

# Commentaires du jury sur l'épreuve de composition de l'étude d'industrialisation.

De manière générale, le sujet étant assez long, les candidats ont su gérer efficacement leur temps et aller chercher dans chaque partie les questions facilement accessibles.

La lecture du sujet et la compréhension des questions est parfois approximative et donne lieu à des réponses erronées ou hors sujet.

Les réponses manquent souvent de rigueur et de précision.

## Commentaire relatif à la partie A.

L'analyse fonctionnelle du sous ensemble devait permettre aux candidats de s'imprégner du contexte, afin d'aborder la suite du sujet dans de bonnes conditions. Si la majorité a su aborder ces questions, certains n'ont pas répondu d'un point de vue fonctionnel, ce qui était demandé explicitement.

La connaissance des procédés primaires ne semble pas maîtrisée.

Si le refoulement à chaud semble connu de la plupart, certains ne voient pas l'intérêt d'un tel procédé en grande série !!

De même, la majorité des candidats confondent emboutissage avec pliage lors du calcul du flan développé.

Les connaissances élémentaires sur les déformations lors de l'opération d'emboutissage ne sont pas acquises, même pour les questions les plus simples.

Les questions liées à l'anisotropie du matériau n'ont pratiquement pas été traitées.

Sans doute par manque de temps de nombreuses questions intéressantes n'ont pu être abordées correctement.

## Commentaire relatif à la partie B.

Cette partie traitait essentiellement de la définition d'un processus. Si une immense majorité a abordé cette partie, le jury regrette que seule une faible proportion adopte une démarche logique basée sur des fondamentaux comme l'accessibilité aux surfaces à réaliser.

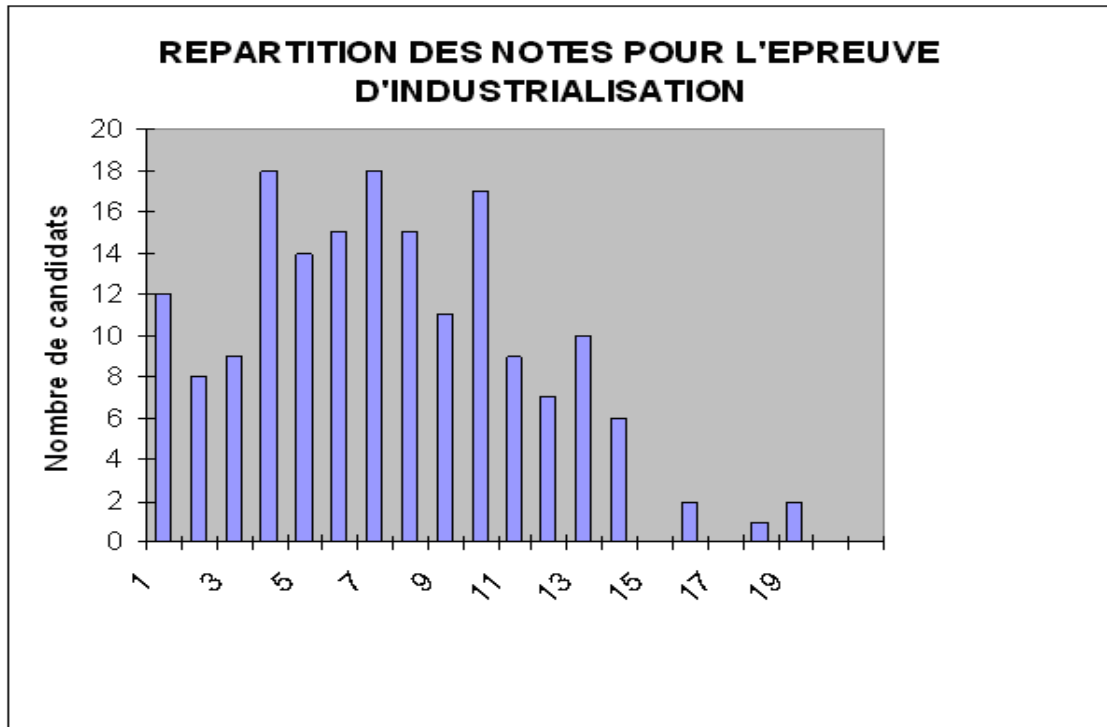
Si le jury regrette globalement le manque de soin apporté par les candidats à la rédaction des documents réponses liés à cette partie, il a pu apprécier qu'une majorité des candidats possède des connaissances sur les traitements thermiques.

## Commentaire relatif à la partie C.

Le jury invite les futurs candidats à s'intéresser plus en détails aux techniques d'optimisation comme les plans d'expériences. Ces outils s'avèrent très performants dans l'optimisation de processus industriels, en particulier lorsque de nombreux paramètres sont à maîtriser.

Si le jury a pu constater que le décodage des spécifications géométriques est généralement bien maîtrisé, l'opérationnalisation de ces connaissances comme la conception d'un montage de contrôle associé semble présenter de grosses difficultés.

## HISTOGRAMME DES RESULTATS.



# Eléments de correction.

## A. ETUDE des PROCÉDES PRIMAIRES.

### A.1 Analyse fonctionnelle du sous ensemble : arbre + cible.

#### A.1.1 Justifications fonctionnelles

- a- FONCTION COMPTER LE NOMBRE DE TOURS : B et A représentent la liaison cible/arbre d'entrée. La tolérance 0,2 intervient dans la fonction de mesure de vitesse angulaire de l'arbre d'entrée qui se fait par comptage sur front montant du signal du capteur inductif
- b- FONCTION COMPTER LE NOMBRE DE TOURS, PRECISION DE L'ENTREFER : agit sur la qualité de la distance séparant les encoches de la cible elle-même, donc sur la qualité de détection des encoches par le capteur inductif
- c- FONCTION COMPTER LE NOMBRE DE TOURS, PRECISION DE L'ENTREFER : suite de « b » : agit sur la qualité de l'entrefer et sur l'équilibrage dynamique de la cible
- d- FONCTION ACTIONNER LES DISQUES D'EMBRAYAGE, ETANCHEITE DE LA CHAMBRE HYDRAULIQUE : Le  $\varnothing 80H9$  assure le centrage cible/arbre avant soudage laser (cette soudure doit être étanche) les autres spécifications caractérisent la portée du joint qui doit garantir l'étanchéité du joint et sa pérennité. La spécification R (sans cote numérique) impose l'existence d'un rayon non nul pour ne pas blesser le joint.

