

I. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET DES TOLES D'EMBOUTISSAGE

I-1-1 : Pour les 3 catégories d'appellation : les aciers laminés à chaud, les aciers laminés à froid, les aciers à haute résistance, nous pouvons donner les valeurs suivantes des caractéristiques techniques.

Composition des aciers (% d'éléments d'addition)

Les aciers laminés à froid :

C de 0,08 à 0,1 %, Mn de 0,4 à 0,5%, Si 0,1%, S de 0,025 à 0,05%, Al 0,02%.

Les aciers laminés à chaud :

C de 0,08 à 0,1%, Mn de 0,4 à 0,5%, Si 0,04%, S de 0,025 à 0,035%, Al 0,02%.

Aciers à haute résistance :

C de 0,08 à 0,1%, Mn de 0,7 à 0,8%, Si 0,35%, S 0,03%, Al 0,02 à 0,08%,

Nb de 0,1 à 0,08 %, Ti de 0,01 à 0,12%, V de 0,01 à 0,08%.

Plage d'épaisseur des tôles obtenues

Les aciers laminés à froid : épaisseur de 0,3 à 3 mm.

Les aciers laminés à chaud : épaisseur de 1,5 à 12,5 mm.

Caractéristiques de dureté

Les aciers laminés à froid :

Nuance C : 65 HRb, Nuance E : 57 HRb, Nuance ES : 50 HRb

Les aciers laminés à chaud :

Nuance 1C : 70 HRb, Nuance 3C : 61 HRb

Aciers à haute résistance :

De 63 HRb pour le E275D (LAF) à 91 HRb pour le HE490D (LAC)

Caractéristiques de résistance (Re, Rm, A%)

Les aciers laminés à froid :

Nuance C : Re : 140 à 260 Mpa Rm : 280 à 380 Mpa A% : 28%

Nuance E : Re : 180 à 230 Mpa Rm : 300 à 360 Mpa A% : 34%

Nuance ES : Re : 160 à 210 Mpa Rm : 280 à 340 Mpa A% : 37%

Les aciers laminés à chaud :

Nuance 1C : Re : 200 à 330 Mpa Rm : 330 à 440 Mpa A% : 25 à 28%

Nuance 3C : Re : 220 à 280 Mpa Rm : 320 à 370 Mpa A% : 31 à 37%

Les aciers à haute résistance :

Re : 280 à 450 Mpa (E275D à E390D) laminé à froid,

Re : 280 à 500 Mpa (HE275 à HE490D) laminé à chaud,

Rm : 380 à 530 Mpa (E275D à E390D),

Rm : 365 à 650 Mpa (HE275 à HE490D),

A% : 21 à 28% (E390D à E275D),

A% : 13 à 28% (HE490D à HE275).

I-1-2 : On utilise les tôles laminées à froid (LAF), pour réaliser des emboutis difficiles ou pour des applications où l'aspect de surface est primordial. On distingue 2 qualités de tôles : les tôles commerciales destinées au pliage ou au formage simple et les tôles à indices de rugosité destinées aux opérations d'emboutissage.

Les **tôles commerciales**, destinées au pliage ou au formage simple, sont données avec des valeurs minimales d'allongement et de dureté. Elles sont définies essentiellement par une valeur de résistance et une garantie d'aptitude au pliage.

Les tôles à indices :

Les tôles d'indice **E**, élaborées en acier calmé avec une garantie de caractéristiques mécaniques de 6 mois. Ces tôles sont destinées aux **emboutis modérés**.

Les tôles d'indice **ES** sont élaborées en acier calmé avec un procédé permettant d'obtenir un acier non vieillissant. Ces tôles sont destinées aux **emboutis profonds** ou **très profonds**.

Deux autres indices de surface (défauts) viennent compléter la désignation. L'aspect **X** indique que l'on destine la tôle à la production de pièces non visibles. On tolère des défauts d'aspect.

L'aspect **Z** indique que l'on destine la tôle à la production de pièces visibles ou devant recevoir un revêtement de peinture. Aucun défaut d'aspect n'est toléré.

On utilise les **tôles laminées à chaud**, pour réaliser des **emboutis peu profonds** ou pour des applications où l'aspect de surface n'est pas primordial. Les qualités mécaniques ne sont garanties que 3 mois suivant la mise à disposition.

On distingue 2 qualités de tôles pour l'emboutissage : la qualité **1C** est élaborée en acier effervescent et est destinée aux **emboutis modérés** et la qualité **3C** est élaborée en acier calmé et est destinée aux **emboutis profonds**.

Les **tôles d'acier à haute résistance** (HLE, HR) sont définies pour avoir des **qualités importantes de résistance et d'endurance**. Elles sont plus **difficiles** à utiliser en **emboutissage** car en général le pourcentage d'allongement est nettement plus faible.

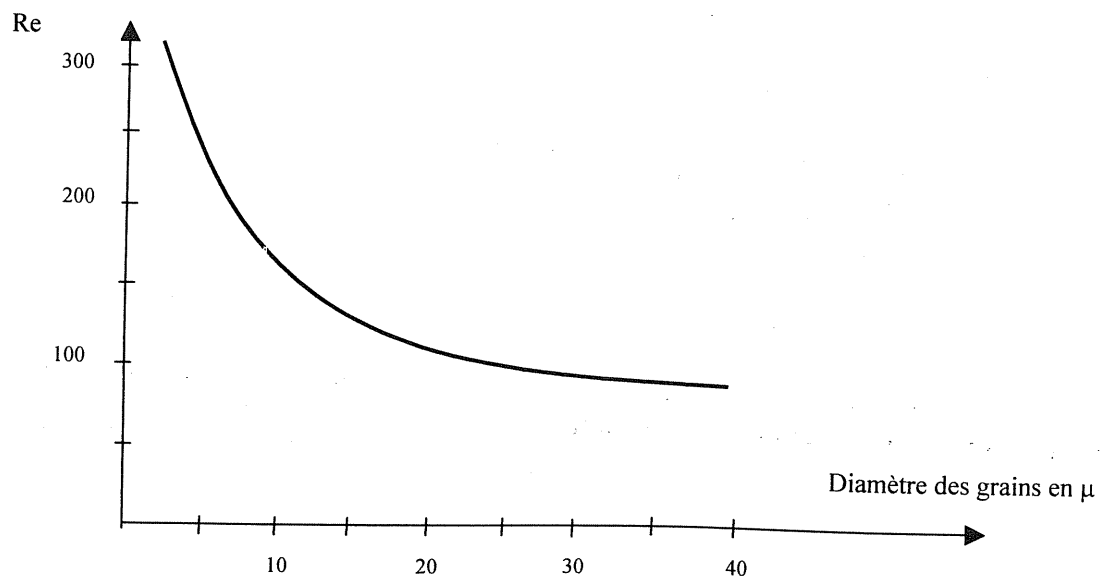
Ce qui fait ressortir une limite élastique plus élevée pour une résistance à la rupture un peu plus élevée. La plage du domaine plastique se trouve donc diminuée.

Ces tôles sont élaborées, par laminage à froid, pour les épaisseurs inférieures à 3 mm et à chaud pour les épaisseurs supérieures.

L'avantage de telles tôles est de permettre pour une **résistance égale** une diminution des épaisseurs et donc une **réduction du poids** de la structure.

I-2-1 : La limite élastique R_e peut être reliée au diamètre moyen des grains. La limite R_e augmente lorsque le diamètre des grains diminue.

On peut tracer la courbe représentant l'évolution de R_e en fonction de la taille des grains (diamètre).



I-2-2 : Après un **laminage à chaud**, l'état de **stabilisation** s'effectue en **laissant refroidir lentement** les bobines. Aucun traitement n'est réalisé pour l'emploi futur de ces tôles.

Après un **laminage à froid**, il faut faire une opération de **RECUIT** car la tôle s'est écrouie. Elle est donc très dure et ne pourrait facilement s'emboutir. En effet, des tensions internes ont pris naissance dans le métal, cela est dû aux déformations permanentes de grandes amplitudes générées par le laminage à froid.

Il faut rendre au métal écroui des caractéristiques plastiques en affinant ses grains. Le recuit s'effectue à 700° avec un refroidissement à l'eau à 100°.

Après ce recuit, la tôle est de nouveau **écrouie** par un laminoir (réduction d'épaisseur de 1 à 2%), de façon à lui rendre un durcissement superficiel qui permet «d'effacer» le palier élastique et de donner la rugosité nécessaire. Ce palier élastique s'explique par la formation de précipités de carbone et d'azote venant se fixer autour des dislocations après le refroidissement du recuit.

Normalement ces traitements sont inclus, dans le processus d'obtention des tôles laminées à froid qui sont commercialisées.

Lors des opérations d'emboutissage, la ligne de presse inclut au début des rouleaux «redresseur» (planeuse), qui permet d'obtenir sur la tôle le même effet que l'écrouissage lors de la fin du processus de laminage.

I-3-1 : L'acier E 275 D (Norme : NFA 36-203) est acier de type extra doux, calmé obtenu par laminage à froid dans les faibles épaisseurs inférieures à 3mm et par laminage à chaud dans les épaisseurs plus importantes.

C'est un acier à dispersoïdes (niobium – titane – vanadium) donc un acier micro-allié. Les éléments dispersoïdes sont des éléments que l'on retrouve dans des composés dispersés plus ou moins régulièrement dans la matrice de base du matériau, sous forme de carbures ou de carbonitrides.

Cet acier appartient à la famille des aciers HLE à dispersoïdes.

Dans cet acier nous retrouvons les éléments suivants : C (0,08% maxi), Mn (0,7% maxi), Si (0,35% maxi), P(0,025% maxi), Nb(0,01 à 0,06%), Ti(0,01 à 0,1%) et V(0,01 à 0,08 %).

Le A% n'est pas très élevé de 28%.

La résistance Re est de 280 à 330 Mpa dans le sens longitudinal.

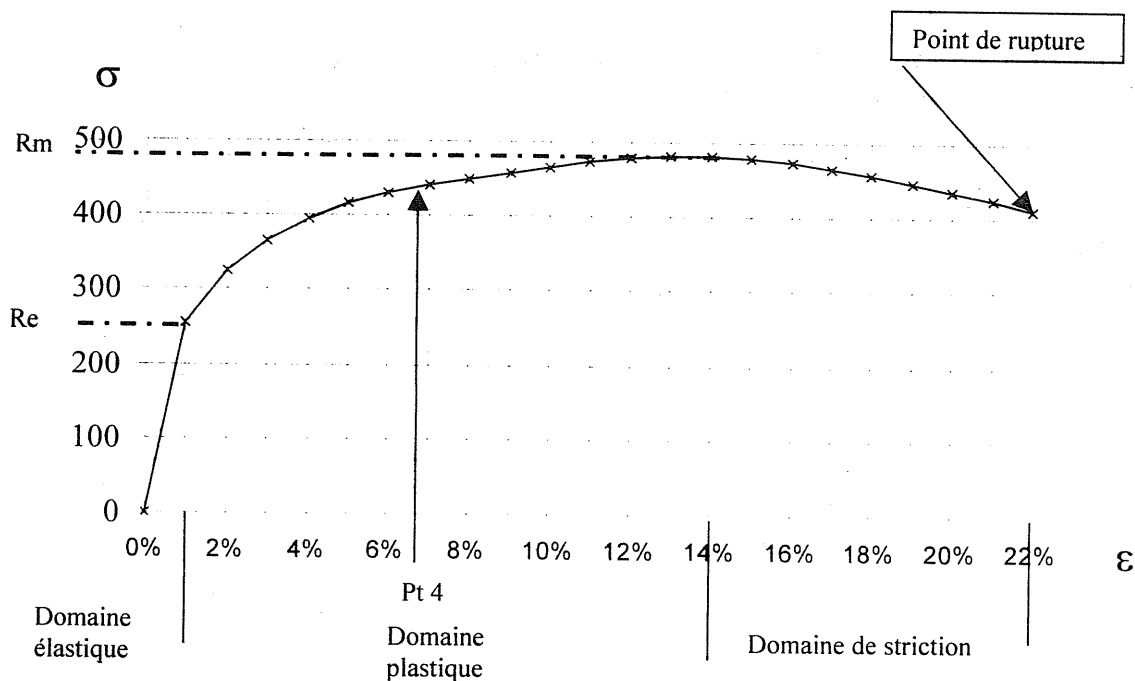
La résistance Rm est de 380 à 430 Mpa dans le sens longitudinal.

I-3-2 et I-3-3 :

L'essai numéro 4 a pour caractéristique :

N° mesure	L en mm	l en mm
4	53,52	12,04

Ceci nous permet de positionner le Pt 4 à l'abscisse $\epsilon = \ln (l / l_0) = \ln (53,52 / 50) = 6,80 \%$.



I-3-4 : La limite élastique **Re** est déterminée par la charge maximale que la tôle puisse supporter avant d'être déformée d'une façon permanente. En dessous de cette charge les allongements sont proportionnels aux charges et disparaissent avec elles. L'appréciation de cette limite sur la courbe proposée peut se faire en recherchant une discontinuité dans la courbe, ceci se situe en ce qui concerne le $\epsilon = 1\%$ donc $Re = 250$ Mpa.

La résistance à l'allongement ou la limite de charge à rupture **Rm** est déterminée par la charge maximale que la tôle puisse subir avant rupture. La valeur Rm correspond au point où l'on a $\epsilon = 14\%$ donc $Rm = 480$ Mpa.

Le coefficient d'allongement **A%** est déterminé après rupture d'éprouvette et correspond au rapport des longueurs $A\% = l_{\text{finale}} / l_{\text{initiale}}$.

On définit ϵ par l'expression $\epsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$ et on a $\epsilon_{\text{max}} = 22\%$.

On définit **A%** par l'expression, $A\% = \frac{l - l_0}{l_0}$.

Il en résulte que $A\% = \frac{l}{l_0} - 1 = e^\epsilon - 1 = 0,246 = 24,6\%$.

I-3-5 : Le coefficient d'érouissage **n** indique la faculté du matériau à compenser un allongement par une résistance opposée. Il caractérise l'aptitude du matériau à se déformer en expansion.

Au cours de l'essai de traction uniaxiale, on peut, dans un certain domaine d'allongement plastique, avant d'avoir atteint la charge maximale, relier la contrainte vraie σ et la déformation rationnelle ϵ par la représentation mathématique approchée suivante :

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (1)$$

avec : $\sigma = \frac{F}{S}$ (F : Effort appliqué, S : Section instantanée)

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} \quad (l_0 : \text{longueur initiale, } l : \text{longueur instantanée})$$

k : représente le coefficient de proportionnalité appelé rapport d'emboutissage

n : représente le coefficient d'écroutissage.

Le passage en logarithme de l'expression (1) nous donne : $\log(\sigma) = \log(k) + n \log(\varepsilon)$. On déduit que n est alors la pente de la droite obtenue.

$$n = \frac{\log(\sigma) - \log(k)}{\log(\varepsilon)}$$

Le prélèvement de plusieurs points dans la zone plastique, nous permettra de déterminer la valeur du coefficient n.

I-3-6 : Les résultats des mesures fournis dans le document I-B-1 nous permettent de déterminer les valeurs suivantes pour ε et par lecture des valeurs σ sur la courbe :

N° mesure	L en mm	ε	Log ε	σ	Log σ
1	50,51	0,010	-2	250	2,398
2	51,48	0,029	-1,538	360	2,556
3	52,48	0,048	-1,319	410	2,613
4	53,52	0,068	-1,167	440	2,643
5	54,50	0,086	-1,066	460	2,663
6	55,50	0,104	-0,983	470	2,672
7	56,45	0,121	-0,917	480	2,681
8	57,52	0,140	-0,854	480	2,681

Tous les points retenus appartiennent à la zone plastique et doivent donc participer au calcul pour la détermination de n.

Le calcul du coefficient de la droite passant au mieux de ces points ($\log \varepsilon$, $\log \sigma$) nous donne la valeur $n = 0,248$.

I-3-7 : Le coefficient d'anisotropie r marque la résistance à l'amincissement d'un matériau. C'est la conséquence de l'orientation des cristaux donnée par les opérations de laminage de la tôle. Ces opérations ont un caractère très directionnel. Le coefficient d'anisotropie r indique la faculté du matériau à accepter la déformation en Plan plutôt qu'en épaisseur.

Le comportement anisotrope est caractérisé par le rapport $r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3}$ dans lequel ε_2 et ε_3 sont respectivement les déformations rationnelles en largeur et en épaisseur de la tôle.

On peut mesurer r lors des essais de traction, en intégrant les variations de la longueur et de la largeur de l'éprouvette en partant du principe de la loi de conservation des volumes.

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$$

$$r = \frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} = \frac{-\log\left(\frac{l}{l_0}\right)}{\log\left(\frac{L}{L_0}\right) + \log\left(\frac{l}{l_0}\right)}$$

où L est la longueur et l et la largeur.

I-3-8 : Les résultats des mesures fournis dans le document I-B-1 nous permettent de déterminer les valeurs suivantes pour r et par lecture des valeurs σ sur la courbe :

N° mesure	L en mm	l en mm	r
1	50,51	12,43	1,239
2	51,48	12,30	1,237
3	52,48	12,17	1,236
4	53,52	12,04	1,228
5	54,50	11,92	1,229
6	55,50	11,80	1,233
7	56,45	11,69	1,233
8	57,52	11,57	1,231

Avec :

L_0 : Longueur initiale (entre repères) $L_0 = 50$

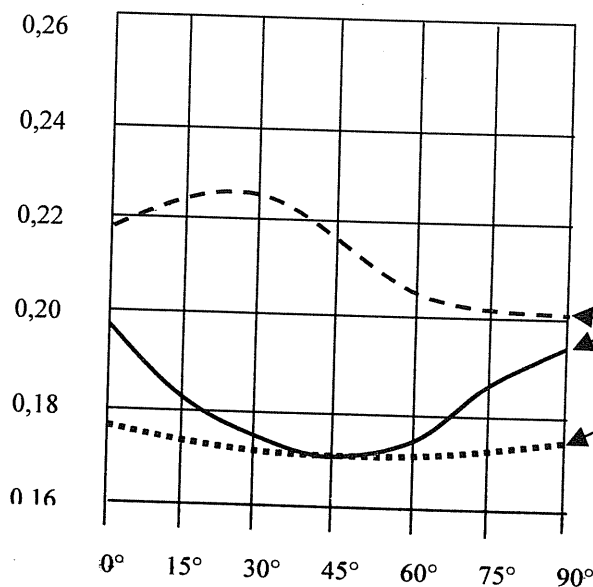
l_0 : Largeur initiale $l_0 = 12,5$

La valeur r que l'on peut retenir qui semble la plus conventionnelle serait la moyenne de ces valeurs soit $r_{\text{moy}} = 1,233$

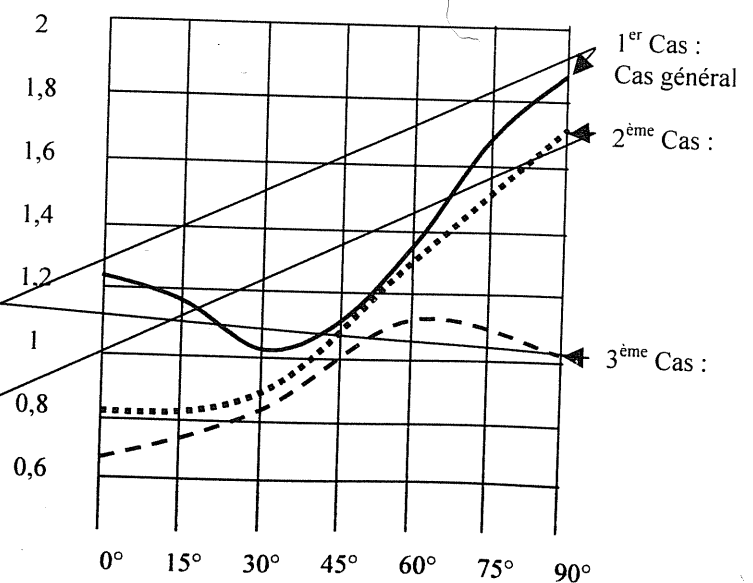
I-4-1 : Pour une tôle d'acier extra-doux, nous pouvons représenter l'évolution du coefficient d'érouissage n (voir Fig1) et l'évolution du coefficient d'anisotropie r (voir Fig2) en fonction de l'angle α caractérisant la direction générale de l'éprouvette, par rapport au sens de laminage.

