caractéristiques physico-chimiques. Il reste difficile encore actuellement, et en particulier pour les productions de pièces complexes à emboutir, de choisir le lubrifiant le mieux adapté.

Plusieurs tentatives ont été faites pour classer les lubrifiants [28] [29], mais c'est en fait l'expérience qui reste le meilleur guide du choix susceptible d'assurer la réussite de pièces très sévères. Les tableaux 16 et 17 en [Form.B 7 511] donnent des indications en retenant comme indice de sévérité le coefficient d'emboutissage lors d'une opération de rétreint :

- faible sévérité :  $m = 0,90$
- sévérité moyenne :  $m = 0,80$
- grande sévérité :  $m = 0,70$
- très grande sévérité :  $m = 0,60$

Le tableau 18 en [Form.B 7 511] concerne spécialement les lubrifiants employés dans le formage des aciers inoxydables.

## 4.3 Contrôle qualité

### 4.3.1 Objectifs

Le contrôle qualité permet de maintenir la productivité d'un atelier en limitant le taux de rebut excessif pouvant résulter :

- de la qualité de la matière première ;
- de la qualité des produits finis (conditions de fabrication).

La section contrôle existe pour aider la production et permettre une marche efficace de l'usine.

### 4.3.2 Moyens

#### 4.3.2.1 Qualité matière

Les métaux en feuilles peuvent être contrôlés par les essais normalisés (§ 1.3) (essais de traction, essais de dureté, essais d'emboutissabilité) ou par des essais représentatifs des conditions d'une fabrication donnée (essais simulatifs).

#### 4.3.2.2 Qualité du produit fini

L'aspect des pièces est contrôlé visuellement, absence de marque de l'outil, de striction, de vermiculures, etc.

Les cotes sont vérifiées au moyen des techniques classiques de métrologie (instrument de mesure, calibres mini, maxi, calibres de forme) pour les petites pièces rigides et par des gabarits pour les grandes pièces flexibles.

Les postes de contrôle sont situés près des postes de travail pour permettre une intervention rapide sur les conditions de fabrication.

## 4.4 Manutention

Pour toute unité de production, la manutention est l'un des facteurs déterminants de la productivité.

### 4.4.1 Manutention des pièces

En fabrication, entre opérations, la manutention est rendue automatique par outils à suivre, presses transferts, ou robots ; des dispositifs électriques (pilotes, capteurs de proximité) contrôlent le fonctionnement et stoppent les machines en cas d'incident.

Lors d'un travail en reprise, les presses peuvent être reliées par des bandes transporteuses (fixes pour les grandes séries, mobiles pour les séries moyennes). Évacuation des pièces par soufflettes à air comprimé, chute par gravité, etc.

En fin d'opération, le stockage des pièces est effectué dans des bacs que l'on peut gerber où, dans le cas de pièces volumineuses, il est utile de prendre certaines précautions pour éviter une détérioration des pièces au cours de l'empilage.

#### 4.4.2 Manutention des outillages et fixation sur presse

Pour les petits outils, le transport ne pose généralement pas de problèmes. Leur stockage prend beaucoup de place : certaines entreprises, dont le parc d'outillage est très important, utilisent un système de monte-charge qui prend les outils ou les range dans les casiers références. Pour assurer les besoins en outillage d'une chaîne de presses rapides (5 à 8 machines), il existe des systèmes quasi automatiques pour gérer les *entrées-sorties* des outillages en stock.

Le bridage des petits outils sur les presses peut être automatique moyennant un dispositif assez simple de guidage de butées et de brides pneumatiques qui positionnent les semelles (standardisées) sur la table de presse.

Pour les gros outils de l'industrie automobile en particulier, l'adaptation de fabrications par petites séries (diminution des stocks) a entraîné des temps morts très importants, dus aux changements fréquents d'outillages. Les tables de presses ont été ramenées au niveau du sol et conçues de façon à se mouvoir sur des rails. Pendant le travail de la machine, on monte un autre outillage sur une table en attente.

Le changement d'outil est réalisé par substitution des tables, et les temps morts sont encore diminués par l'adoption de bridages pneumatiques [26].