#### A.1.2 Cotation pour la soudure laser.

Cette cotation vise à assurer l'étanchéité de la soudure : Au détail C, le R0,7 impose une valeur de rayon supérieure à celle laissée sur l'arbre par le bec d'outil lors du tournage de la portée et de l'épaulement recevant la cible ( $\varnothing 80H9$ ). Ceci assure le bon appui de la cible sur l'arbre avant soudure.

La spécification de planéité sert à garantir le bon positionnement axial de la cible par rapport à l'arbre avant soudure laser.

#### A.1.3 Rôle des deux pattes.

Ces pattes servent à l'entraînement en rotation du piston d'embrayage repéré 1 au document DTO-2 tout en lui laissant son mouvement de translation.

#### A.1.4 Forme des congés de raccordement.

Après emboutissage, la forme de raccordement de la patte sur le flan aura changé, le raccordement est alors coté sur son encombrement maximal acceptable.

## A.2 Solution actuelle d'obtention du brut de l'arbre.

### A.2.1 Justification du procédé.

Ce procédé s'applique aux très grandes séries, de plus il s'agit d'une pièce de sécurité qui subit des contraintes mécaniques assez importantes qui impliquent robustesse et longévité.

### A.2.2 Processus complet.

- Cisailage du lopin
- Chauffe d'une extrémité et ébauche (3 étapes).
- Formage de l'intérieur de la tulipe.
- Ebavurage/Détourage
- Trempe et Revenu. (affinage de la taille du grain).

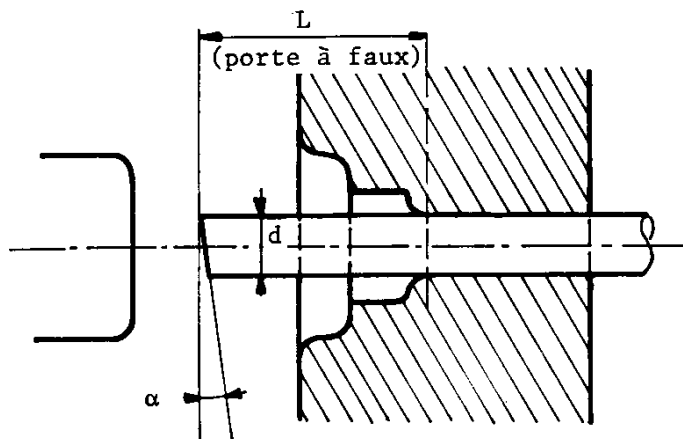
La déformation à chaud a donné naissance à des grains relativement gros, la trempe va fixer un grain relativement fin. Le revenu au voisinage de  $A_{c1}$  va homogénéiser la structure tout en atténuant les effets de la trempe.

- Grenailage

## Refoulements coniques :

On peut théoriquement refouler sans flambage une longueur de barre  $L \leq 3D$ .

Cependant, cette valeur de  $L$  doit être réduite pour tenir compte des imperfections de réalisation, en particulier le défaut de perpendicularité du bout de barre.



### 1) Poinçons plats

(a) si  $\alpha \leq 2^\circ$

$$\frac{L}{d} \leq 2 + \frac{d \text{ en mm}}{100 \text{ mm}} \text{ sans dépasser } 3$$

(b) si  $2^\circ < \alpha \leq 6^\circ$

$$\frac{L}{d} \leq 1,5 + \frac{d \text{ en mm}}{100 \text{ mm}} \text{ sans dépasser } 2,5$$

### 2) Poinçons pointus

(c) si  $\alpha \leq 2^\circ$

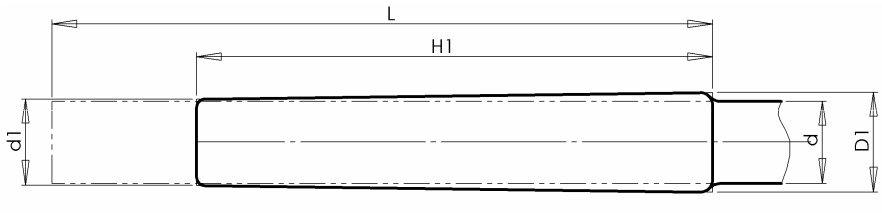
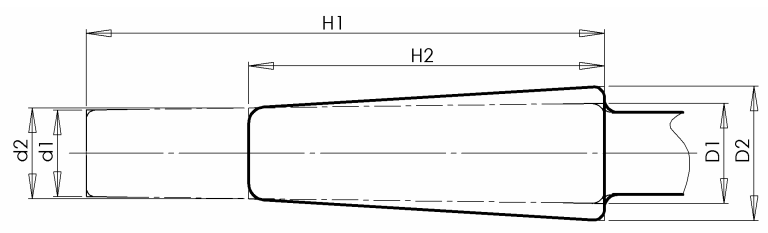
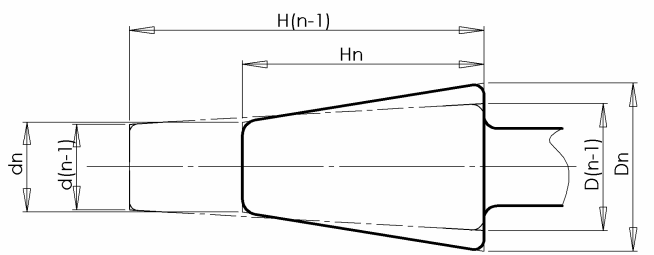
$$\frac{L}{d} \leq 1,5 + \frac{d \text{ en mm}}{100 \text{ mm}} \text{ sans dépasser } 2$$