Illustration avec 3 courbes d'acier extra doux permettant d'exposer les 3 cas possibles de courbes très représentatives

Variation du coefficient n



Variation du coefficient r (Fig 2)



I-4-2 : Comme nous venons de le constater, les valeurs des coefficients r et n varient avec la direction considérée de la tôle. On peut par des essais de traction dans les différentes directions (α), déterminer la valeur $r(\alpha)$ et $n(\alpha)$ correspondantes.

On peut définir une valeur représentative conventionnelle comme étant la moyenne pour chaque coefficient définie par :

$$\bar{r} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} r(\alpha) d\alpha \quad \text{et} \quad \bar{n} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} n(\alpha) d\alpha .$$

Plus couramment, on prend comme valeur moyenne pour les aciers la valeur donnée par les mesures suivant 3 directions à 0° , 45° et 90° . La valeur moyenne est alors définie par l'expression :

$$\bar{r} = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90}) \quad \text{et} \quad \bar{n} = \frac{1}{4}(n_0 + 2n_{45} + n_{90}).$$

I-4-3 : Le comportement des tôles permet d'établir des lois générales adoptées lors de l'emboutissage.

Si on désire réaliser **une déformation en expansion**, en accord avec le coefficient d'écroutissage n , ce dernier doit avoir une **valeur faible**.

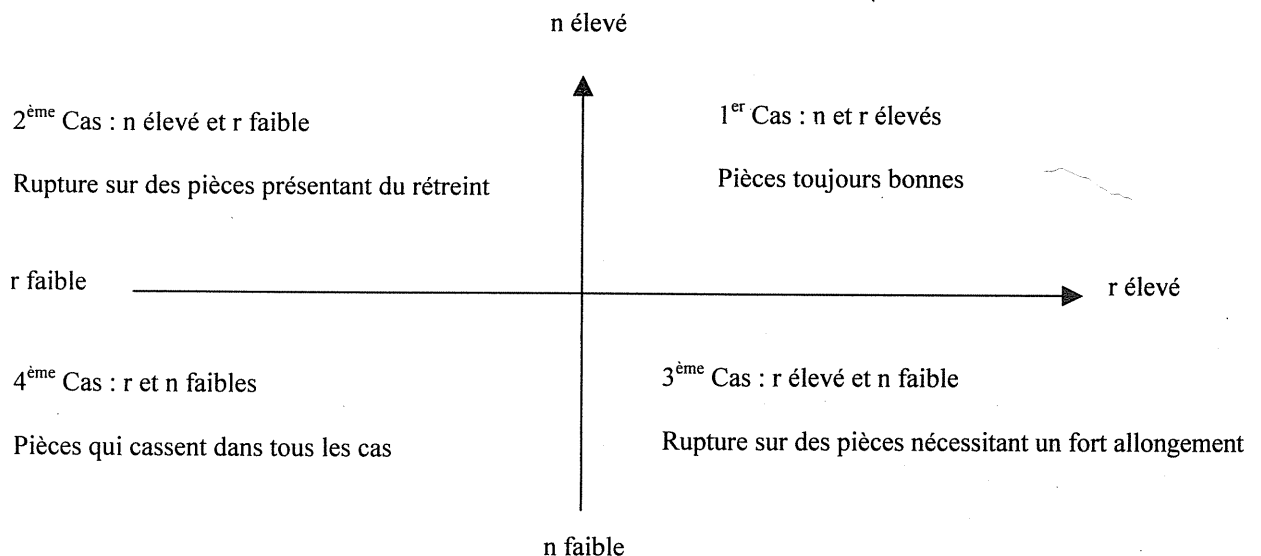
Si on désire réaliser **une déformation en rétreint**, en accord avec le coefficient d'anisotropie r , ce dernier doit avoir une **valeur forte**.

Si on désire réaliser **une déformation mixte** (en expansion et en rétreint) en accord avec le coefficient d'écroutissage n et le coefficient d'anisotropie r , ces derniers doivent avoir des **valeurs faibles** pour n et forte pour r .

Cependant si r et n ont tous les deux des **valeurs élevées** alors on pourra **réussir** l'embouti.

Si r et n ont tous les deux des **valeurs faibles**, on ira à **l'échec** lors l'emboutissage.

Ceci caractérise la prépondérance de l'anisotropie. On obtient le tableau suivant :



I-4-4 : La teneur en **carbone** dissous dans l'acier est prépondérante sur la caractéristique d'écroutissage. On obtient une zone de valeurs élevées du coefficient n ($n = 0,225$) pour des valeurs de 100 à 180 ppm de Carbone dissous.

Un augmentation de la teneur en **cuivre** permet d'apporter une amélioration de la résistance mécanique mais ceci s'effectue au détriment du coefficient d'écroutissage n qui diminue fortement (de $n = 0,22$ à 0% de Cu à $n = 1,7$ pour $0,4\%$ de Cu).

Le coefficient d'anisotropie tend à s'annuler pour une teneur en cuivre supérieure à $0,2\%$.

La teneur en **phosphore** peut conférer à l'acier une anisotropie intéressante donc un comportement remarquable lors d'emboutissage à rétreint dominant, pour cela il faut atteindre une teneur de $0,02\%$ de phosphore. Cependant les propriétés mécaniques sont alors légèrement inférieures à celles des aciers à très basse teneur en phosphore.

Le **titane** permet une augmentation plus importante du coefficient d'anisotropie que du coefficient d'écroutissage.

L'**aluminium** permet de stabiliser l'acier, il provoque simultanément une augmentation de r et de n grâce à la formation de nitrures d'aluminium pendant le recuit.

Au delà de $0,04\%$ d'aluminium le coefficient r atteint une valeur quasiment stable ($r = 1,7$).

Le **Nobium** accroît très fortement le coefficient d'anisotropie.

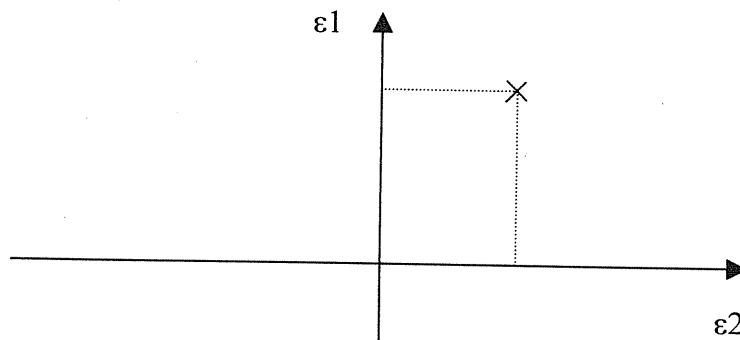
II-1-1 : La déformation d'un cercle en une ellipse, nous fournit deux valeurs de déformations ϵ_1 et ϵ_2 , caractérisant ainsi l'allongement dans les deux directions de mesure du cercle initial.

Les déformations ϵ_1 et ϵ_2 sont définis par les relations suivantes :

$$\epsilon_1 = (d_1 - d_0) / d_0 \text{ exprimée en \% (toujours positif)}$$

$$\epsilon_2 = (d_2 - d_0) / d_0 \text{ exprimée en \% (positif ou négatif)}$$

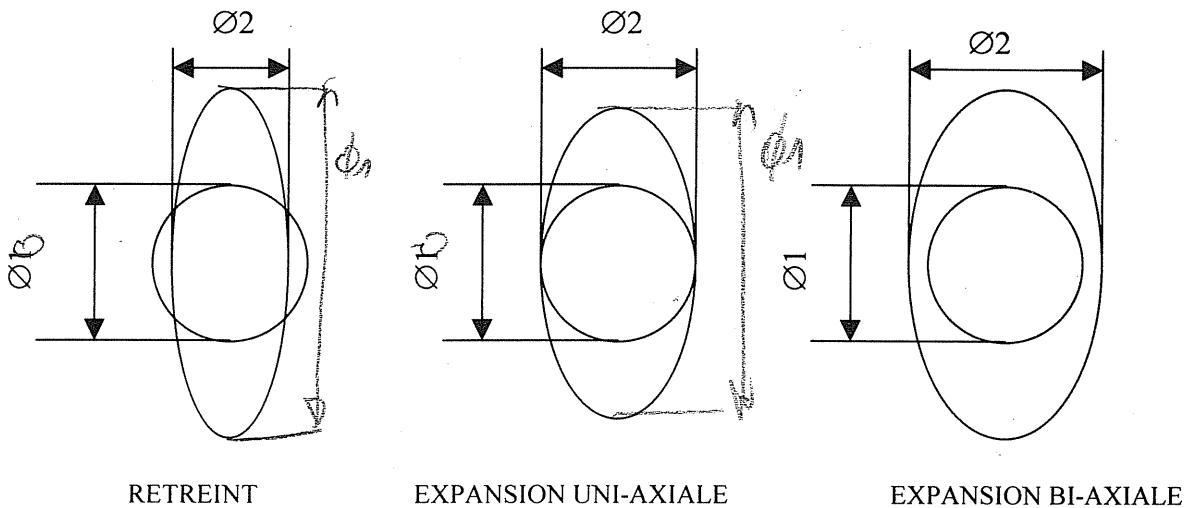
Ainsi il est possible de représenter dans un diagramme de déformations ϵ_1 et ϵ_2 , l'état de déformation à l'endroit donné.



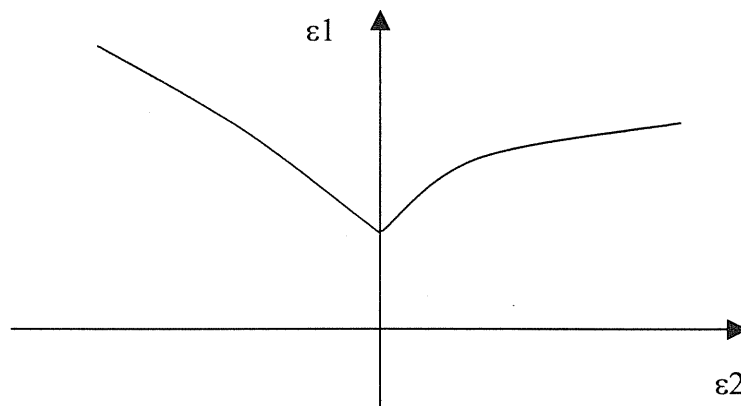
II-1-2 : Un cercle de la grille soumis en son centre à une sollicitation de type « expansion uniaxiale » donne une ellipse dont le plus petit des axes correspond au diamètre du cercle initial (voir : figure 1). Soit $\varnothing_2 < \varnothing_1$.

Un cercle de la grille soumis en son centre à une sollicitation de type « rétreint » donne une ellipse dont le plus petit axe a une dimension inférieure à la dimension du diamètre du cercle initial (voir : figure 2). Soit $\varnothing_2 = \varnothing_1$.

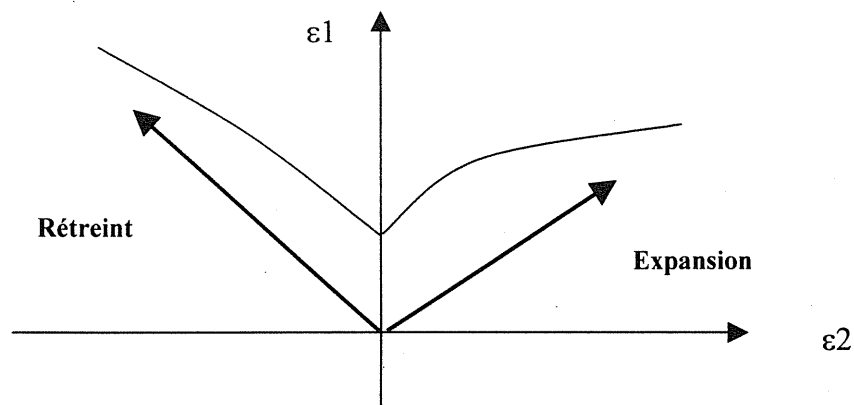
Un cercle de la grille soumis en son centre à une sollicitation de type « expansion bi-axiale » donne une ellipse dont le plus petit axe a une dimension supérieure à la dimension du diamètre du cercle initial (voir : figure 3). Soit $\varnothing 2 > \varnothing 1$.



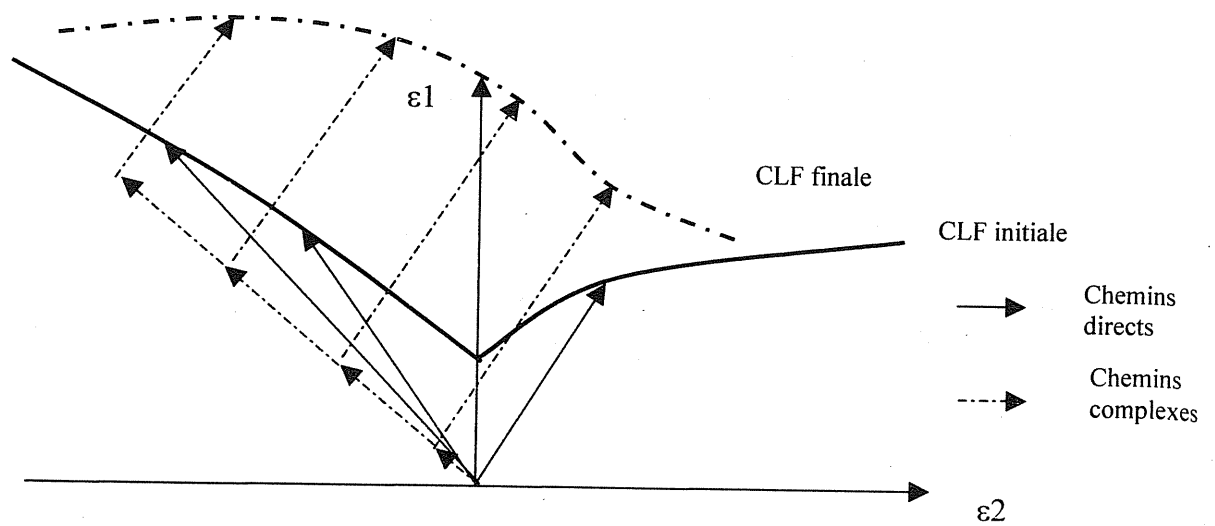
II-2-1 : Un acier extra doux a une courbe limite de formage qui a la forme suivante :



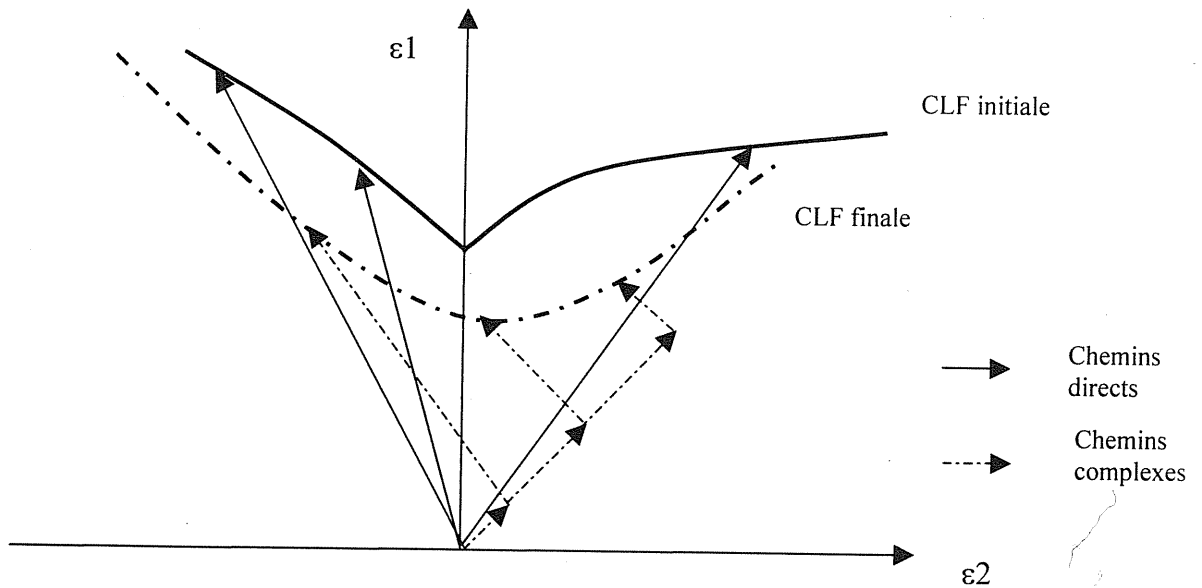
II-2-2 : Sur un diagramme $\varepsilon 1$ et $\varepsilon 2$, représenter une sollicitation de type "rétreint", une sollicitation de type "expansion".



II-2-3 : Lorsque la **déformation initiale se fait avec $\varepsilon 2 < 0$** (rétreint, traction simple), puis est suivie par la déformation en expansion, la courbe limite de formage se situe **au-dessus** de la courbe correspondant aux trajectoires simples (directes).



Lorsque la **déformation initiale** se fait avec $\varepsilon_2 > 0$ (expansion), puis est suivie par la déformation en rétreint, la courbe limite de formage se situe **au-dessous** de la courbe correspondant aux trajectoires simples (directes).