# Formage à la presse

par **René MARTIN**

*Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Mécanique de Nantes  
Ancien Chef du Service Mise en forme des matériaux  
au Centre Technique des Industries Mécaniques  
Directeur Technique Adjoint des Forges Barriol et Dallière*

## Bibliographie

### Références

- [1] GUYOT (J.). – *L'emboutissage des tôles minces. Méthodes et essais*. 83 p., bibl. (nombr. réf.), Dunod (1962).
- [2] CIRP. – *Vocabulaire des techniques de production mécanique*. Vol. 3 : *Travail des métaux en feuilles*, 136 p., Girardet.
- [3] MARTIN (R.) et CHABENAT (A.). – *Analyse des contraintes résiduelles. Application à la construction mécanique*. CETIM Inf. (F), n° 41, p. 35-42, bibl. (14 réf.), juin 1975.
- [4] MALONEY (J.P.). – (Aciers faiblement alliés de haute résistance pour la construction automobile). *Automotive Engng*, n° 7, p. 24, juil. 1974.
- [5] PAPAIZIAN (L.) et MARTIN (R.). – *Analyse de la formabilité des tôles minces par les coefficients d'écrouissage et d'anisotropie*. CETIM Inf. (F), n° 32, p. 34-7, oct. 1973.
- [6] MARTIN (R.), PAPAIZIAN (L.) et FERRON (A.). – *Propriétés plastiques d'écrouissage et d'anisotropie des métaux. Application à la formabilité par emboutissage à froid des tôles minces*. Mémoires Techn. CETIM (F), n° 23 (1976).
- [7] BRANDIS (H.) et FUNKE (P.). – *Nutzung des Kaltverfestigungsverhaltens nichtrostender Stähle beim Tiefziehen durch gezielte Temperaturführung* (Comportement à l'écrouissage d'aciers inoxydables en fonction de la température). *Blech. Rohre. Profile* (D), n° 3, p. 75-87, bibl. (43 réf.) (1975).
- [8] *La presse plieuse et le pliage*. *La Machine Moderne* (F), p. 12-5, fév. 1972.
- [9] WASSILIEFF (B.). – *Travaux et outillage à la presse*. 123 p., Dunod (1967).
- [10] BOUHELIER (C.), DEGAS (G.) et MARTIN (R.). – *Le pliage en U des tôles minces*. Mémoires Techn. CETIM, n° 20, juin 1974.
- [11] CHAUVELIN (G.). – *L'outillage de presse de type conventionnel*. 168 p., Desforges (1973).
- [12] *Metals handbook*. Vol. 4 *Forming*, 528 p., 8<sup>e</sup> éd., Am. Soc. Metals (1969).
- [13] EARY (D.F.) et REED (E.A.). – *Techniques of press working sheet metal* (Techniques du travail sur presse des tôles minces). 596 p., 2<sup>e</sup> éd., Prentice Hall Inc. (1974).
- [14] SCHULER (L.). – *Mémento découper emboutir*. 386 p., 4<sup>e</sup> éd., Ernst Klett (Édition Française) Schuler (L.) GmbH (1967).
- [15] SAPOLSKY (R.). – *Produire plus économiquement, plus vite, mieux et en toute sécurité par formage, grâce aux perfectionnements récents apportés aux presses mécaniques*. *Machine Moderne* (F), p. 33-40, sept. 1966.

- [16] DALLAS (D.B.). – *Progressive dies* (Outils à suivre). 300 p., McGraw Hill (1962).
- [17] CHAUVELIN (G.). – *Travail des métaux par déformation à froid*. 2 tomes, SEDOM (1971).
- [18] QUATREMER (R.). – *Cambrage. Découpage. Emboutissage*. (Aide-Mémoire Technique), Delagrave (1966).
- [19] *Aciers à outils*. – Chambre Syndicale des Producteurs d'Aciers Fins et Spéciaux, 3<sup>e</sup> éd., SEMAS (1974).
- [20] RABEY (A.). – *Bases de choix des aciers à outils*. 138 p., OTUA (1976).
- [21] COUTIN (R.) et MARTIN (R.). – *Méthodologie de mise au point des emboutis*. CETIM Inform. (F), n° 49, fév. 1977.
- [22] KACZMAREK (E.). – *Pratique des travaux à la presse*. 483 p., Dunod (1964).
- [23] CÆHLER (G.) et KAISER. – *Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge* (Découpage, poinçonnage et emboutissage). 719 p., Springer Verlag (1973).
- [24] ROMANOWSKI (W.P.). – *Handbuch der Stanzertechnik* (Formage sur presses). (Traduit du russe), 5<sup>e</sup> éd., VEB Verlag Technik (1965).
- [25] SCHEY. – *Metal deformation processes friction and lubrication*. 807 p., Marcel Dekker Inc. (1970).
- [26] ASTM. – *Tentative classification for metal working fluids and related materials*. ASTM Yearbook Designation 2881-70 T, p. 1059-60, juil. 1970.
- [27] *Gesellschaft für Tribologie und Schmierstechnik (GTS)*. In *der Metallumformung verwendete Werkstoffe* (La lubrification dans le formage des métaux) (Traduction CETIM/CDM réf. C/2 404), août 1971.
- [28] GROSLAMBERT. – *Méthodes d'évaluation des lubrifiants pour emboutissage*. Formage et traitements des métaux (F), n° 52, p. 29-33, mars 1974.
- [29] MARTIN (R.). – *La lubrification dans les procédés de mise en forme des métaux (les fluides de travail des métaux)*. Conf. AFTP, oct. 1975 ; Technip (p. 241-65) (1976).
- [30] RAULT et ENTRINGER. – *Comportement aux frottements de la microgéométrie des surfaces métalliques. Problèmes particuliers des tôles pour emboutissage*. Communication SFM Journées d'Automne, oct. 1976.
- [31] CHOPIN (R.). – *Emboutissage conique et filage par chocs*. *Rev. Aluminium* (F), p. 1147-54, déc. 1956.