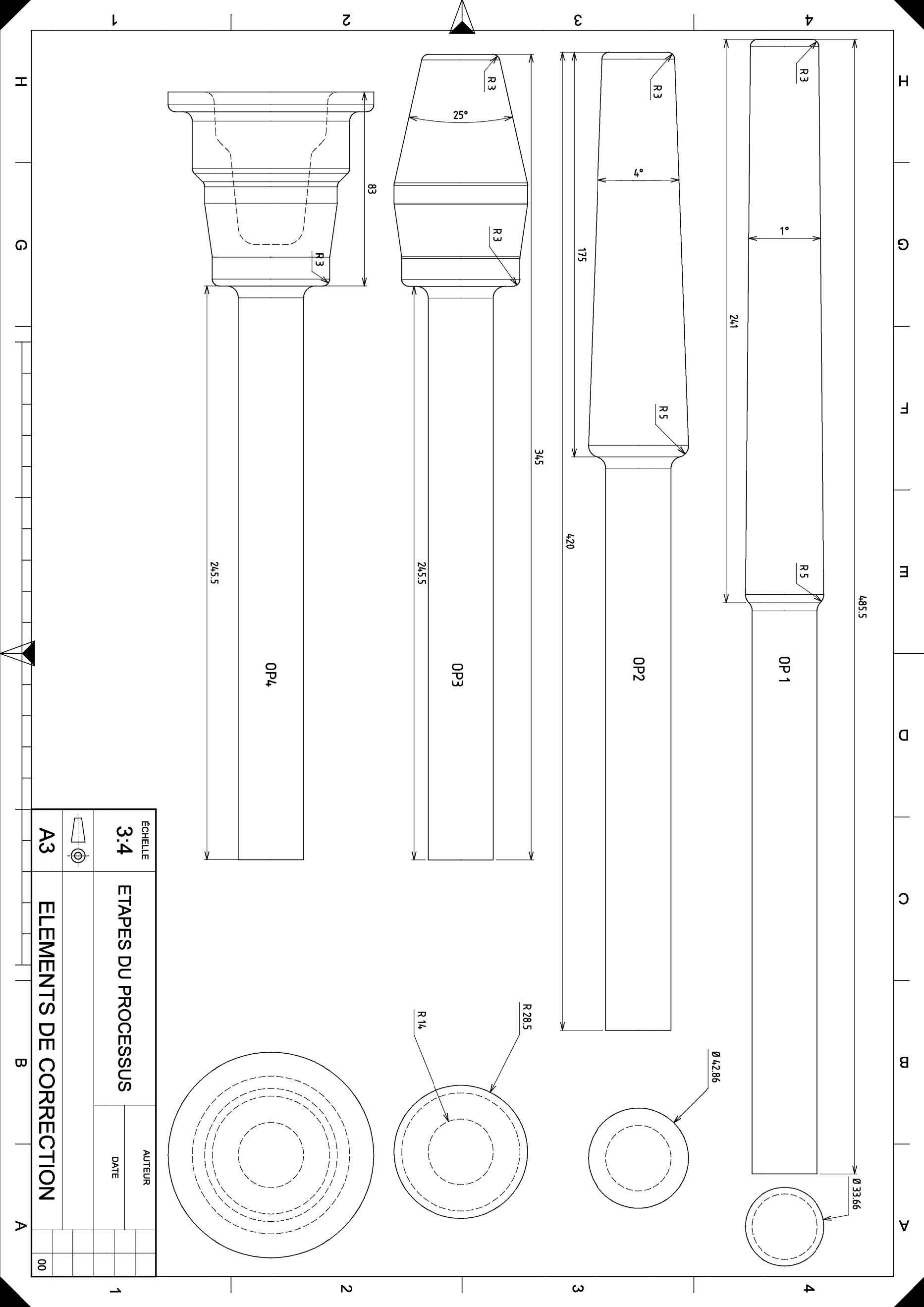
(d) si  $2^\circ < \alpha \leq 6^\circ$


$$\frac{L}{d} \leq 1 + \frac{d \text{ en mm}}{100 \text{ mm}} \text{ sans dépasser } 1,5$$

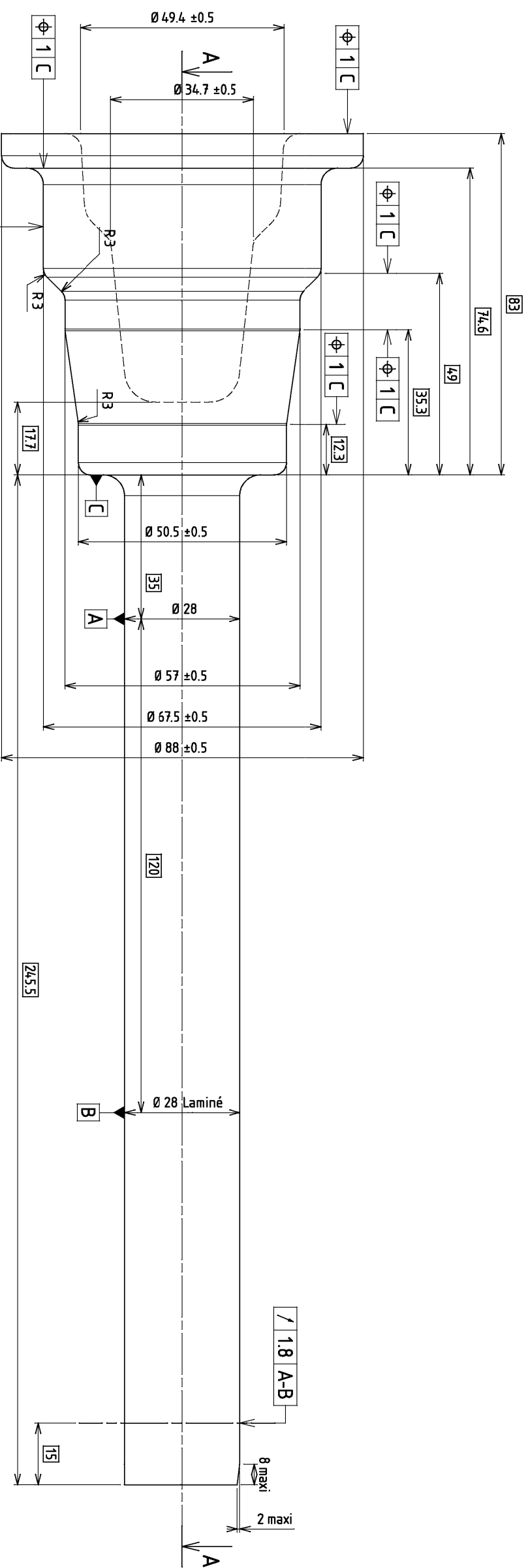
Une longueur supérieure à trois fois le diamètre peut être refoulée en contenant le flambage dans un outillage de diamètre égal à 1,5 fois le diamètre de la barre.