Si nous étudions la déformation généralisée équivalente, qui est donnée par l'expression

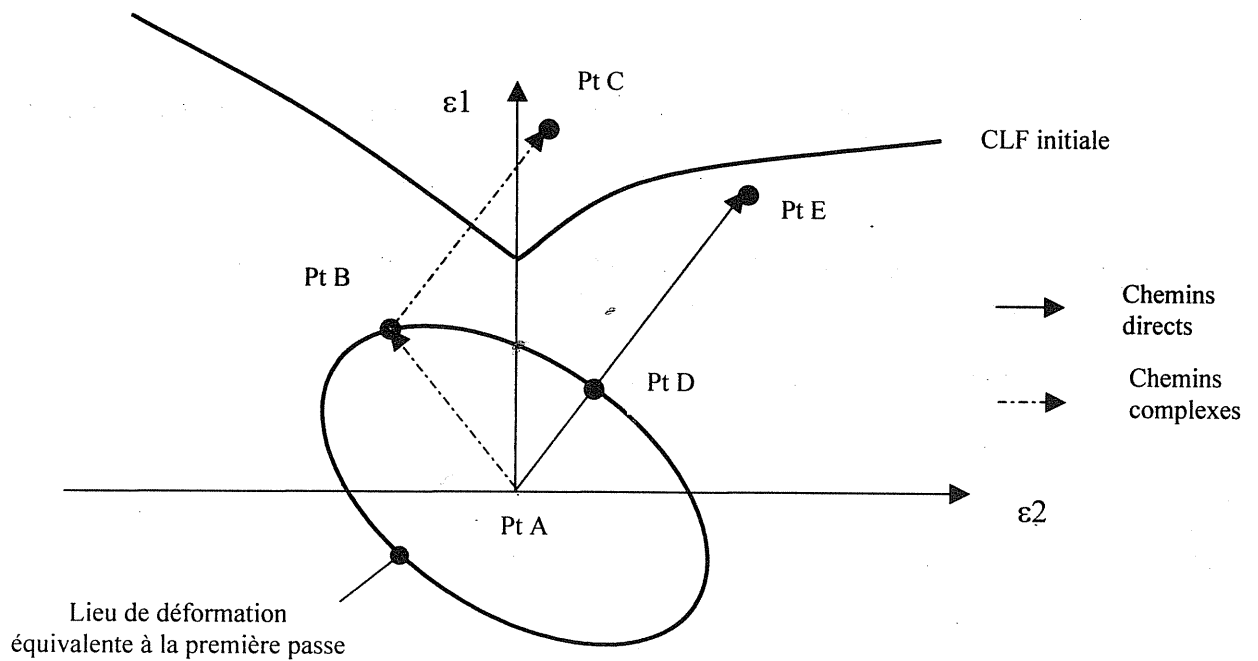
$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2)}$$

qui caractérise l'état de déformation.

Nous désirons avoir la valeur de déformation équivalente, la plus faible possible. Il faut envisager d'obtenir des valeurs négatives pour ε_2 .

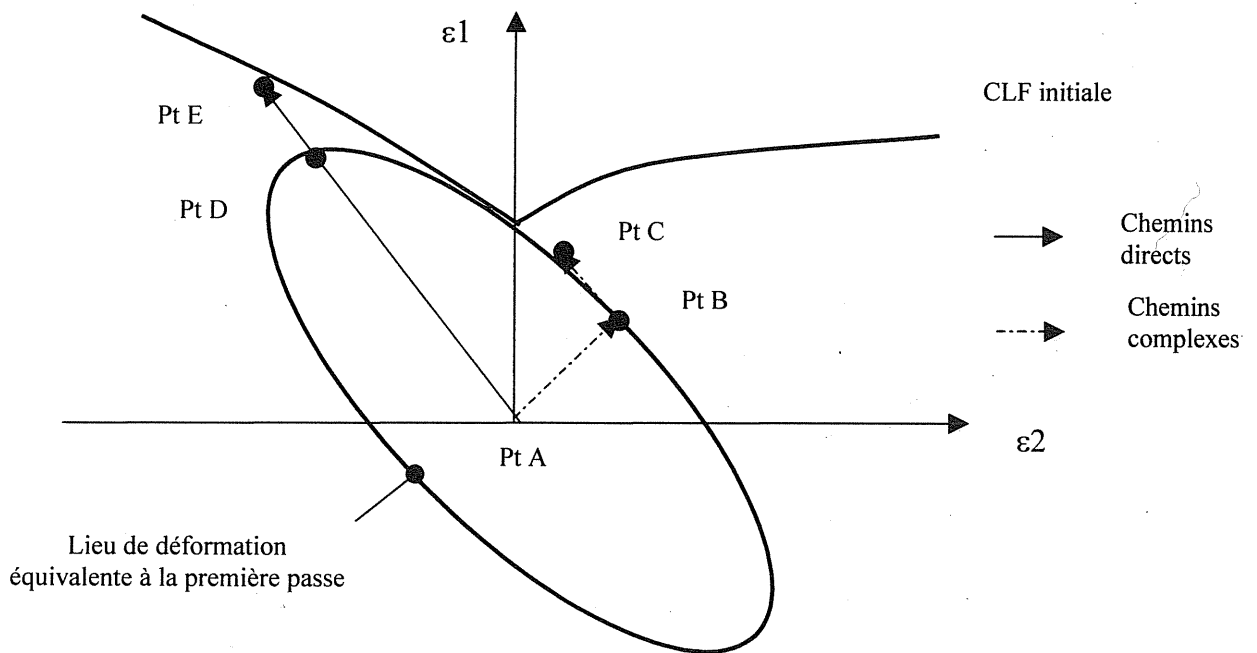
Étudions le fait de réaliser la première déformation par un rétreint (soit $\varepsilon_2 < 0$) en trajectoire rectiligne (Pt A - Pt B) puis la deuxième déformation rectiligne (Pt B - Pt C).

On constate que nous obtenons l'état de déformation suivant.



On constate que le point Pt B a la même déformation équivalente que le point Pt D.
 Lors de la deuxième passe du point Pt B au point Pt C, nous passons donc de l'état de déformation équivalente du point Pt D au point Pt E ($\vec{BC} = \vec{DE}$), donc le point Pt C se situe au dessus de la courbe limite de formage initiale (chemin direct).

Le fait de réaliser la première déformation par une expansion (soit $\epsilon_2 > 0$) en trajectoire rectiligne (Pt A - Pt B) puis la deuxième déformation rectiligne (Pt B - Pt C), nous permet de constater l'état de déformation suivant.



On constate que le point Pt B a la même déformation équivalente que le point Pt D.
 Lors de la deuxième passe du point Pt B au point Pt C, nous passons donc de l'état de déformation équivalent du point Pt D au point Pt E ($\vec{BC} = \vec{DE}$), donc le point Pt C se situe au dessous de la courbe limite de formage initiale (chemin direct).

II OUTILLAGE

I-1-1 : La longueur de la fibre neutre définissant la perte au pli est donnée par la relation :

$$\text{Perte au pli} = (\pi - A) \cdot (R + K e)$$

avec (rayon de pliage), $K = t/e$, t (distance de la fibre neutre par rapport au bord intérieur du pli), e (épaisseur de la tôle) et A (angle de pliage).

Ceci étant illustré par le schéma de la figure 1 :

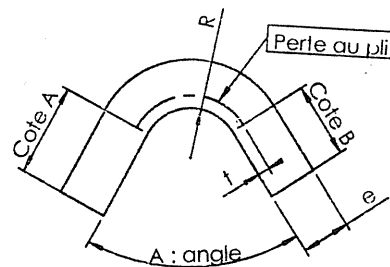


Figure 1

I-1-2 et I-1-3 : En ne prenant pas en compte la partie raidisseur central de la patte, le développement de la pièce (**Document 2**) en exploitant le principe de la « fibre neutre », donne le résultat suivant illustré par la figure 2.

En faisant des sections perpendiculaires aux divers plis de la pièce et aux divers endroits caractéristiques déjà prédéfinis par les sections du plan de définition Document II-B-1, nous obtenons des éléments que nous rabattons dans un plan.

On fera les hypothèses suivantes :

- Que les sections proposées sont les sections perpendiculaires aux plis – attention nous voulons des plis avec des rayons évolutifs. Les plans effectivement perpendiculaires aux plis sont assez proches des sections utilisées. On commet une erreur plus importante du côté du pli où le rayon est le plus important. Cette hypothèse est assez raisonnable pour une pré-étude.
- Que le facteur K défini dans la question précédente peut être approché par :

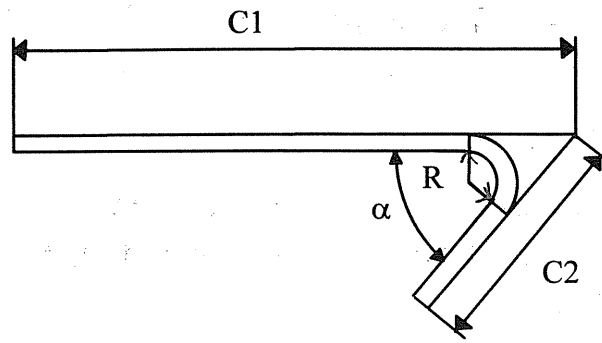
$$\text{Si } \frac{R}{e} \approx 1 \text{ alors } K = 1/3 = 0,33$$

$$\text{Si } \frac{R}{e} \approx 2 \text{ alors } K = 2/5 = 0,4$$

$$\text{Si } \frac{R}{e} \geq 3 \text{ alors } K = 1/2 = 0,5$$

Ces valeurs conventionnelles sont admises dans le domaine du pliage.

En se basant sur le principe du développement de la fibre neutre et en s'inspirant du croquis suivant :



Nous obtenons la longueur développée LT par la formule suivante que nous exploiterons par la suite.

$$LT = C1 + C2 - 2 \frac{(R + e)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + (\pi - \alpha)(R + Ke)$$

Pour la première section A-A :

Nous avons $C1 = 41,15$; $C2 = 149,17$; $R = 17$; $\alpha = 130^\circ$; d'où $K = 0,5$.
 Nous obtenons $LT = 188,60$

D'où une distance $EB = 188,60 - 16,83 - 63,97 - 52,58 = 55,22$ que l'on peut reporter sur le document II-C-1

Pour la première section B-B :

Nous avons $C1 = 16,27$; $C2 = 8$; $R = 0,83$; $\alpha = 90^\circ$; d'où $K = 0,33$.
 Nous obtenons $LT = 21,85$

D'où une distance $EG = 21,85$ que l'on peut reporter sur le document II-C-1

Pour la première section C-C :

Nous avons $C1 = 19,64$; $C2 = 8$; $R = 1,83$; $\alpha = 90^\circ$; d'où $K = 0,33$.
 Nous obtenons $LT = 24,79$

D'où une distance $FH = 24,79$ que l'on peut reporter sur le document II-C-1

Pour la première section G-G :

Nous avons $C1 = 14,2$; $C2 = 8$; $R = 0,7$; $\alpha = 90^\circ$; d'où $K = 0,33$.
 Nous obtenons $LT = 19,83$

D'où une distance $EI = 19,83$ que l'on peut reporter sur le document II-C-1

Pour la première section H-H :

Nous avons $C1 = 16,2$; $C2 = 8$; $R = 2,72$; $\alpha = 90^\circ$; d'où $K = 0,4$.
 Nous obtenons $LT = 21,11$

D'où une distance $JK = 21,11$ que l'on peut reporter sur le document II-C-1

II-1-1 : Une solution d'avant projet de gamme d'obtention de la pièce avec un outil à suivre peut être la suivante :

Poste 1 : Poinçonnage du trou pilote

Poste 2 : Réalisation de l'emboutissage du raidisseur central.

Il y a beaucoup d'avantages à effectuer cette opération en premier.

Cela nous évite :

- D'effectuer de nombreux calculs (déformations – longueurs développées) pour la détermination de la forme de la pièce avant et après emboutissage.
- De mettre au point l'outillage du fait que cette opération est réalisée en premier.
- Toutes les influences qu'auraient eu cette opération sur les positions et les formes obtenues précédemment.
- De perturber la réalisation des poinçonnages des trous pilotes pour la conduite de la tôle et de la pièce.

Il y a aussi un inconvénient, c'est l'augmentation des efforts pour réaliser le pliage à 130° du fait de l'existence de ce raidisseur.

Poste 3 : Poinçonnage des trous oblongs, du trou de $\varnothing 6,5$ et du trou carré de 8 x 8

Poste 4 : Découpage – Encochage

Poste 5 : Pliage de la patte à 130°

Poste 6 : Pliage des 2 pattes aux rayons de pliage évolutifs – Rabat de bords

Poste 7 : Séparation de la pièce de la bande

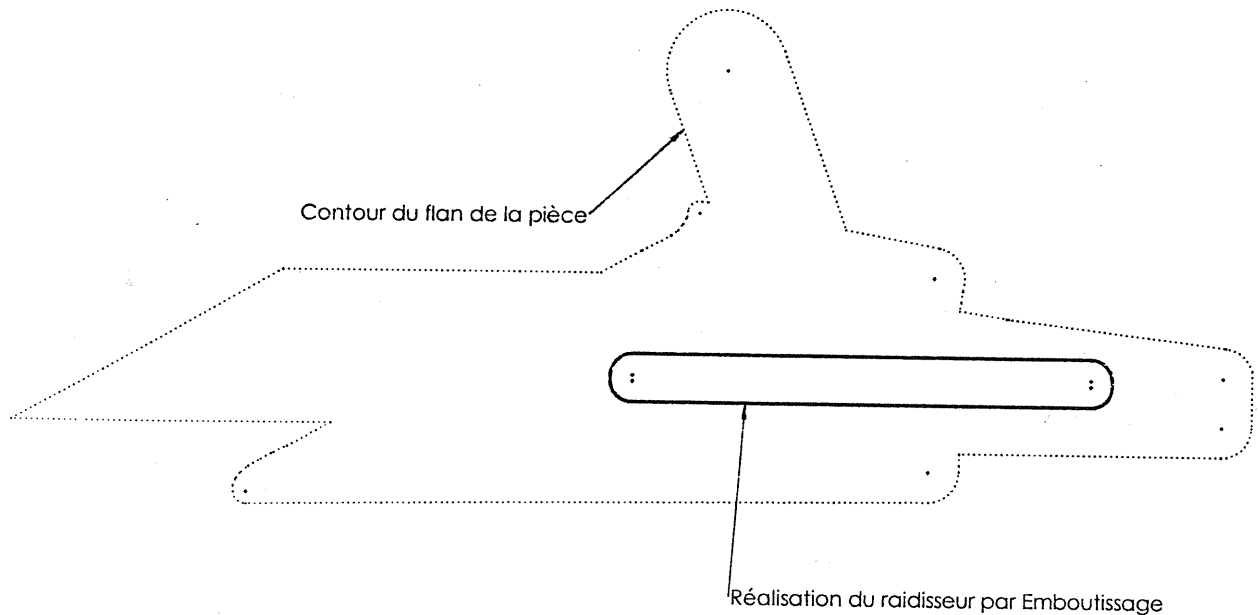
II-1-2 : Avant de réaliser la mise en bande (orientation de la pièce et la position des silhouettes les unes par rapport aux autres), nous allons définir la succession des postes et des opérations à réaliser.

Poste 1 : Poinçonnage du trou pilote

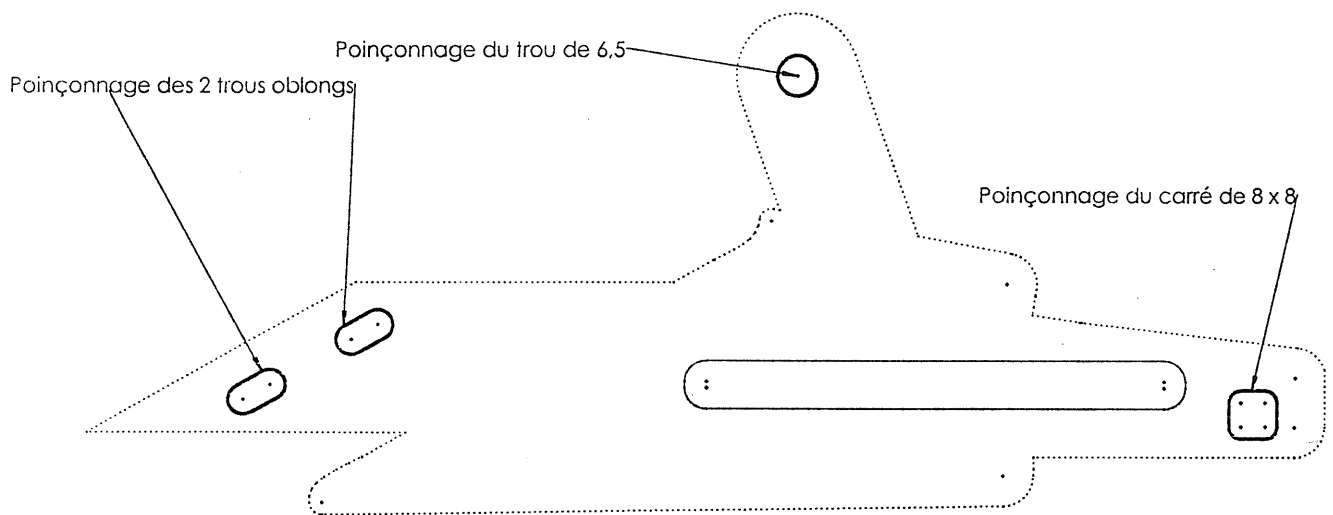
On ne peut pas utiliser le trou de diamètre 6,5 de la pièce du fait que celui ci se situe sur un élément qui sera rabattu par la suite.

La position de ce trou se fera donc sur une partie de la tôle qui sera par la suite découpée en sortie de l'outillage à suivre. En fonction de la mise en bande, on pourra donc positionner ce trou pilote plus précisément. Il faudra penser à éloigner le poinçon réalisant ce trou des éléments réalisant le raidisseur.

Poste 2 : Réalisation de l'emboutissage du raidisseur central.