### On consultera également

#### Formabilité des tôles

- MARTIN (R.) et VOISIN (J.B.). – *Les courbes limites de rupture et de striction des tôles minces*. CETIM Informations (F), n° 32, p. 38-45, oct. 1973.
- MARTIN et coll. – *Formabilité des tôles minces, application à l'emboutissage*. Document Techn. CETIM (F), 327 p., bibl. (nombr. réf.) (1974).
- POMEY (G.) et SANZ (G.). – *Aptitude à l'emboutissage des tôles minces. Les courbes limites d'emboutissage*. Collection IRSID-OTUA, avril 1976.

#### Conception des outils

- WILSON (F.W.) et HARVEY (P.D.). – *Dies design handbook* (Conception des outils). 2<sup>e</sup> éd., McGraw-Hill (1965).
- Guide pratique pour le travail des métaux en feuilles*. Document Techn. CETIM (F) (1975).
- MARTIN (R.), COUTIN (R.) et LECROISEY et coll. – *Outillages de presse. Conception et réalisation*. Document Techn. CETIM (F) (1976).

#### Revue française et étrangères

- Baender, Blech, Rohre** (D).
- Blech, Rohre, Profile** (D).
- Fertigungstechnik und Betrieb** (DDR).
- Formage et traitements des métaux** (F).
- Industrie Anzeiger** (D).
- Machine and Tool Blue Book** (USA).
- Machines Production** (anciennement **Machine Moderne**) (F).
- Machine-Outil** (F).
- Machinery and Production Engineering** (GB).
- Machines and tooling** (GB) (traduction de *Stanki i Instrument* SU).
- Matériaux et Techniques** (F).
- Metaalbewerking** (NL).
- Metal Progress** (USA).
- Metal Stamping** (USA).
- Metallurgia and Metal Forming** (GB).
- Metalworking Production** (GB).
- Métaux déformation** (F).
- Mitteilungen der DFBO** (D).
- Sheet Metal Industries** (GB).
- Stanki i Instrument** (SU).
- Transactions of the ASME**. Série J (GB).

## Constructeurs. Fournisseurs

### Presses

#### France

Bret SA (Sté des Presses et Cisailles).  
Ribail (Sté).  
Spiertz Presse (Sté Nouvelle).

#### Allemagne (République Fédérale)

Maschinenfabrik Müller-Weingarten AG.  
Schuler GmbH (L.).  
SMG (Süddeutsche Maschinenbau Gesellschaft mbH).

#### Belgique

Verson Europa SA.

#### États-Unis

USI-Clearing Division of US Industries Co.

#### Grande-Bretagne

Cincinnati Milacron UK Ltd.

#### Suède

ASEA AB.

**Accessoires de presses alimentation-évacuation** (voir également presses)

Diméco.

Normatic SA.

## Organismes français

Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM).  
Institut National de Recherche et de Sécurité pour la Prévention des  
Accidents du Travail et des Maladies Professionnelles (INRS).  
Syndicat de la Machine-Outil, de l'Assemblage et de la Productique Associée  
(SYMAP).  
Syndicat National du Découpage et de l'Emboutissage, Repoussage et  
Outillage de Presse (SNDE).