Le plus souvent on pratique des refoulements tronconiques.

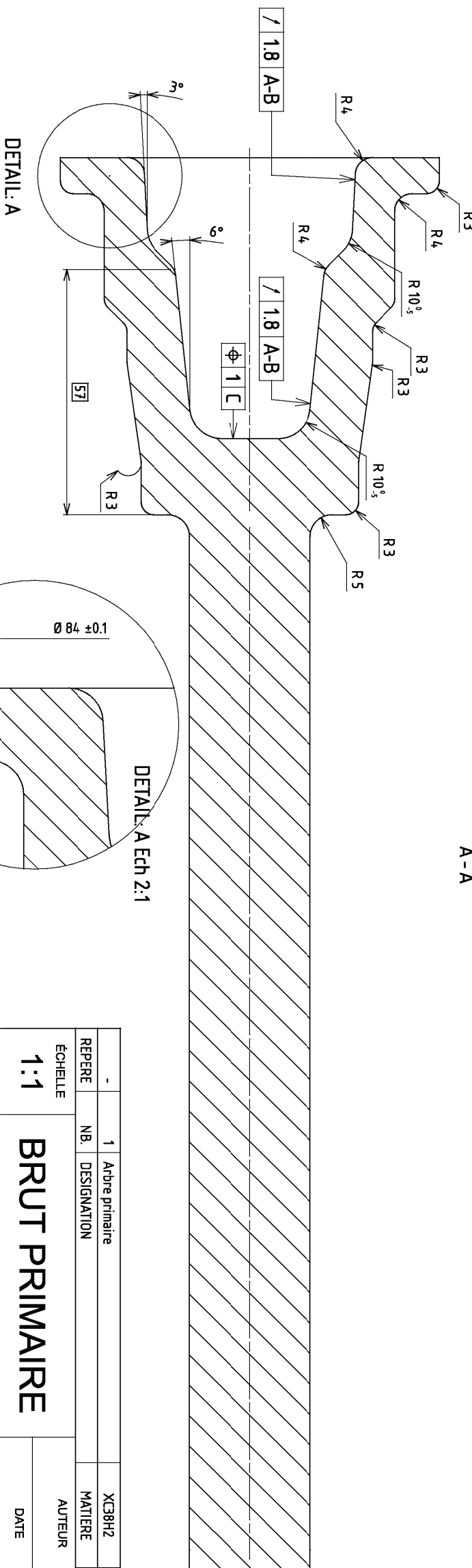
<p><b>Premier refoulement :</b></p> 	$d_1 = 1,05d$ $H_1 = \frac{5}{6}(L - \alpha d) \text{ avec :}$ $\alpha = 0,5 \text{ pour } d < 25$ $\alpha = d/50 \text{ pour } 25 < d < 50$ $\alpha = 1 \text{ pour } d > 50$ $D_1 = 2,26 \sqrt{\frac{V}{H_1}} - d_1$ $dm_1 = (D_1 + d_1)/2$
<p><b>Deuxième refoulement :</b></p> 	$d_2 = 1,05d_1$ $H_2 = \frac{5}{6}(H_1 - dm_1)$ $D_2 = 2,26 \sqrt{\frac{V}{H_2}} - d_2$ $dm_2 = (D_2 + d_2)/2$
<p><b>Refoulements suivants :</b></p> 	$d_n = 1,05d_{(n-1)}$ $H_n = \frac{5}{6}(H_{(n-1)} - dm_{(n-1)})$ $D_n = 2,26 \sqrt{\frac{V}{H_n}} - d_n$ $dm_n = (D_n + d_n)/2$