Poste 3 : Poinçonnage des trous oblongs, du trou de $\varnothing 6,5$ et du trou carré de 8×8

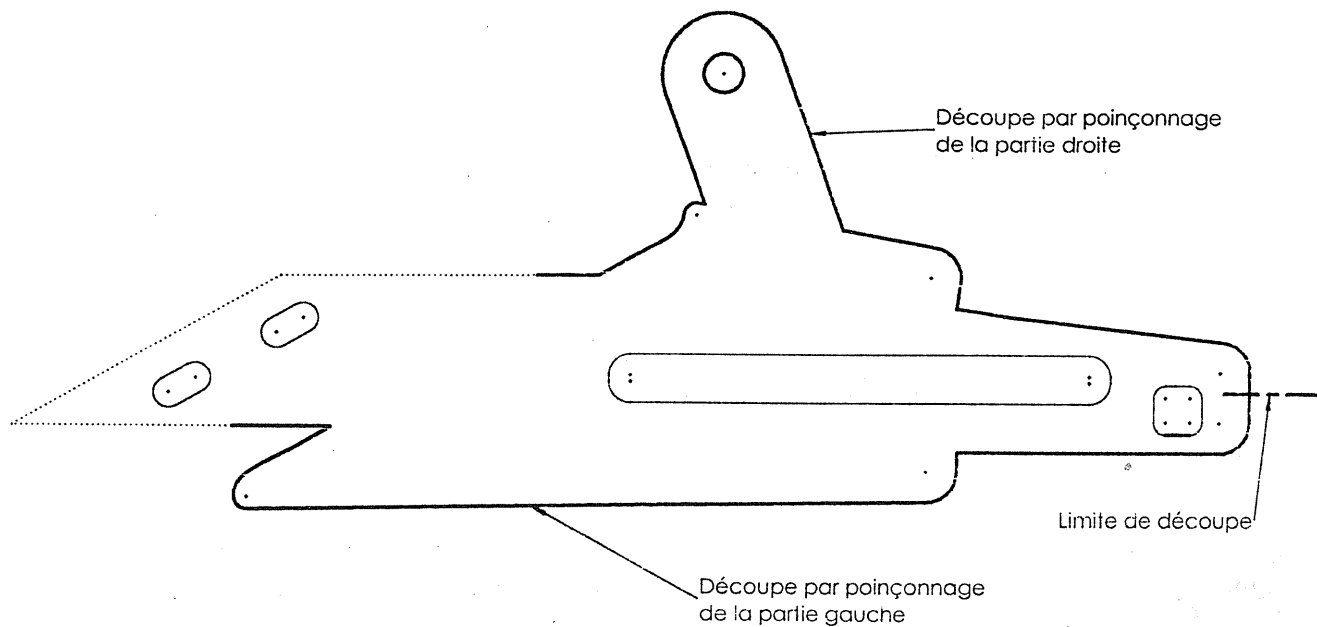


Poste 4 : Découpage – Encochage

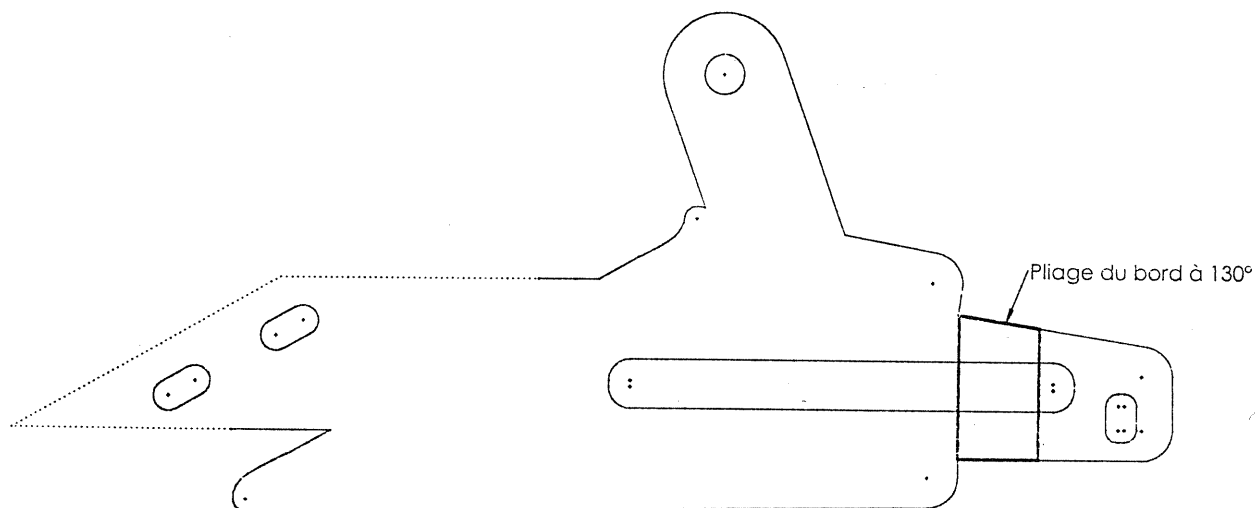
La forme des divers poinçons de découpe devra tenir compte :

- de la mise en bande réalisée,
- des opérations futures à réaliser,
- de la liaison avec par le squelette pour la tenue de la pièce et la rigidité du squelette par la suite,
- et de la position du trou pilote.

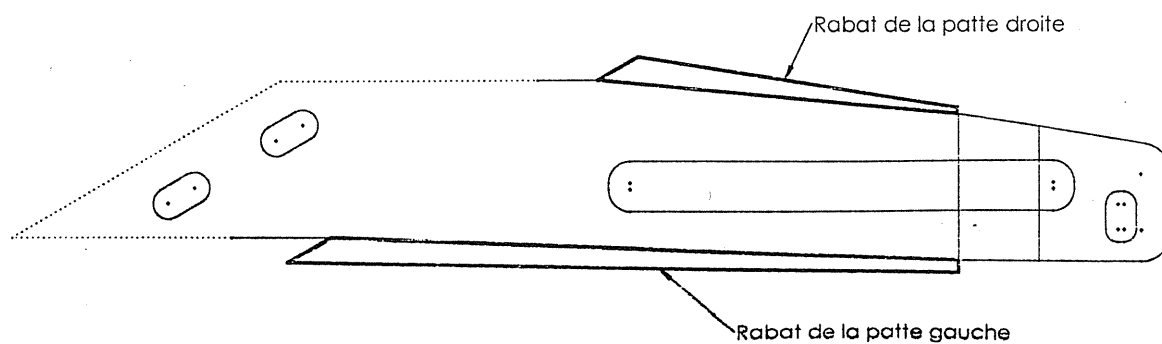
Ce qui veut dire que l'on pourra lors de la mise en bande définie, réaliser la découpe de la partie droite sur la pièce i et la découpe de la partie gauche sur la pièce $i+1$. La limite de la découpe ou de la séparation des poinçons se situera au niveau de la ligne de découpe représentée.



Poste 5 : Pliage de la patte à 130°
 On exécutera alors le pliage de la patte à 130°.

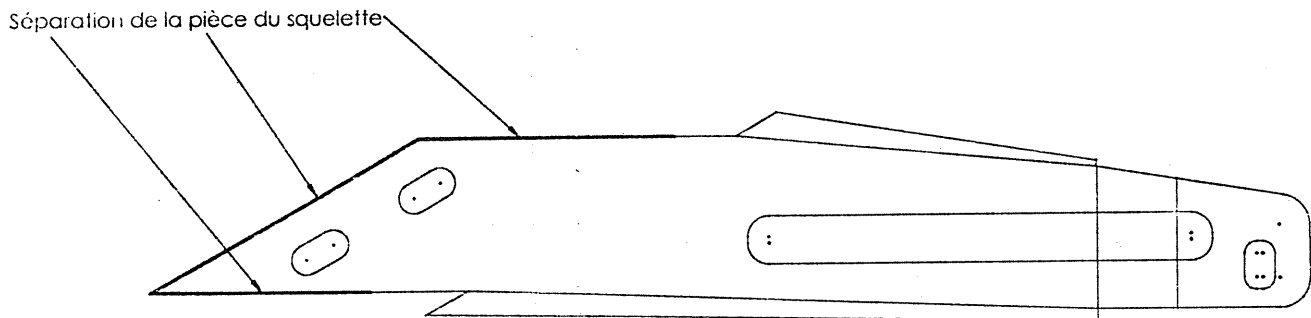


Poste 6 : Pliage des 2 pattes aux rayons de pliage évolutifs – Rabat de bords



Poste 7 : Séparation de la pièce de la bande

La définition de la séparation sera établie lors de la mise en bande. Lors de la mise en bande, il faut envisager la rigidité du squelette, par une continuité dans la bande.



II-2-1 : Au regard des études précédentes, le nombre de poste de l'outillage est de 7. Les opérations ont été définies précédemment, il ne reste plus qu'à définir l'orientation de la pièce dans la bande, cela nous donnera le pas et la largeur de bande.

On part du fait que les silhouettes doivent rester parallèles les unes aux autres tout au long du processus.

En réalisant les découpes des silhouettes et en appliquant les préconisations pour une mise en bande (zones des poinçons entre eux et zones des poinçons et bords de tôle), on peut faire glisser les silhouettes les une par rapport aux autres.

Nous obtenons une mise en bande en essayant d'optimiser le nombre de pièces produites par rapport à la consommation matière avec les caractéristiques suivantes :

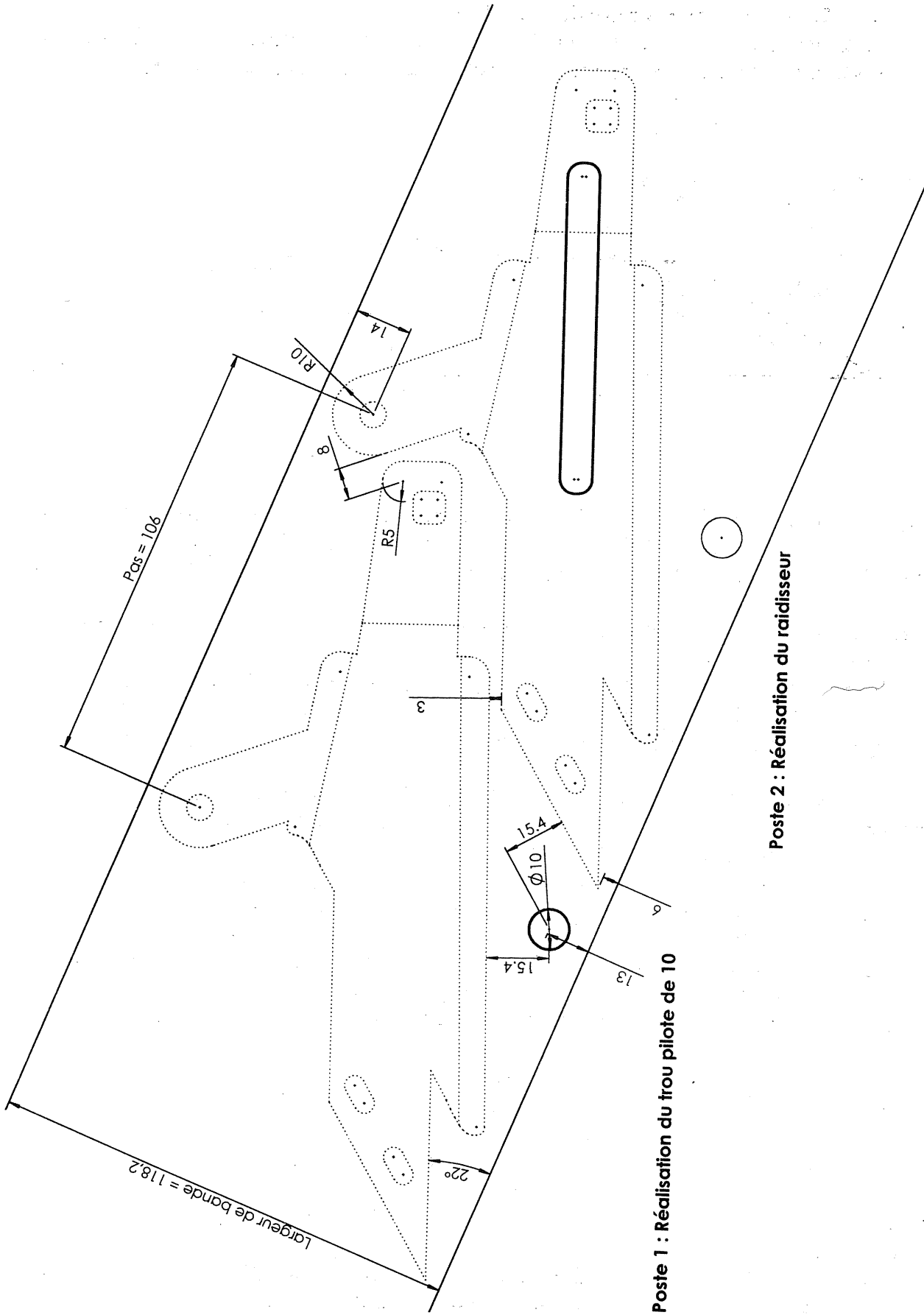
- le nombre de poste de l'outillage égal à 7
- la définition des opérations et des formes des poinçons (voir schéma),
- l'orientation générale de la pièce par rapport à l'axe de l'outil est de 22°
- le pas retenu est de 106,
- Le format de la tôle prévu (largeur) est de 118,2 du fait que pour réaliser les

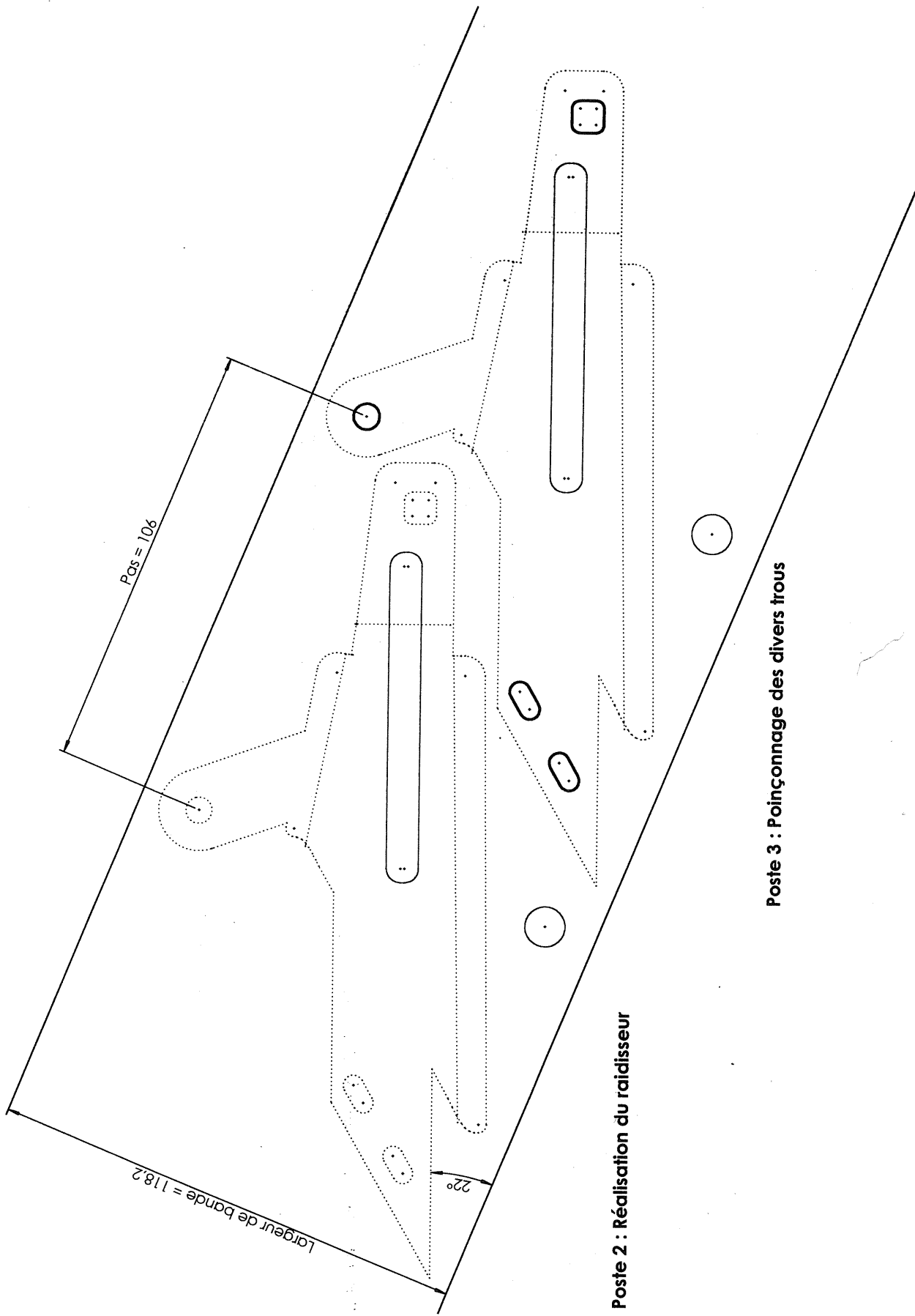
découpes de contour, il faut donner une certaine largeur au squelette pour maintenir l'ensemble. Si cette largeur de squelette est insuffisante, toute augmentation entraînera une augmentation du pourcentage de chute.