	ECHELLE <b>3:4</b>	ETAPES DU PROCESSUS	AUTEUR	
	<b>A3</b>		ELEMENTS DE CORRECTION	DATE
				00

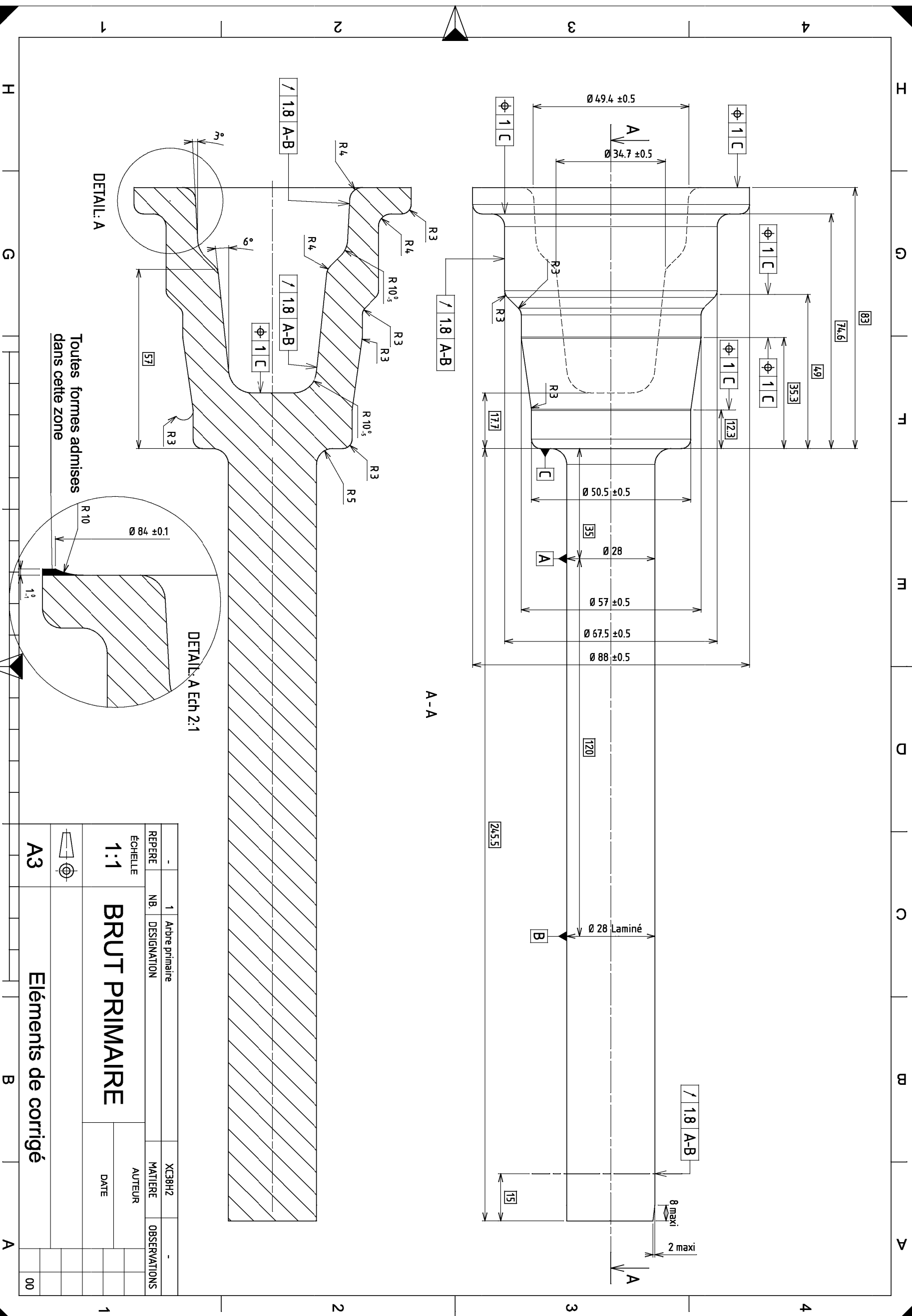


A-A

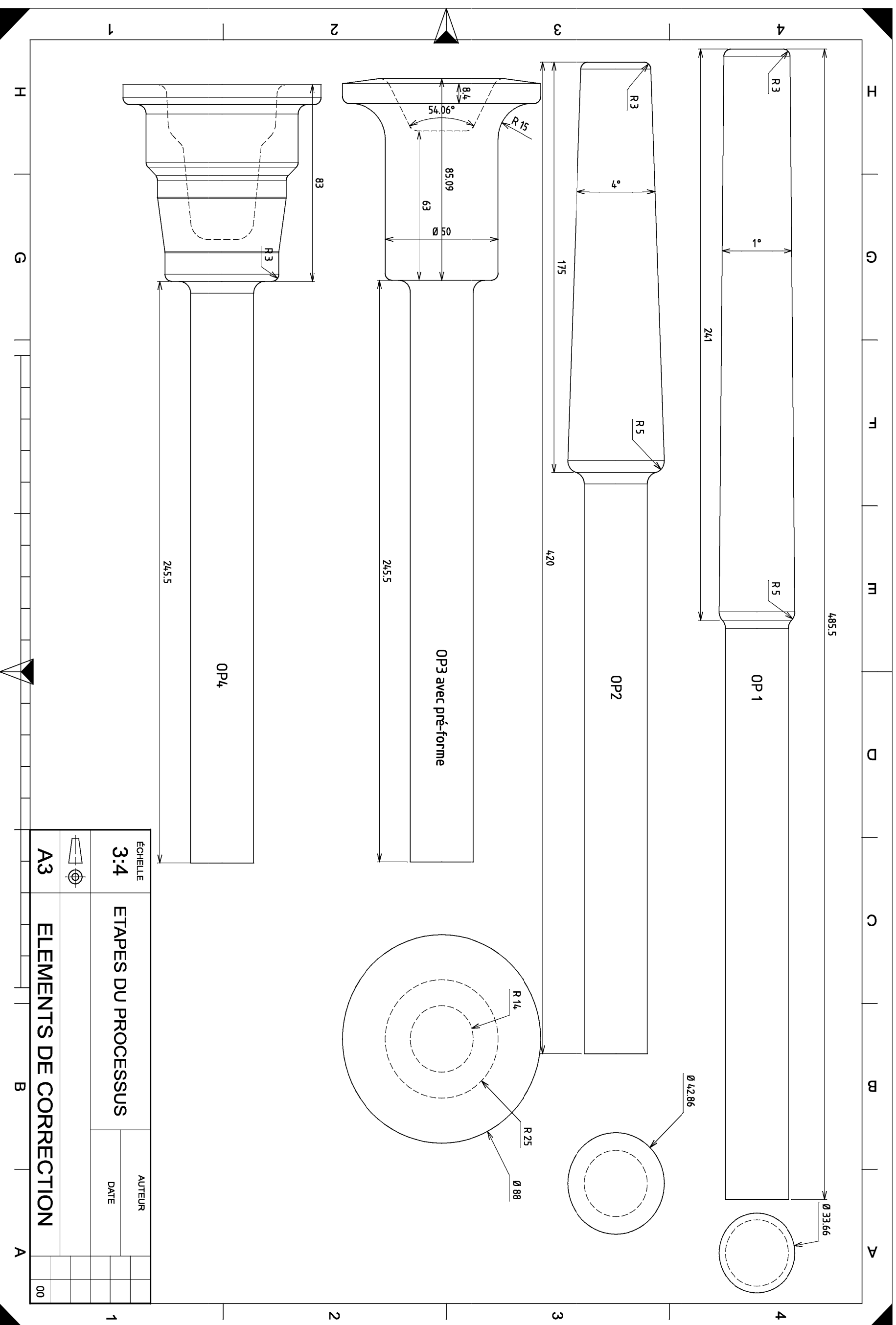


Toutes formes admises dans cette zone

REPERE	-	NB.	1	Arbre primaire	MATIERE	XC38H2	OBSERVATIONS	-
ÉCHELLE	1:1	DESIGNATION	<b>BRUT PRIMAIRE</b>		AUTEUR			
			Éléments de corrigé		DATE			
								00



Autre progression de refoulage avec réalisation d'une préforme à l'état 3.