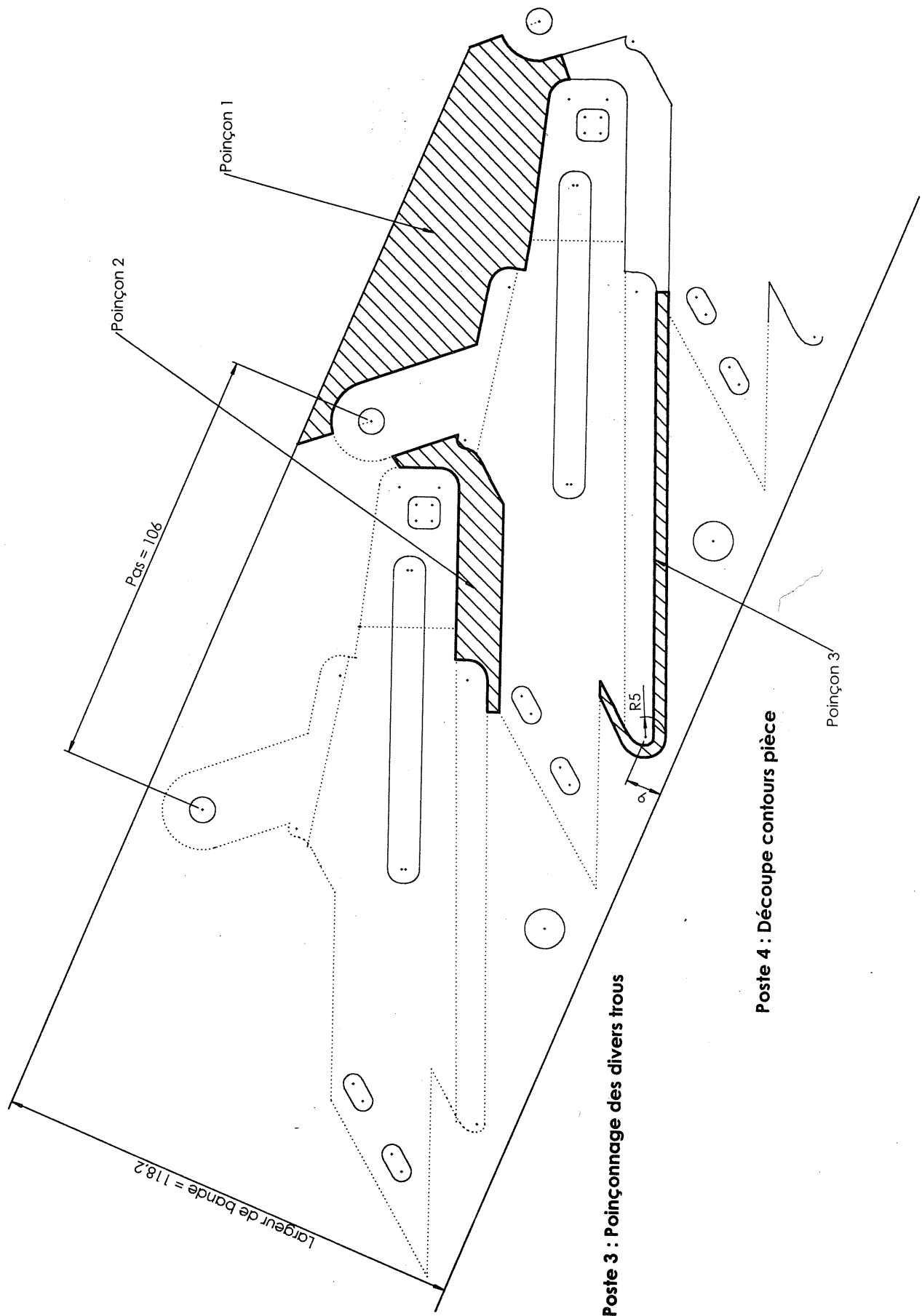
- le pourcentage de chute envisagé est de
- $$46,4\% = [(118,2 \cdot 106) - 6720] / (118,2 \cdot 106)$$

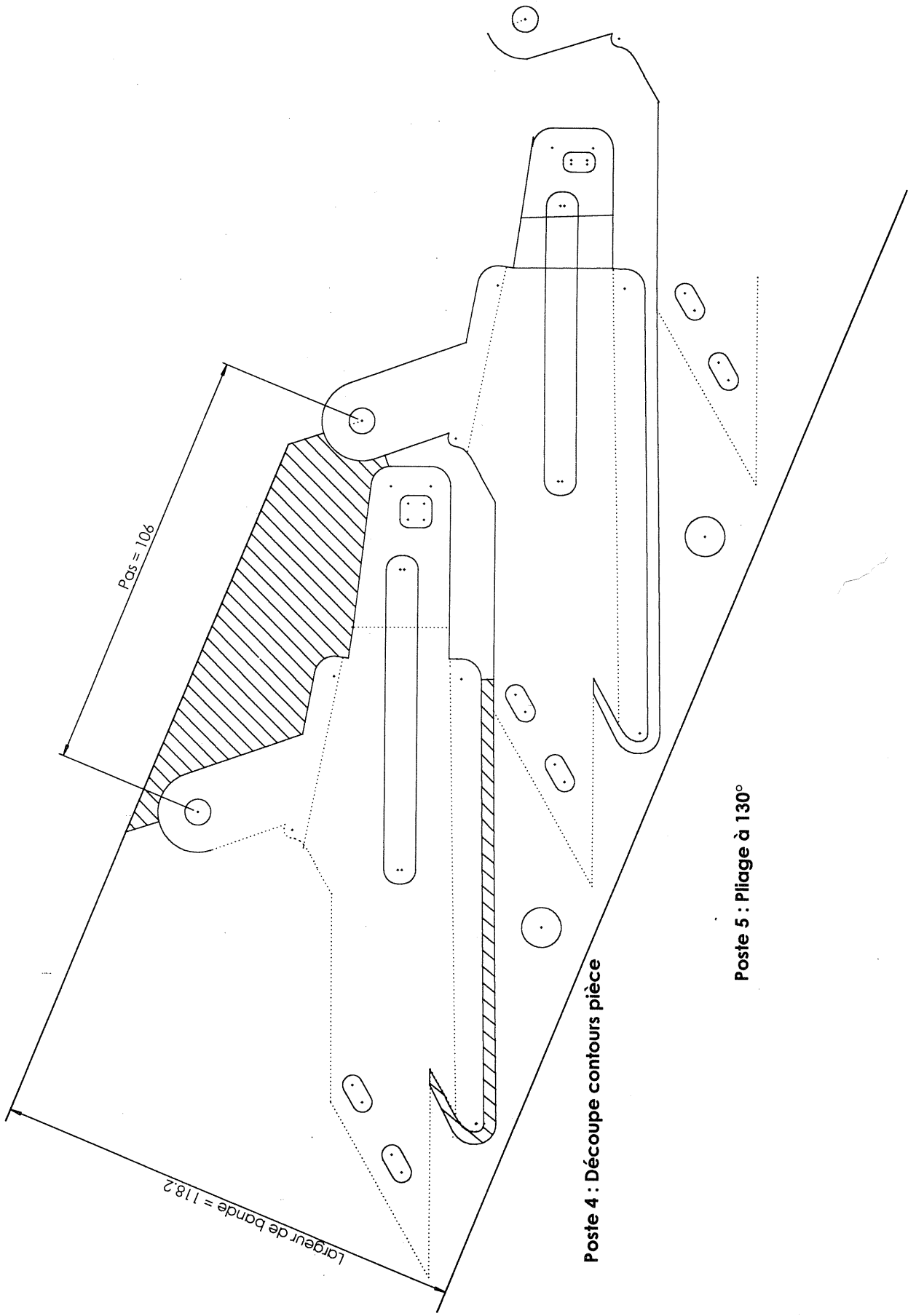
La solution proposée peut poser problème au niveau des courses dans l'outillage. La patte droite venant à l'intérieur de l'outillage, nous aurons des courses importantes pour éviter les éléments ayant participé à sa réalisation. On devra établir une cinématique de l'outillage complexe.

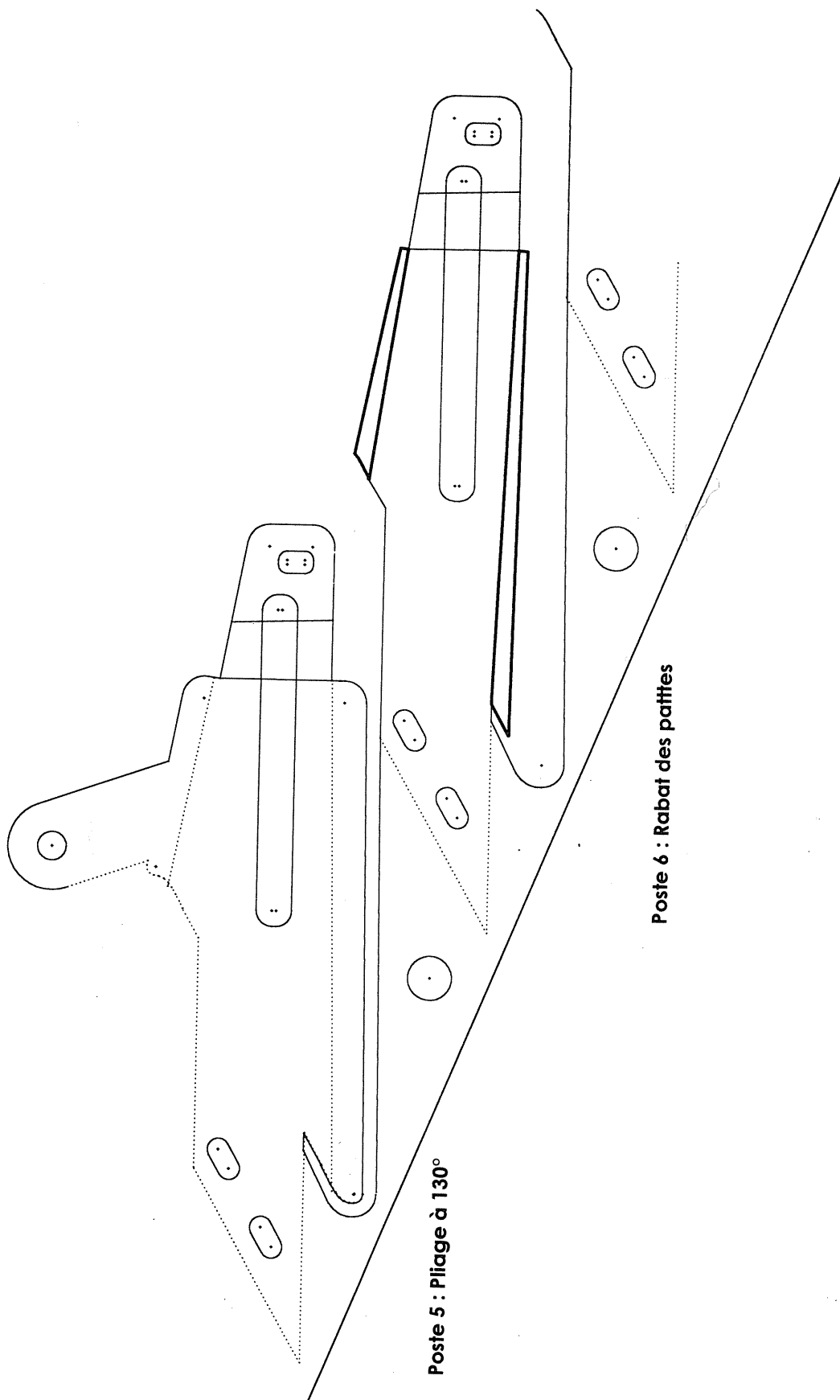
On peut envisager de retourner la silhouette de façon à réaliser cette patte en la relevant plutôt qu'en l'abaissant. Les courses alors nécessaires sont plus facilement envisageables.

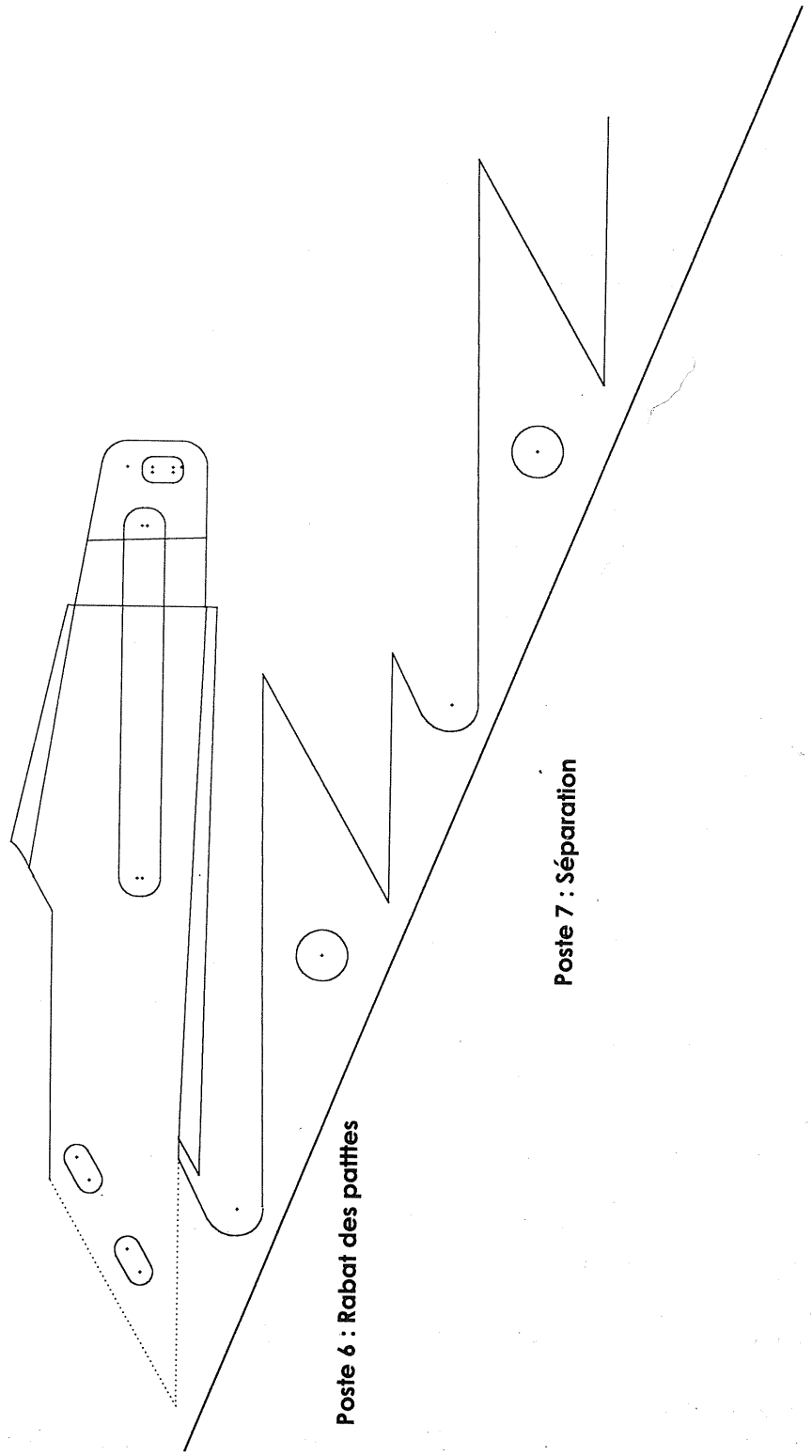












Poste 6 : Rabat des pattes

Poste 7 : Séparation

II-3-1 : Calcul des efforts au poste 1 : Poinçonnage du trou pilote de 10

La matière E 275 D à une résistance à la rupture de 480 Mpa (voir première partie).

$$F = R_c \cdot S \quad \text{avec} \quad R_c = \text{résistance au cisaillement} = 0,8 R_m = 384 \text{ N/mm}^2$$
$$S = \text{section cisailée} = \pi D e = 3,14 \cdot 10 \cdot 1,4 = 43,96 \text{ mm}^2$$

$$D'où : F(\text{poste1}) = 16\,880 \text{ N}$$

Calcul des efforts au poste 2 : Raidisseur

Le calcul de l'effort pour emboutir le raidisseur peut être approché par la relation.

$$F = e R_m (2 k_a r + k_b L)$$

avec r rayon du raidisseur (fibre neutre) $r = 3,1 \text{ mm}$
 $k_a = 0,5$ car c'est un embouti peu profond
 $k_b = 0,5$ écoulement facile et faible valeur de serre-flan
 $L =$ longueur linéaire des parois du raidisseur
 $L = 2 (6,67 + 14,8 + 53,67 + 2) = 154,28 \text{ mm}$

$$D'où : F(\text{poste2}) = 53\,920 \text{ N}$$

Calcul des efforts au poste 3 : Les divers poinçonnages

Le carré de 8×8 avec des congés de 2

$$F_1 = R_c \cdot S = 384 \cdot [((4 \cdot 4) + (\pi \cdot 4))] \cdot 1,4 = 15\,354 \text{ N}$$

Les trous oblongs de 10×5

$$F_2 = R_c \cdot 2 S = 384 \cdot 2 \cdot [5 + 5 + (\pi \cdot 5)] \cdot 1,4 = 27\,633 \text{ N}$$

Le trou de diamètre 6,5

$$F_3 = R_c \cdot S = 384 \cdot (\pi \cdot 6,5) \cdot 1,4 = 10\,972 \text{ N}$$

$$D'où F(\text{poste3}) = F_1 + F_2 + F_3 = 53\,959 \text{ N}$$

Calcul des efforts au poste 4 : Découpage

Il s'agit ici de déterminer les longueurs à cisailier, de chaque poinçon.

Poinçon 1 : On ne cisaille pas le bord de tôle, il y aura recouvrement du poinçon avec le bord de tôle. Les valeurs sont les valeurs mesurées ou calculées pour les arcs de cercle.

La longueur cisailée sera de :

$$L = 9 + 15,7 + 31 + 16 + 7,85 + 3 + 8 + 36 + 7,85 + 6 + 15,7 + 6 + 9 \approx 171 \text{ mm}$$

Avec les arcs de cercle (en italique) de rayon 10 de longueur 15,7 et les arcs de cercle de rayon 5 de longueur 7,85.

On obtient comme effort $F = 384 \times 1,4 \times 171 = 91\,930 \text{ N}$

Pour le poinçon 2 :

$$L = 3 + 17 + 1 + 3,14 + 18 + 52 + 3 + 7,85 + 3 + 43 + 7,85 + 10 \approx 159 \text{ mm}$$

On obtient comme effort $F = 384 \times 1,4 \times 159 = 85\,480\text{ N}$

Pour le poinçon 3 :

$$L = 3 + 111 + 7,85 + 7,85 + 13 + 4 + 13 + 3,14 + 3,14 + 111 \approx 277\text{ mm}$$

On obtient comme effort $F = 384 \times 1,4 \times 277 = 148\,915\text{ N}$

$$D'où : F(\text{poste4}) = 91\,300 + 85\,480 + 148\,915 = 326\,325\text{ N}$$

Calcul des efforts au poste 5 : Pour déterminer l'effort à exercer lors de la réalisation du pli à ce poste, il faut savoir que les efforts dépendent principalement :

- de la matière,
- du jeu entre le poinçon et la matrice pour ce matériau, il correspond à 8 à 10% de l'épaisseur soit 0,11 à 0,14 mm
- des conditions de lubrification,
- du rayon du poinçon (ici imposé rayon à 17mm),
- et les rayons de la matrice (Rayon = 3 à 5 x épaisseur = 4 à 7 mm).

On prend comme relation permettant d'approcher cette valeur, la relation très approchée suivante :

$$F = 0,5 R_m e L = 0,5 \times 480 \times 1,4 \times 25 = 8\,400\text{ N}$$

$$F(\text{poste5}) = 8\,400\text{ N}$$

Calcul des efforts au poste 6 : Pour déterminer les efforts lors de la réalisation des plis à ce poste, il faut savoir que les efforts dépendent principalement :

- de la matière,
- du jeu entre le poinçon et la matrice pour ce matériau, il correspond à 8 à 10% de l'épaisseur soit 0,11 à 0,14 mm
- des conditions de lubrification,
- des rayons du poinçon (ici imposés par les rayons évolutifs de 0,5 mm à 3,5 mm),
- et les rayons de la matrice (Rayon = 3 à 5 x épaisseur = 4 à 7 mm).

Dans notre cas, il faut exercer environ 30 daN par mm de longueur pliée pour le rayon de 0,5 à 10 daN par mm pour le rayon de 3,5.

En simplifiant et en se fixant comme valeur moyenne représentative 20 daN par mm, et en mesurant les longueurs sur les documents, on obtient :

pour la patte droite une longueur de 49 mm

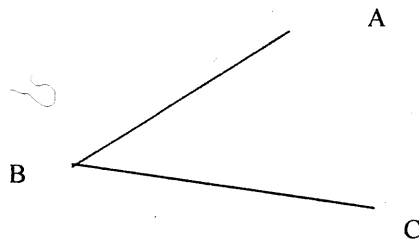
soit un effort $F_d = 9\,800\text{ N}$

pour la patte gauche une longueur de 106 mm

soit un effort $F_g = 21\,200\text{ N}$

Un effort total $F(\text{poste6}) = 31\,000\text{ N}$

Calcul des efforts au poste 7 : Les longueurs à cisailer sont représentées par



Avec $AB = 50 \text{ mm}$ et $BC = 52 \text{ mm}$ soit 102 mm

On obtient $F = R_c \cdot S$ avec $R_c = \text{résistance au cisaillement} = 0,8 R_m = 384 \text{ N/mm}^2$
 $S = \text{section cisailée} = L \cdot e = 102 \cdot 1,4 = 142,8 \text{ mm}^2$

$F(\text{poste7}) = 54\,835 \text{ N}$

En résumé nous obtenons comme ensemble d'efforts :

$F(\text{poste1}) = 16\,880 \text{ N}$ $F(\text{poste2}) = 53\,920 \text{ N}$ $F(\text{poste3}) = 53\,959 \text{ N}$
 $F(\text{poste4}) = 326\,325 \text{ N}$ $F(\text{poste5}) = 8\,400 \text{ N}$ $F(\text{poste6}) = 31\,000 \text{ N}$
 $F(\text{poste7}) = 54\,835 \text{ N}$

$F(\text{total}) = 16\,880 + 53\,920 + 53\,959 + 326\,235 + 8\,400 + 31\,000 + 54\,835$
 $F(\text{total}) = 545\,229 \text{ N}$

II-3-2 : Les dévétisseurs sont utilisés lors du poinçonnage ou découpage de façon à tenir le flan et l'empêcher de remonter avec le poinçon avec le frottement de la tôle sur le poinçon. Il est généralement admis de prendre 10 à 15% de l'effort.

Les serre-flans servent à presser la tôle, pour effectuer sur celle-ci une déformation par expansion.

Pour le serre-flan, il est habituel de limiter la pression de contact entre le serre-flan et la tôle pour ce matériau à 3 N/mm^2 .

Au poste 1 : Dévétisseur (1) = $15\% \times 16\,880 = 2\,530 \text{ N}$

Au poste 2 : Serre-Flan (2) = $3 \text{ N} \times \text{Surface de contact}$

La surface de contact sera au maximum le produit du pas \times largeur de la bande – surface du raidisseur (négligée ici) soit $S = 118,2 \cdot 106 = 12\,529$

Serre-Flan 2 = $37\,590 \text{ N}$

Au poste 3 : Dévétisseur (3) = $15\% \times 53\,959 = 8\,094 \text{ N}$

Au poste 4 : Dévétisseur (4) = $15\% \times 326\,235 = 48\,935 \text{ N}$

Au poste 5 : Serre-Flan (5) : La surface de contact correspond à la surface plane sur le dessus de la pièce soit approximée à une surface de 24 mm par 133 mm .

Serre-Flan (5) = $(24 \times 133) \times 3 = 9\,580 \text{ N}$

Au poste 6 : Serre-Flan (6) : La surface de contact correspond à la surface plane sur le dessus de la pièce soit approximée à une surface de 24 mm par 133 mm.

$$\text{Serre-Flan (5)} = (24 \times 133) \times 3 = 9\,580 \text{ N}$$

$$\text{Au poste 7 : Dévétisseur (7)} = 15 \% \times 54\,835 = 8\,225 \text{ N}$$

Au total, on a :

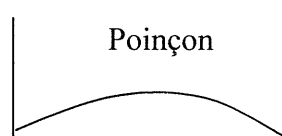
$$F = 2\,530 + 12\,539 + 8\,094 + 48\,935 + 9\,580 + 9\,580 + 8\,225 = 99\,483 \text{ N.}$$

Ces efforts doivent être intégrés aux efforts calculés précédemment pour vérifier la capacité de la presse.

II-3-3 : La presse envisagée convient en terme d'efforts, car la presse envisagée a une capacité de « 120 Tonnes » ce qui veut dire que l'on peut obtenir un effort de 117 600 daN.

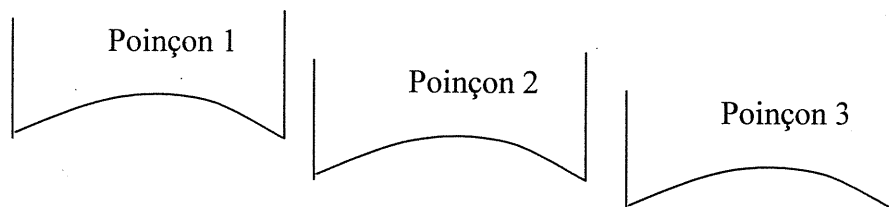
Pour réduire les efforts, on peut :

Au poste 1 : Affûter la face de coupe du poinçon pour avoir une découpe progressive (section progressive) du type

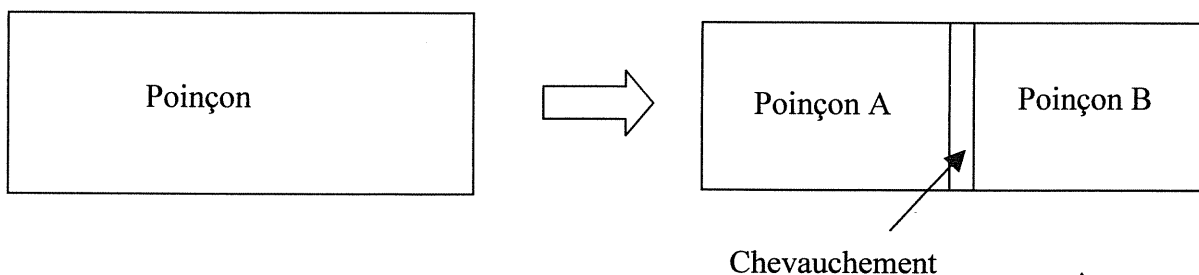


Au poste 2 : Pour réduire les efforts pour la réalisation du raidisseur, il faut agir les conditions de lubrification et la nature des matériaux de l'outillage, afin de réduire au maximum les frottements. On pourra travailler aussi sur les valeurs des efforts du serre-flan.

Au poste 3 : Même remarque que pour le poste 1. On peut étager les efforts en jouant sur les courses des poinçons en les décalant l'attaque de chaque poinçon par rapport aux autres, mais cela se fera au détriment d'une course plus importante de l'outillage.



Au poste 4 : Même remarque que pour les postes 1 et 3, mais nous pouvons fractionner les divers poinçons avec chevauchement, cela produira une obtention progressive de la forme. Cela peut imposer la création d'un poste supplémentaire si l'implantation ne peut pas s'effectuer facilement ou cela peut déplacer dans la position de certaines opérations de poinçonnage à d'autres postes. Ceci peut être combiné avec des attaques de poinçons décalés.



Au poste 5 : Pour réduire les efforts à ce poste on peut modifier le jeu entre le poinçon et la matrice, utiliser des matériaux pour l'outillage facilitant le glissement, travailler sur des rayons de matrices plus grands, sur la lubrification,...

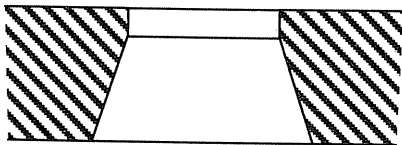
Au poste 6 : Même remarque qu'au poste 5.

Au poste 7 : Même remarque qu'aux postes 1, 3 et 4

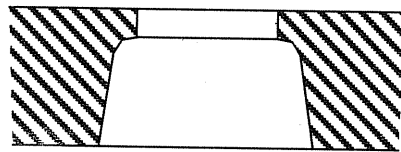
II-4-1 : Dans le cadre du poinçonnage, pour le matériau E 275 D et l'épaisseur de tôle de 1,4 mm, la valeur du jeu à installer entre un poinçon et sa matrice est alors de 0,05.

II-4-2 : Afin d'évacuer le chute lors du poinçonnage, on peut réaliser sur la matrice un évidement pouvant avoir les formes suivantes vues en section sur la matrice.

Forme 1



Forme 2



Le profil supérieur est bien sûr donné par la forme de la chute à réaliser.

II-4-3 : Pour réaliser la forme 1 qui est une combinaison de formes réglées et du fait que la matière est extrêmement dure, la réalisation peut se faire par électroérosion à fil. Cela nous permet d'obtenir la pente désirée (qualité dimensionnelle négligeable) pour évacuer les chutes et la forme de la chute (qualité dimensionnelle nettement plus précise).

En ce qui concerne la forme 2 et du fait que la matière est extrêmement dure, l'obtention de la forme pour évacuer les chutes peut être obtenues directement par moulage et la forme de la chute par électroérosion à fil ou l'obtention des formes peut être obtenues par électroérosion par enfonçage mais ceci aura un délai et un coût plus important pour cette dernière technique d'obtention.

III TROISIEME PARTIE

I-1 :

Numéro surface	Spécifications justifiant le nombre d'opérations	Opérations				CU
		pointage	ébauche	1/2 finition	finition	
1					1	Z-
2	Planéité de 0,02		2E			Z+
					2	Z+
3					3	Z+
4					4	Z+
5					5	Z+
6					6	Z+
7					7	Z+
8					8	Z+
9					9	Z+
10					10	Z+
11					11	Z+
12					12	Z+
13	Qualité 6	13P				Z-
			13E			Z-
				13 F		Z-
					13	Z-
14	Qualité 6	14P				Z-
			14E			Z-
				14 F		Z-
					14	Z-

I-2 : Afin de minimiser le nombre de phases il faut faire un maximum d'opérations en Z+. Les surfaces 13 et 14 en finition ne peuvent être réalisées qu'en Z- à cause de la longueur de coupe de l'outil de finition.

I-3 :

Surfaces élémentaires	Outil
1	Fraise à surfacer diamètre 200, Kr=75. Plaquettes carrées avec nuance tenace.
2E	Fraise à surfacer diamètre 200, Kr=75. Plaquettes carrées avec nuance tenace
2	Fraise à surfacer diamètre 200, Kr=75. Plaquettes carrées résistante à l'usure + une plaquette de planage
3, 4, 5 et 6	Fraise 2T diamètre 30 avec $ap \geq 3.5$. Nuance tenace
7 et 8	Fraise à lamer diamètre 18
9 et 10	Foret diamètre 9
11 et 12	Foret diamètre 10
13P et 14P	Forêt à pointer
13E et 14E	Foret diamètre 6
13F et 14F	Tête d'alésage diamètre 7.5
13 et 14	Tête d'alésage diamètre 8G6

I-4 : Ne peuvent être associées que les surfaces élémentaires suivant le même sens d'usinage. Il n'est pas possible d'associer toutes les surfaces suivant Z+ car la pièce ne peut pas être tenue. Les différents perçages sont localisés par rapport à 1 (la zone de tolérance doit être perpendiculaire à 1). Il est donc impératif de réaliser 1 avant les perçages. Les alésages 8G6 seront réalisés en dernier. Il en découle les associations suivantes :

G1=1

G2=2E,2,3,4,5,6

G3=7,8,9,10,11,12

G4=13P, 13E, 13F,13, 14P, 14E, 14F, 14

I-5 : Phase 10 G1 (référence pour les perçages)

Phase 20 G3 (pour pouvoir tenir la pièce)

Phase 30 G2

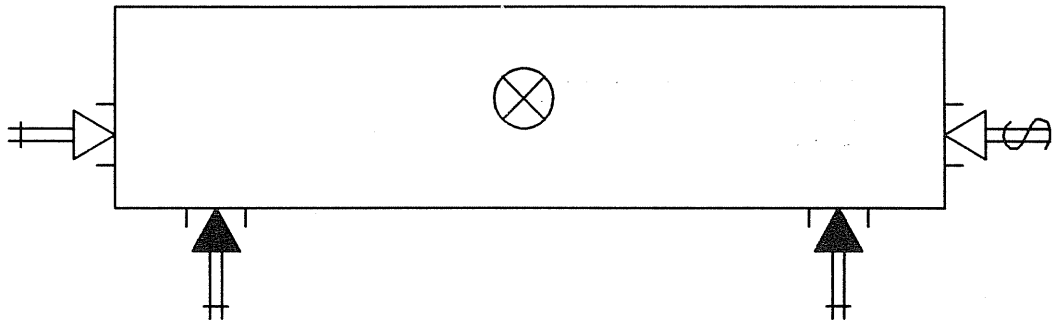
Phase 40 G4

I-6 : Voir contrats de phase

PHASE 10	CONTRAT DE PHASE	
----------	------------------	--

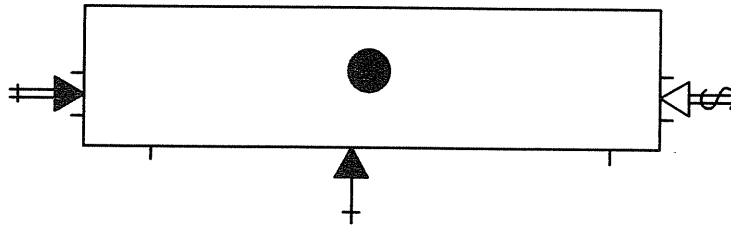
Élément :	Matière : Z160CDV12
-----------	---------------------

Machine Outil : Fraiseuse verticale



Désignation des opérations	Outils
Surfacer 1	Fraise à surfacer $\varnothing 200$

PHASE 20	CONTRAT DE PHASE	
	Élément :	Matière : Z160CDV12
Machine Outil : Centre d'usinage		

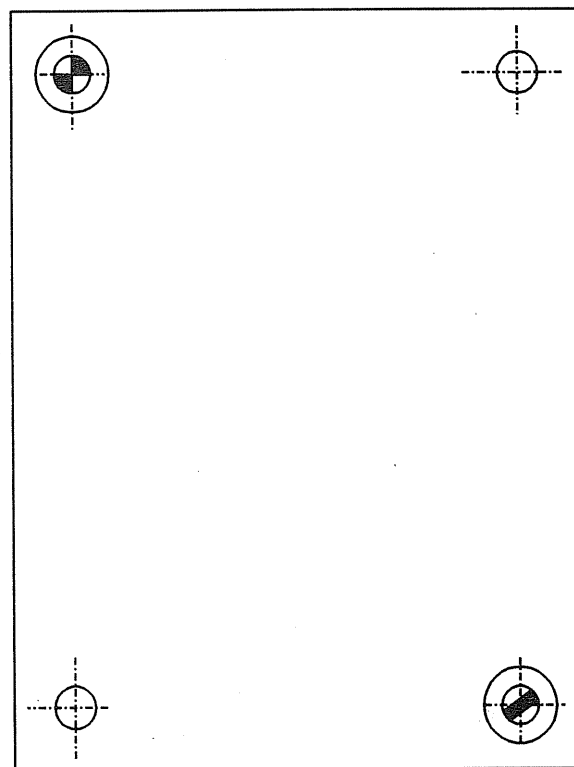
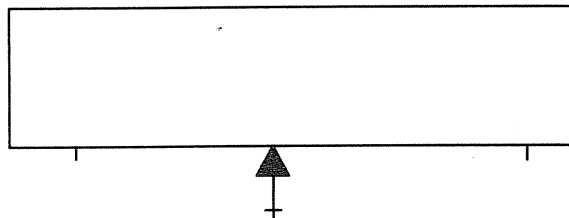


Désignation des opérations	Outils
Perçer 9 - 10	Foret $\varnothing 9$
Perçer 11 - 12	Foret $\varnothing 10$
Lamer 7 - 8	Fraise à lamer $\varnothing 18$

PHASE 30	CONTRAT DB PHASE
----------	------------------

Elément :	Matière : Z160CDV12
-----------	---------------------

Machine Outil : Centre d'usinage



Serrage par vis CHC dans les trous

Désignation des opérations	Outils
Dresser 3, 4, 5, 6	Fraise 2T $\varnothing 30$
Surfacer 2B	Fraise à surfacer $\varnothing 200$ ébauche
Surfacer 2	Fraise à surfacer $\varnothing 200$ finition

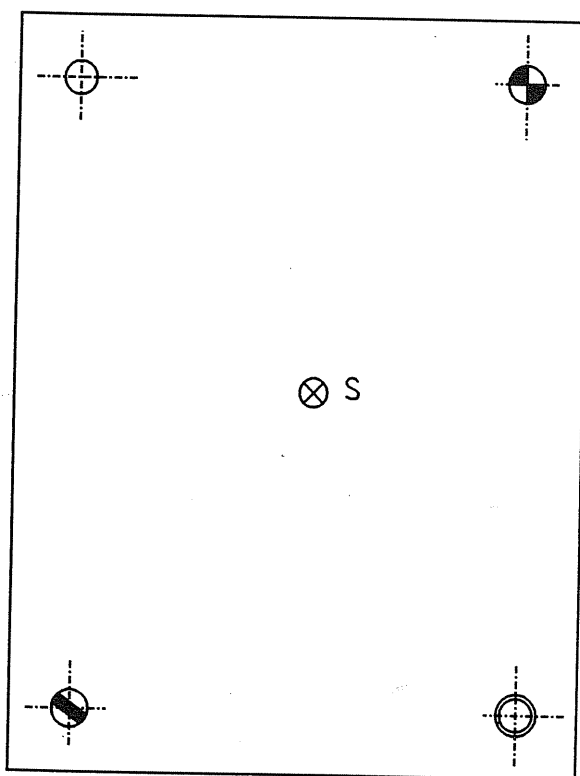
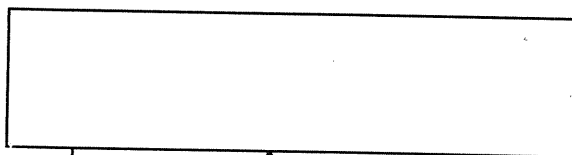
PHASE 40

CONTRAT DE PHASE

Élément :

Matière : Z160CDV12

Machine Outil : Centre d'usinage



Désignation des opérations	Outils
Pointer 13P, 14P	Foret à pointer
Percer 13E, 14E	Foret $\varnothing 6$
Aléser 13F, 14F	Tête à aléser $\varnothing 7.5$
Aléser 13, 14	Tête à aléser $\varnothing 7.5$

I-7 : L'avance est fonction de la géométrie de la plaquette, de la matière à usiner et de la nuance. La vitesse de coupe est fonction de la matière à usiner, de la nuance, de l'avance choisie et de la durée de vie de la plaquette choisie. La profondeur de passe est fonction de la puissance de la machine.

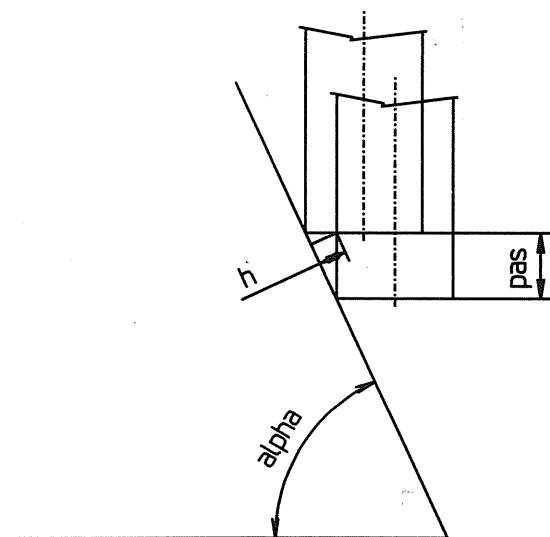
II-1 : Fraise 2T : Débit matière important, vitesse de coupe constante car usinage uniquement sur sa périphérie. Traces d'usinage très marquées (escaliers), accessibilité très faible dans les zones concaves. Outil adapté à l'ébauche.