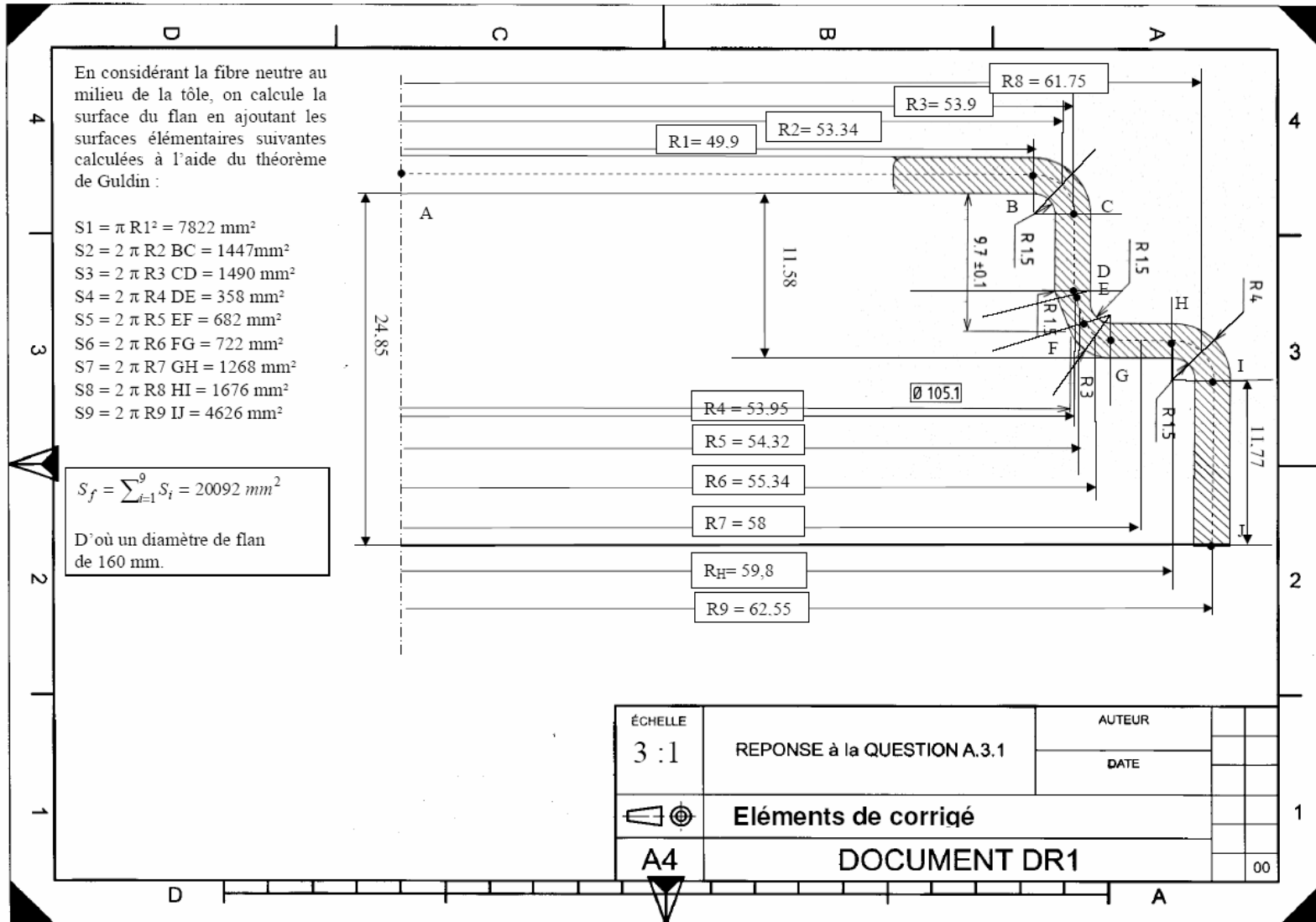


	ÉCHELLE	3.4	AUTEUR	DATE
	ETAPES DU PROCESSUS			
	A3	ELEMENTS DE CORRECTION		
		1		



### A.3 Etude de la découpe du flan de la cible actuelle.

A.3.1



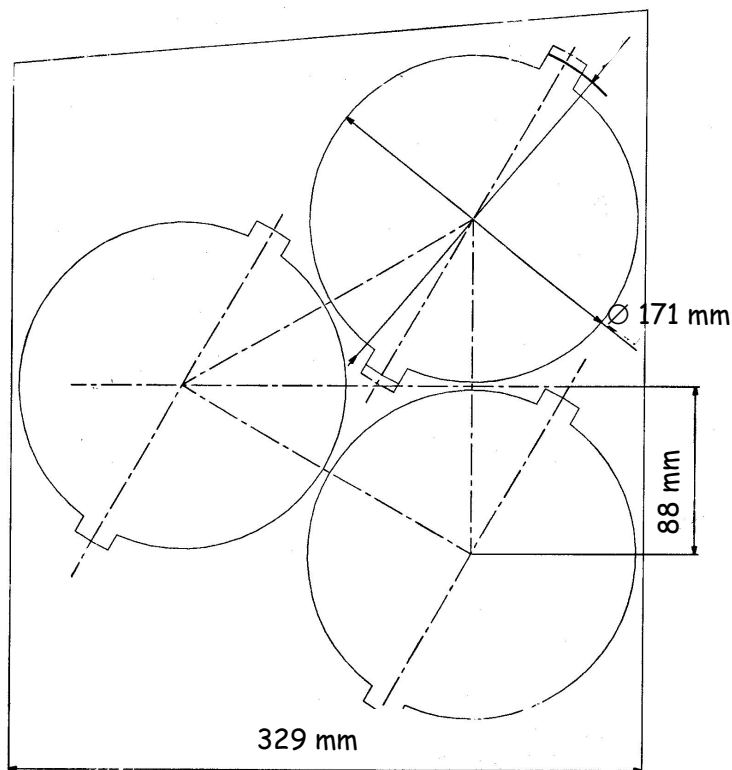
Le diamètre de découpe réel du flan (171 mm) est choisi supérieur au diamètre théorique calculé à la question précédente (160 mm), car les opérations d'emboutissage de la tôle vont provoquer des déformations radiales variables en fonction de l'anisotropie du métal et il sera nécessaire de réaliser une opération de détourage.

La largeur des oreilles (18mm) est supérieure à la largeur des pattes (14,8mm), cela ne consomme pas de tôle supplémentaire et permet de serrer la tôle correctement lors de l'opération de détourage annoncée ci-dessus. (même chose pour la longueur des pattes).

### A.3.2

Le document DT4 donne une distance « A » de 5 mm pour une épaisseur de tôle de 2,5mm et une largeur de bande inférieure à 350 mm.

En respectant cette distance A, on peut proposer la mise en bande suivante :



Cette mise en bande donne une **largeur de bande de 329 mm et de 176 mm de pas d'avance pour 2 flans découpés à chaque pas.**