Fraise hémisphérique : Vitesse de coupe nulle en son centre, débit matière assez faible. Bonne accessibilité, facile à programmer, détection de collision facile par géométrie différentielle, peu de marques d'usinage. Outil plutôt adapté à la finition.

Fraise torique : vitesse de coupe à peu près constante, peu de marques d'usinage. Programmation difficile, détection de collision difficile. Outil adapté à l'ébauche et à la finition.

II-2 : Il faut prendre un outil de grande dimension qui puisse accéder à l'ensemble de la zone à usiner. La partie supérieure de l'empreinte a une largeur de 59 mm. La partie basse plane fait approximativement 31 mm. Une fraise de diamètre 30 permet d'accéder partout et limite le nombre de déplacement de l'outil.

II-3 :



$$\text{pas} = \frac{h}{\cos \alpha}$$

II-4 : La longueur du trajet L dans la zone 2 est de l'ordre de 300 mm.

On a $T_u = \frac{L}{V_f} \approx 20$ s. La hauteur dans la zone 2 est de 3 mm. Le temps d'usinage dans cette zone est de l'ordre d'une minute.

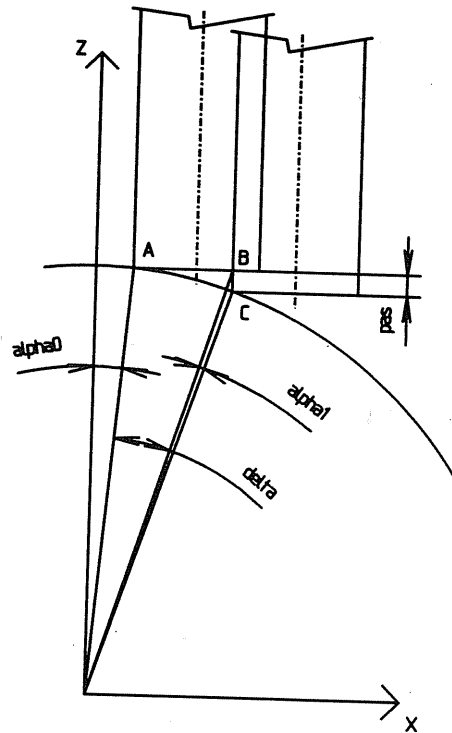
II-5 : Position initiale : outil en contact sur A et Position suivante : outil en contact sur C

$$A \begin{pmatrix} \rho l \sin \alpha_0 \\ \rho l \cos \alpha_0 \end{pmatrix} B \begin{pmatrix} (\rho l + h) \sin(\alpha_0 + \delta) \\ (\rho l + h) \cos(\alpha_0 + \delta) \end{pmatrix} C \begin{pmatrix} \rho l \sin(\alpha_0 + \delta + \alpha_1) \\ \rho l \cos(\alpha_0 + \delta + \alpha_1) \end{pmatrix}$$

On a $z_A = z_B$ et $x_B = x_C$ et $\text{pas} = z_A - z_C$ ce qui conduit à

$$\text{pas} = \rho l (\cos \alpha_0 - \cos(\alpha_0 + \alpha_1 + \delta)) \text{ avec } \delta = \text{Arccos} \left(\frac{\rho l \cos \alpha_0}{\rho l + h} \right) - \alpha_0 \text{ et}$$

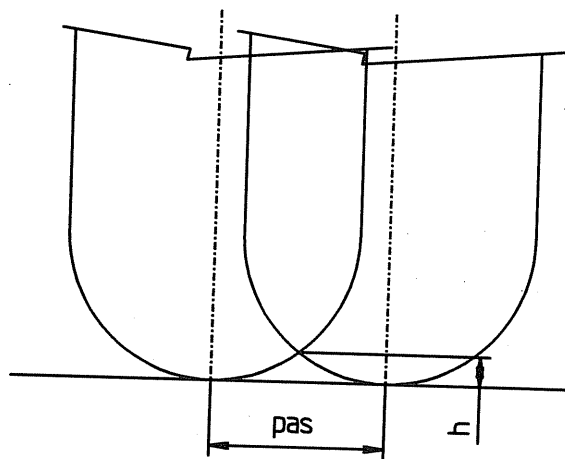
$$\alpha_1 = \text{Arcsin} \left(\frac{(\rho l + h) \sin(\alpha_0 + \delta)}{\rho l} \right) - \alpha_0 - \delta$$



Dans la zone 3, le calcul du pas est identique mais il faut considérer la valeur h comme étant négative.

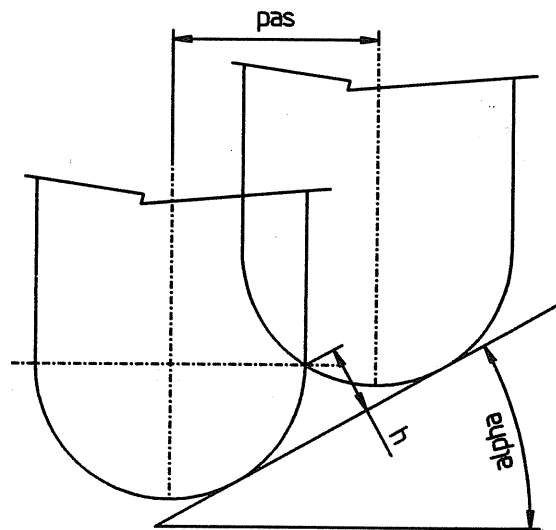
II-6 : En finition il faut prendre un outil pouvant accéder partout donc $R_{\text{max}} \leq 11.5$.

II-7 :



$$\text{pas} = 2\sqrt{2Rh - h^2}$$

II-8 :



2 cas :

- 1 : Intersection sur les parties sphériques
- 2 : Intersection sur une partie sphérique et une partie cylindrique

La limite entre les deux cas se situe pour $h = R(1 - \sin \alpha)$.

Nous sommes dans le cas 1. Le pas est donné par :

$$\text{pas} = 2\sqrt{2Rh - h^2} \cos \alpha = 0.9.$$

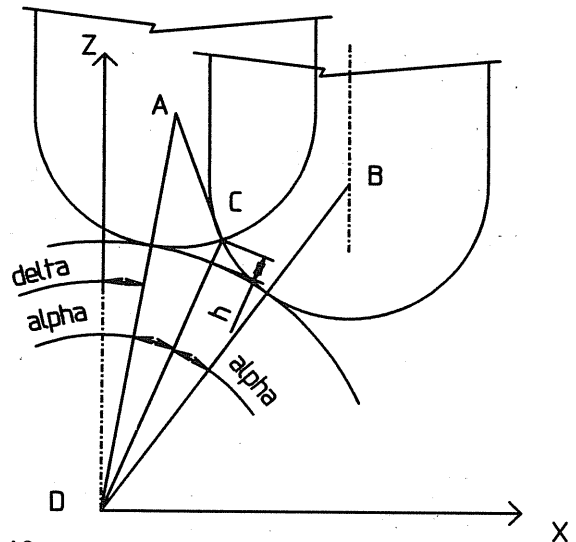
II-9 :

$$\text{pas} = |x_B - x_A|$$

$$x_B = (\rho l + R) \sin(2\alpha + \delta)$$

$$x_A = (\rho l + R) \sin(\delta)$$

avec $\alpha = (DA, DC)$, $\delta = (DA, Z)$



Triangle ACD :

$$R^2 = (\rho l + h)^2 + (\rho l + R)^2 - 2(\rho l + h)(\rho l + R) \cos \alpha$$

Le calcul est similaire dans la zone 2 mais avec h négatif.

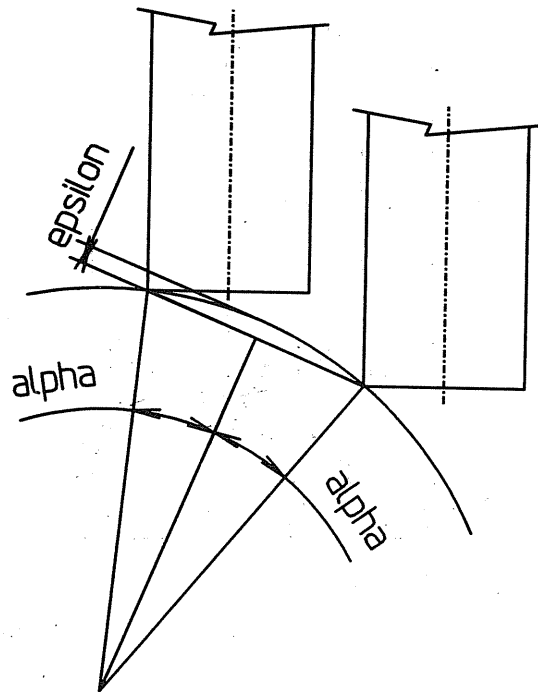
II-10 : Outil torique

$$\mathbf{OP}_{co} = \mathbf{OP}_o + r\mathbf{N}_{p_o} + (R - r) \frac{((\mathbf{z} \wedge \mathbf{N}_{p_o}) \wedge \mathbf{z})}{|((\mathbf{z} \wedge \mathbf{N}_{p_o}) \wedge \mathbf{z})|} - r\mathbf{z} \text{ avec } \mathbf{N}_{p_o} \text{ normale à la surface au point } P_o.$$

Fraise 2T : idem mais $r = 0$

Fraise hémisphérique : $R = r$

II-11 :



La tolérance de forme est de 0.05 répartie sur le profil théorique. L'erreur de corde ϵ est donc de 0.025. La distance angulaire maximale à parcourir est donnée par :

$$2\text{Arccos}\left(\frac{\rho l - \epsilon}{\rho l}\right) = 16.2^\circ.$$

Dans la zone 1, l'arc mesure 63° . Sans le point initial, il faut 4 points.

Dans les zones 2 et 4, il n'y a pas d'erreur de corde.

Le calcul dans la zone 3 donne 8 points.

$$\epsilon_1 = \rho l(1 - \cos \alpha) \quad \epsilon_2 = R(1 - \cos \alpha)$$

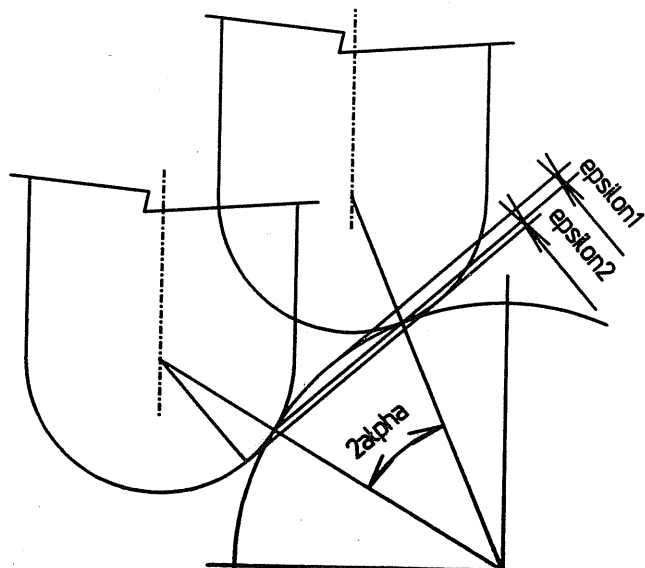
L'erreur de corde est $\epsilon = (\rho + R)(1 - \cos \alpha)$ pour les zones convexes.

L'erreur de corde est $\epsilon = (\rho - R)(1 - \cos \alpha)$ pour les zones concaves.

Zone 1 : 7 points

Zone 3 : 6 points

En fonction de la géométrie de la courbe, un outil sphérique nécessite plus ou moins de points de passage qu'un outil 2T.

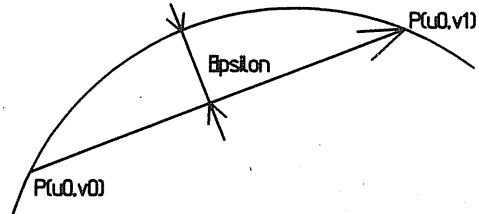


II-12 :

La courbe est un cercle.

On a $C = P(u_0, v_0)P(u_0, v_1)$

$$\epsilon = P(u_0, v_0)P(u_0, v) - P(u_0, v_0)P(u_0, v_1)/2$$



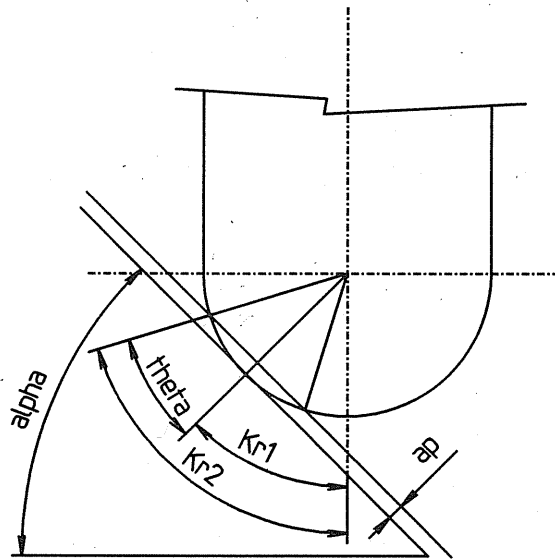
On pose $v = v_1/2$ ce qui nous permet de déterminer v_1 à partir de $\frac{d(\epsilon.\epsilon)}{dv_1} = 0$ par résolution numérique.

III-1 : - Zone 2 en montée

$$Kr_1 = \alpha = 63^\circ$$

$$\cos \theta = \frac{R - ap}{R} = 26^\circ$$

$$Kr_2 = Kr_1 + \theta = 89^\circ$$

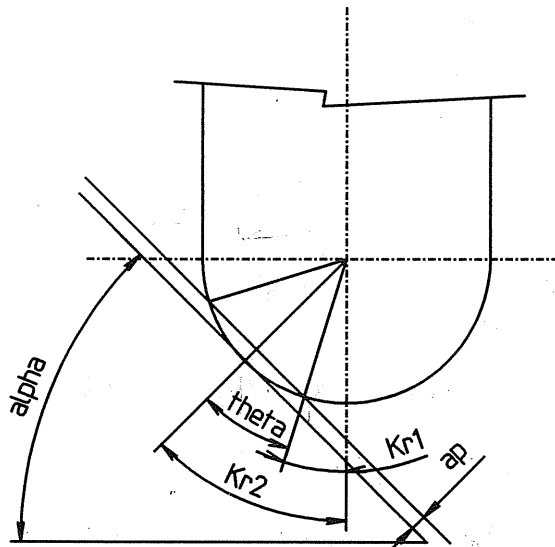


- Zone 2 en descente

$$Kr_2 = \alpha = 63^\circ$$

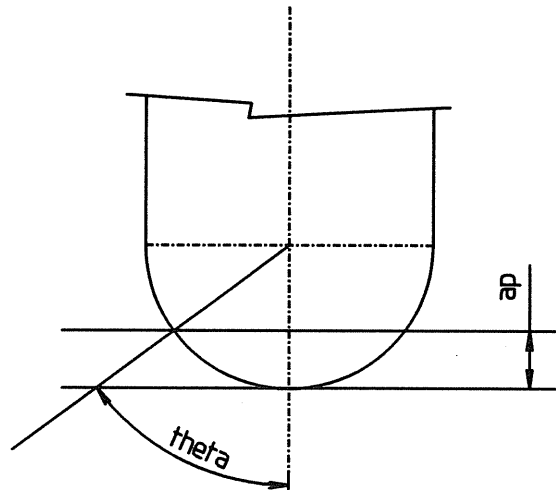
$$\cos \theta = \frac{R - ap}{R} = 26^\circ$$

$$Kr_1 = Kr_2 - \theta = 37^\circ$$



- Zone 4 (déplacement vers la gauche)

$$\cos \theta = \frac{R - ap}{R} = 26^\circ$$



III-2 : La vitesse de coupe sera maximale au point le plus éloigné de l'axe de l'outil. C'est dans la zone 2 en montée ($Kr2=89^\circ$). Pour $Vc=150$ m/min en ce point on obtient $N=4775$ tr/min.

- zone 2 en montée

$$\text{Pour } Kr1 \text{ on a } Vc = \frac{2\pi R \sin(Kr1)N}{1000} = 134 \text{ m/min}$$

- zone 2 en descente
 Vc varie de 90 à 134 m/min.
- Zone 4
 Vc varie de 66 à 0 m/min.

D'un point de vue de la coupe si l'on veut conserver une vitesse de coupe proche de la vitesse de coupe maximale, il est préférable d'usiner en montant. La zone 4 va présenter des zones écrouies car la vitesse de coupe est nulle en son centre.

$$\text{III-3 : } N \begin{pmatrix} \sin \kappa \sin \psi \\ -\sin \kappa \cos \psi \\ -\cos \kappa \end{pmatrix}$$

$$\text{III-4 : } Ec = N \cdot Vf = \sin \kappa \sin \psi Ax - \sin \kappa \cos \psi Ay - \cos \kappa Az$$

III-5 :- Zone 4

$$Ay = Az = 0$$

$$Ec_{moy} = \int_0^\pi \sin \psi \int_0^{Kr2} \sin \kappa Ax = 2Ax(1 - \cos Kr2)$$

- Zone 2 en montée

$$Ay = 0$$

$$Ec_{moy} = 2(\cos(Kr1) - \cos Kr2)Ax - (\sin Kr2 - \sin Kr1)Az$$

III-6 :- Zone 4

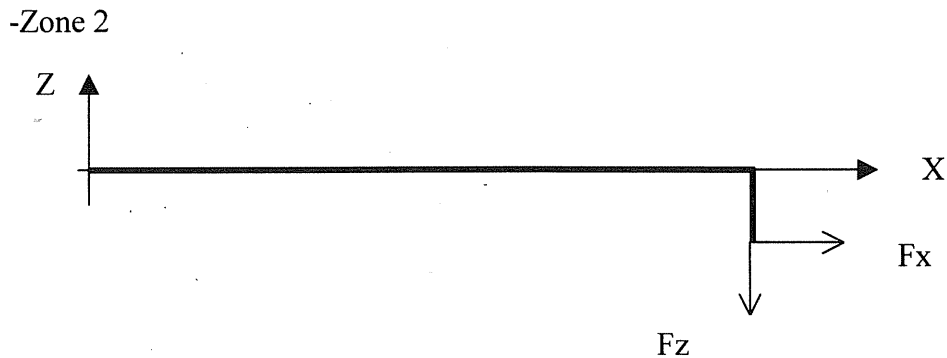
$A_x=0.08$, $A_z=0$. On en déduit $E_{cmoy}=0.016$ d'où $F_c=90$ N, $F_p=117$ N et $F_f=45$ N.

- Zone 2

$A_x = F_z \cos \alpha = 0.036$, $A_z = F_z \sin \alpha = 0.071$. On en déduit $F_c=121$ N, $F_p=157$ N et $F_f=61$ N.