Soit une surface de bande de 329x88 utilisée pour un flan, soit 28952 mm<sup>2</sup>.

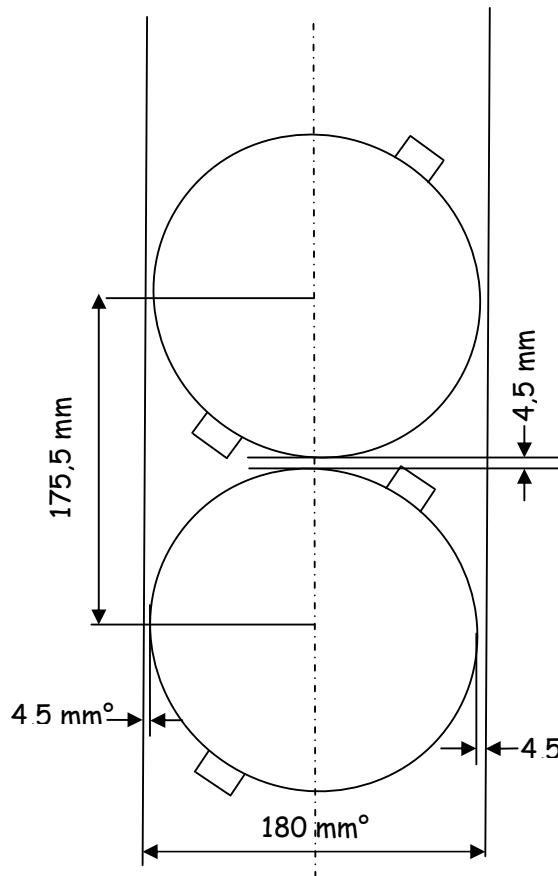
Soit  $S_{f_{th}}$  la surface du flan théorique minimal de diamètre 160 mm avec deux oreilles de 13x14,8 .  
 $S_{f_{th}} = 20491 \text{ mm}^2$

Soit  $S_{f_{réel}}$ , la surface du flan réel de diamètre 171 mm avec deux oreilles de 18x9 .

$S_{f_{réel}} = 22966 \text{ mm}^2$

**Le taux de chute théorique est donc légèrement supérieur à 29% et le taux de chute réel est légèrement inférieur à 21%**

### A.3.3



Ici, le pas d'avance est de 175,5 mm et la largeur de bande de 180 mm.

Le taux de chute théorique est alors de 35%

Et le taux de chute réel est de 27,3%.

Il est donc avantageux de travailler avec une disposition sur deux rangées de flans parallèles.

En effet, même si l'outillage est plus onéreux, compte tenu de la très grande série de pièces à réaliser, ce surcoût sera vite amorti.

A.3.4 Il s'agit d'un acier à haute limite élastique .

La limite élastique  $\sigma_{e_{0,2\%}} \min = 360 \text{ MPa}$

La lettre D signifie acier à « Dispersoïdes ».