III-7 : - Zone 4

La flexion de l'outil dans ce cas n'influe quasiment pas sur la géométrie obtenue.



La flèche maximale d'une poutre de longueur l soumise à des actions mécaniques F_x , F_y et F_z sera calculée par : $\Delta = \frac{F_z l^3}{3EI_y}$ en négligeant F_x et F_y .

E = module d'Young de la poutre

I_y = moment quadratique de la poutre par rapport à l'axe Y .

Dans cette zone on a $F_z = |F_p| \sin \alpha + |F_f| \cos \alpha = 167$ N

On obtient $\Delta = 0.018$ soit l'erreur par rapport à la normale à la surface au point considéré égale à $\Delta \sin \alpha = 0.016$.

III-8 : Dans les zones 2 et 4, l'erreur de corde étant nulle, seule l'erreur due à la flexion d'outil intervient. Elle est cependant inférieure à la tolérance de forme.

Dans la zone 3, l'erreur de flèche va s'ajouter à l'erreur de corde ce qui risque de produire une pièce hors tolérance (trop de matière laissée). Pour diminuer l'erreur de corde il faut augmenter le nombre de points. Pour diminuer l'erreur de flèche, il faut diminuer la longueur de l'outil.

En conclusion sur une zone convexe, les deux erreurs s'opposent alors que dans une zone concave elles s'ajoutent.

IV-1 : L'électroérosion peut se décrire en trois phases.

- Ionisation du diélectrique avec création d'un canal de conductibilité élevée. Sous effet du champ électrique, il y a d'une part concentration de particules conductrices et formation d'un pont, d'autre part émission d'électrons qui choquent les particules pour participer à la formation de particules positives et négatives.
- Décharge et effets thermiques. Le diélectrique étant ionisé, le courant passe entre les électrodes (décharge). Les particules ionisées bombardent les surfaces. L'énergie cinétique des particules provoquent l'échauffement. Cela conduit à la

fusion et la vaporisation des matériaux et à la formation d'une bulle de gaz de part et d'autre du canal.

- Effets dynamiques de la décharge. Lorsque le courant est coupé, la pression tombe à l'intérieur de la bulle. On obtient une vaporisation explosive du métal fondu qui est éjecté dans le liquide.

Tension de travail U : tension moyenne arithmétique de la tension entre pièce et électrode sur un grand nombre de cycles.

Durée d'impulsion t_i : Temps pendant lequel la tension est appliquée entre électrode et pièce.

Durée de repos t_0 : Temps séparant deux impulsions de tension successives.

Amplitude du courant de décharge I : Moyenne arithmétique du courant correspondant à un grand nombre de cycles.

Polarité : Dans le cas d'une électrode et d'une pièce de même matériau, seule la polarité influence l'usure. Pour des durées suffisamment grandes, l'énergie cinétique est plus importante pour les particules positives que pour les électrons. Il faut donc relier la pièce à la polarité négative.

t_i augmente	Ra augmente	Débit augmente jusqu'à une certaine valeur
I augmente	Ra augmente	Débit augmente
t_0 augmente	Ra constant	Débit diminue
U augmente	Ra diminue	Débit diminue

IV-2 : Les matériaux d'électrode utilisés sont le graphite et le cuivre.

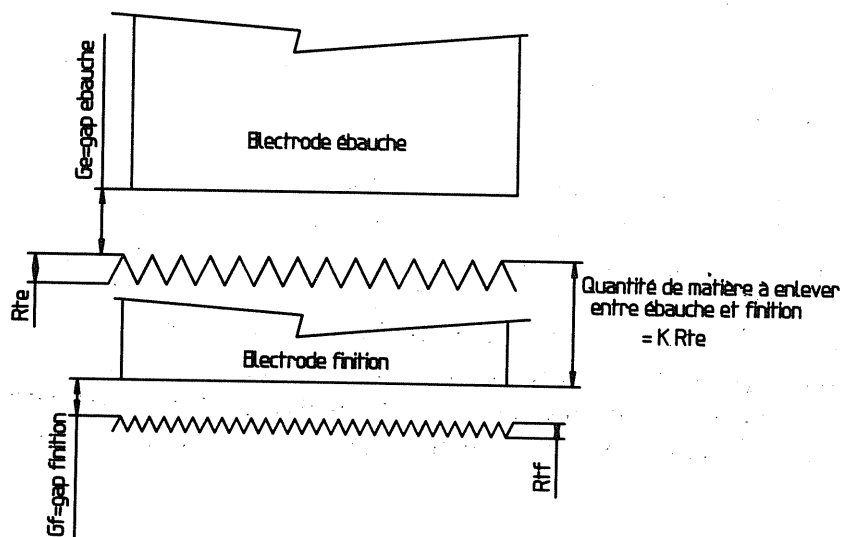
Ces matériaux doivent avoir une bonne résistance à l'usure ce qui implique des valeurs élevées :

- des températures de fusion et d'ébullition
- de la conductivité et de la diffusivité thermique
- des chaleurs latentes de fusion et d'ébullition

Pour les électrodes destinées à des travaux de grande précision, il faut une excellente stabilité dimensionnelle nécessitant un faible coefficient de dilatation.

IV-3 : Les matériaux doivent être conducteurs et les formes demoulables. Ce procédé permet l'usinage des pièces minces déformables et des matériaux très durs.

IV-4 :



IV-5 : La surface projetée est approximativement égale à 63 cm^2 .

On obtient pour un débit maximal $I=90 \text{ A}$, $G_e=0.34$ et $R_{te}=110 \mu\text{m}$.

La rugosité de finition $R_{tf}=10 \mu\text{m}$, ce qui donne un gap de finition de 0.03 mm .

L'électrode d'ébauche sera de la forme de la pièce à obtenir mais décalée de $G_e+3R_{te}+G_f=0.7 \text{ mm}$.

L'électrode de finition sera de la forme de la pièce à obtenir mais décalée de $G_f=0.03 \text{ mm}$.

V-1 : Tolérance de localisation

Les entités assujetties à la spécification sont les axes réels des 2 perçages de diamètre 9 c'est à dire les lignes reliant les centres des cercles associés obtenus dans des sections perpendiculaires au cylindre associé obtenu par la méthode totale des moindres carrés.

Référence D : Plan tangent du coté libre de la matière et minimisant l'écart maximal avec la surface réelle.

Référence B : Plus grand cylindre perpendiculaire à D et tangent du coté libre de la matière.

Référence C : Plus grand cylindre perpendiculaire à D et tangent du coté libre de la matière.

Référence B-C : Plan passant par les deux axes.

Zone de tolérance : 2 cylindres de diamètre 0.2 perpendiculaires à D, orientés par rapport à BC à 36.25° et positionnés par rapport à B à 110 et 150.

V-2 : Tolérance de localisation

Les entités assujetties à la spécification sont les axes réels des 2 alésages de diamètre 8G6.

Zone de tolérance : 2 cylindres de diamètre 0.05 perpendiculaires à D et distants entre eux de 186.01 mm.

V-3 : Tolérance de forme d'une surface quelconque

L'entité assujettie à la spécification est la surface réelle. La zone de tolérance est limitée par deux surfaces enveloppes des sphères de diamètre 0.05 centrées sur le profil théorique. Cette spécification sans référence ne limite que le défaut de forme.

La tolérance de forme de 0.2 a la même définition que précédemment mais le profil théorique est parfaitement positionné par rapport au système de référence.

Référence A : Plan tangent du coté libre de la matière et minimisant l'écart maximal avec la surface réelle.

Référence P1 : Plan théorique perpendiculaire à A, orienté par rapport à BC (36.25°) et positionné par rapport à C (55).

Référence P2 : Plan théorique perpendiculaire à A, orienté par rapport à P1 (90°) et positionné par rapport à C (75).

V-4 : Etant donné la gamme d'usinage et la tolérance large, on considérera le problème plan

Palper Plan1

Palper Cylindre13

Palper Cylindre14

Palper Cylindre9

Palper Cylindre10

Point13 = Plan1 \cap Cylindre13

Point14 = Plan1 \cap Cylindre14

Point9 = Plan1 \cap Cylindre9

Point10 = Plan1 \cap Cylindre10

Plan20 = plan perpendiculaire à Plan1 passant par Point13 et Point14

Créer repère de dégauchissage au Point14. Les axes (X,Y,Z) sont donnés respectivement par les normales aux plans Plan1, Plan20, Plan1 \wedge Plan20.

$$\text{Créer point théorique Point21} = \begin{pmatrix} 150 \cos(36.25) \\ 150 \sin(36.25) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Créer point théorique Point22} = \begin{pmatrix} 110 \sin(36.25) \\ -110 \cos(36.25) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Calculer la distance $d1 = \text{Point21 Point9}$

Calculer la distance $d2 = \text{Point22 Point10}$

Les distances $d1$ et $d2$ doivent être inférieures à la tolérance divisée par 2.

Le problème a été traité comme plan. Dans tous les cas les éléments associés sont calculés par rapport au critère des moindres carrés et non tangents extérieurs à la matière.

V-5 : Hypothèse : on prend les points extrêmes de l'axe.

Palper Plan1

Palper Cylindre9

Palper Cylindre10

Point9 = Plan1 \cap Cylindre9

Point10 = Plan1 \cap Cylindre10

Créer un repère de dégauchissage (Origine Point9, X = (Point9Point10), Y = Z \wedge X, Z = normalePlan1)

Créer Plan2 = plan parallèle à Plan1 passant par (0,0,15)

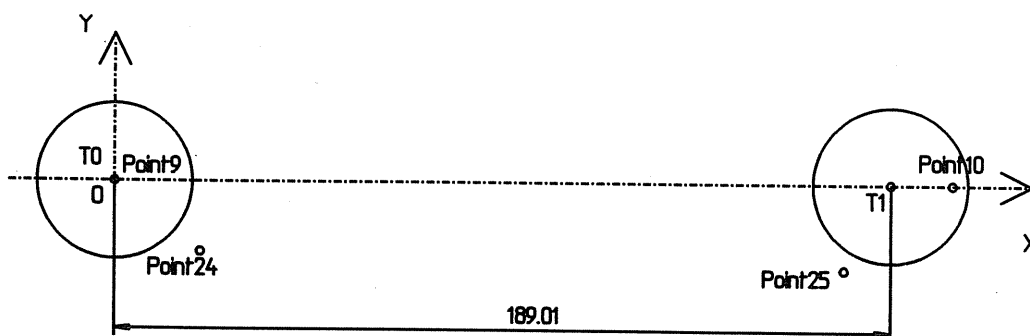
Point22 = Plan2 \cap Cylindre9

Point23 = Plan2 \cap Cylindre10

Point24 = projection de Point22 sur XY

Point25 = projection de Point23 sur XY

V-6 : Le repère de dégauchissage est noté (O,X,Y,Z)



Les points palpés Point9 et Point24 sont notés P_i .

Les points palpés Point10 et Point25 sont notés P_j .

D'après l'interprétation de la spécification géométrique, les mobilités de l'ensemble des zones de tolérance sont 2 translations dans le plan (O,X,Y) et une rotation dans ce même plan.

Aussi, peut-on écrire :

D_{T_i} déplacement de T_i conséquence d'un torseur de petits déplacements $[D]_{O/R}$

$$\begin{array}{c|c} & 0 \\ & \Omega \\ & \gamma \\ & u \\ \mathbf{D} & v \\ & 0 \end{array}$$

$$e_i = \|\mathbf{T}_0^* \mathbf{P}_i\| = \|\mathbf{T}_0^* \mathbf{O} + \mathbf{O} \mathbf{P}_i\| \text{ avec } \mathbf{O} \mathbf{T}_0^* = \mathbf{O} \mathbf{T}_0 + \mathbf{D}_{T_0} = \mathbf{O} \mathbf{T}_0 + \mathbf{D} + \mathbf{T}_0 \mathbf{O} \wedge \Omega$$

$$e_j = \|\mathbf{T}_1^* \mathbf{P}_j\| = \|\mathbf{T}_1^* \mathbf{O} + \mathbf{O} \mathbf{P}_j\| \text{ avec } \mathbf{O} \mathbf{T}_1^* = \mathbf{O} \mathbf{T}_1 + \mathbf{D}_{T_1} = \mathbf{O} \mathbf{T}_1 + \mathbf{D} + \mathbf{T}_1 \mathbf{O} \wedge \Omega$$

Le critère de Gauss propose de déterminer u , v et γ permettant de minimiser

$$W = \sum_{i=1}^2 e_i^2 + \sum_{j=1}^2 e_j^2 \text{ en résolvant } \frac{\partial W}{\partial u} = 0, \frac{\partial W}{\partial v} = 0 \text{ et } \frac{\partial W}{\partial \gamma} = 0.$$

Il faut ensuite vérifier que tous les e_i et e_j soient inférieurs à 0.025.

V-7 : Il faut palper pour chaque point, deux points proches qui permettront de calculer la normale à la surface dans la zone palpée. Cette normale permettra de passer du point centre-bille au point pièce réellement palpé.

V-8 : Le résultat après palpation se présente sous forme d'une liste d'écart entre la surface réelle et la surface théorique. Les écarts peuvent être optimisés par le critère de Gauss.

Commentaires du jury sur l'épreuve de composition des technologies de fabrication

Commentaire relatif à la première partie

Cette partie traitait des matériaux et des caractéristiques des tôles utilisées en emboutissage. Elle se subdivisait en deux sous-parties : Caractéristiques des matériaux et des tôles d'emboutissage, Emboutissage – sollicitations – courbes limites de formage.

La progression dans les questions devait permettre à tous les candidats de s'exprimer sur le sujet. Cela se traduit par le fait que la première sous-partie a été traitée par 90% des candidats et la deuxième sous-partie par 70% d'entre eux.

Pour la première sous-partie, il est à noter une pauvreté des connaissances à caractère technologique dans le domaine de l'élaboration des matériaux, de leurs caractéristiques et de leurs formes marchandes. Les valeurs numériques des caractéristiques des matériaux sont très peu connues. Il est à noter une méconnaissance des influences des éléments d'addition sur le comportement des matériaux.

La totalité des candidats a traité la partie concernant l'essai de traction, mais le manque de rigueur n'a pas permis une exploitation complète.

Les coefficients d'érouissage et d'anisotropie sont très peu connus. Les définitions fournies sont bien souvent empiriques. Les modèles numériques et les dépouillements associés sont rarement cohérents.

Très peu de candidats (20%) ont abordé la deuxième sous-partie Emboutissage.

Les descriptions élémentaires des premières questions ont été traitées trop rapidement et la qualité graphique des schémas n'a pas permis d'exposer clairement les notions abordées.

Seulement une dizaine de candidats ont su mettre en valeur leurs connaissances et la restitution de celles-ci, avec justesse.

Commentaire relatif à la deuxième partie

Cette deuxième partie traitait de la pré étude d'un outillage à suivre permettant la réalisation complète à la sortie de cet outillage d'un élément intervenant dans le support de colonne de direction.

Pour cette étude, on demandait au candidat, de mener un développé de pièce simple ayant des rayons évolutifs. On proposait au candidat une progression, permettant de faire une approche structurée et bien sûr évaluée de la pré étude

Peu de candidats ont abordé cette partie (70%). On a constaté qu'un certain nombre de candidats n'ont pas fait la différence entre un outillage à suivre et le principe de presse transfert.

La logique d'obtention des pièces s'est avérée rarement correcte.

Les solutions fournies ont montré que certains candidats n'ont pas intégré les contraintes imposées par le cahier des charges (une seule pièce par coup de presse, le nombre de poste minimum de 7,...).

Les solutions proposées par une trentaine de candidats, sont des solutions viables au regard du cahier des charges fourni. Ces solutions étaient très proches de la solution industrielle réalisée.

Le calcul des efforts s'est avéré très étonnant. L'effort de poinçonnage a montré la méconnaissance du phénomène de cisailage. Les équations sont rarement homogènes. Trop peu de candidats ont émis des hypothèses simplificatrices pour cette pré étude, ce qui les a emmenés vers des calculs complexes et erronés.

Commentaire relatif à la deuxième partie

Cette partie traitait de l'usinage d'une matrice d'emboutissage. Elle se subdivisait en cinq parties : étude de la gamme d'usinage de la matrice sans l'empreinte, étude géométrique de l'usinage de l'empreinte, étude des conditions de coupe et des actions mécaniques pour l'usinage de l'empreinte avec un outil hémisphérique, usinage de l'empreinte par électroérosion, métrologie de la matrice.

Pour la première sous-partie, chaque surface devait être étudiée individuellement par le nombre d'opérations, le choix de l'orientation de l'outil et le regroupement en phases.

Il faut noter la méconnaissance entre les diverses spécifications géométriques et le moyen de les obtenir (une spécification de forme est traitée comme une spécification de position). La moitié des candidats ont su choisir correctement les outils de fraisage.

Pour la quasi majorité des candidats les associations de surfaces à usiner dans une même phase ont été réalisées sans aucune démarche, ce qui a conduit à des gammes d'usinage avec beaucoup de phases.

80% des candidats considèrent que l'ordre des surfaces à usiner est imposé par la cotation du dessin de définition. La mise en position de la pièce sur les montages est connue.

La deuxième sous-partie traitait sur l'étude géométrique de l'usinage de l'empreinte avec un outil à bout plat en ébauche et avec une fraise à bout hémisphérique pour la finition. Pour cette partie, les questions étaient basées sur des calculs géométriques simples. Elle a été totalement délaissée par 40% des candidats. Les autres n'ont répondu en moyenne qu'à 5 questions sur 12. Les candidats ont beaucoup de difficultés à résoudre des problèmes géométriques simples ne nécessitant que des connaissances trigonométriques basiques.

La troisième sous-partie était basée sur les variations de vitesse de coupe sur un outil à bout hémisphérique et les actions mécaniques associées induisant une flexion d'outil. La première question démarrait par un calcul géométrique élémentaire. Elle n'a été abordée que par 20 % des candidats ce qui signifie que 80 % des candidats n'ont rien fait sur cette partie.

La quatrième sous-partie se basait sur l'usinage par électroérosion. Les questions portaient sur le principe, le domaine d'utilisation et le dimensionnement d'électrodes. La moitié des candidats l'ont abordée. Le principe est parfois très bien connu mais les domaines d'application ne sont pas acquis.

La cinquième sous-partie portant sur la métrologie pouvait être considérée comme classique. 3 analyses de spécification étaient demandées puis deux gammes de mesure sur machine à mesurer tridimensionnelle. 70% des candidats ont traité cette partie. Seulement 15% connaissent parfaitement les spécifications. A partir d'interprétations fausses, les gammes de mesure sont incorrectes. Cependant parmi les réponses exactes certaines sont excellentes.

Commentaire sur l'ensemble de l'épreuve

L'ampleur et la diversité du sujet a conduit les candidats à privilégier ou survoler les questions. Ceci au détriment de la qualité de leur exposé et de la cohérence dans les thèmes abordés.

La moyenne de l'épreuve est de 6,60 / 20. Les notes se répartissent selon le diagramme ci dessous.