A.3.5

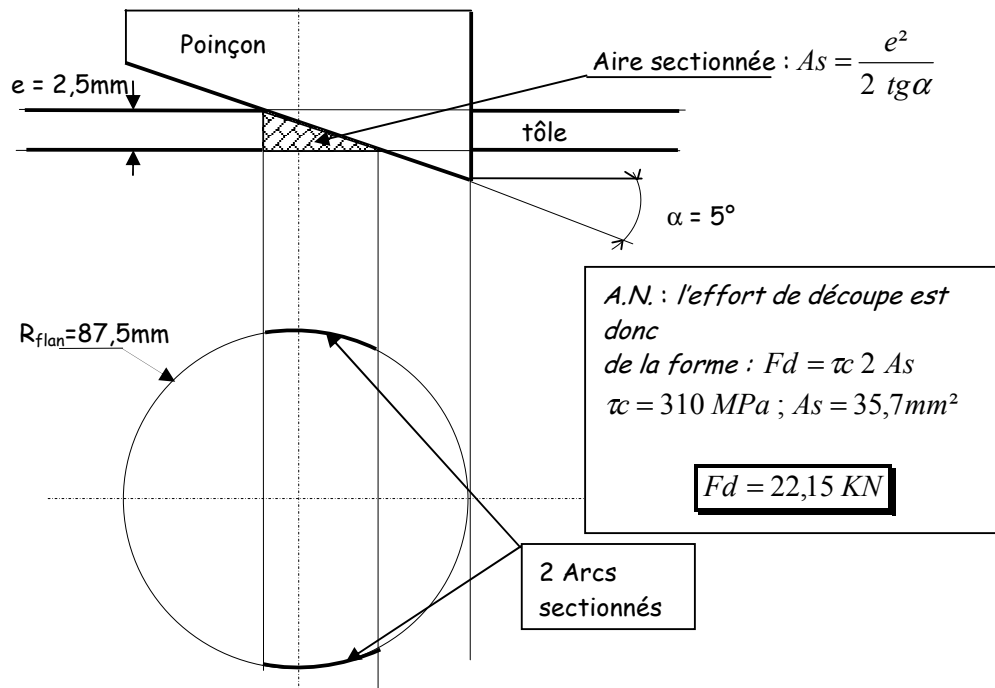
La limite à rupture en cisaillement de l'acier E360D est de 310 Mpa (doc DT3-3)

L'épaisseur de la tôle est de 2,5mm

La circonférence  $L_{fr}$  du flan réel est de  $\pi \times 171 + 4 \times 9 = 573 \text{ mm}$

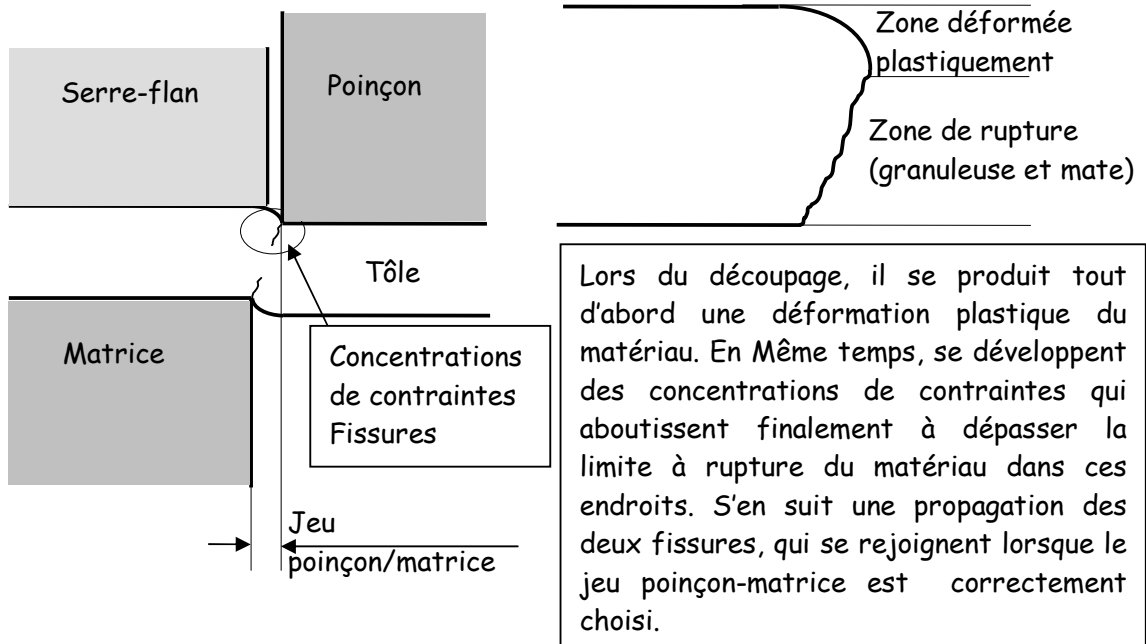
L'effort de découpe avec un outil droit serait de  $Fd = \tau L_{fr}$ , soit  $Fd = 177,7 \text{ KN}$

Avec une vague de coupe de  $5^\circ$ , on peut donner une image de l'effort exercé par la figure suivante :

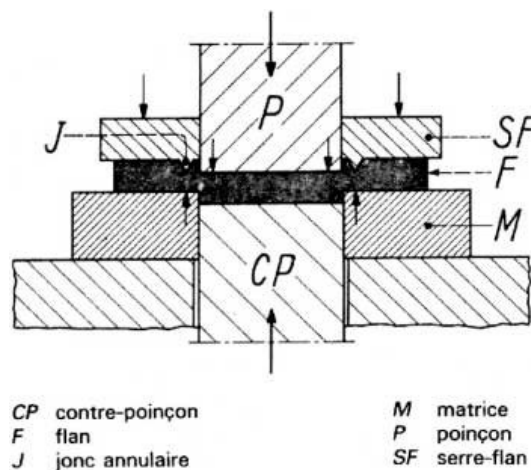


On peut aisément comprendre l'intérêt de la vague de coupe en comparant les valeurs d'efforts. Un autre avantage est celui du bruit de découpe, beaucoup moins important lors d'une découpe progressive. Cependant, cette pente sur le poinçon induit des efforts transversaux qui doivent être pris en compte lors de la conception de l'outillage. **D'autre part, cet aménagement du bout du poinçon ne se fera pas dans ce cas, car il déforme fortement la partie découpée (courbure du flan, perte de la planéité).**

A.3.6 Les paramètres qui influent sur les proportions des deux zones sont la nature du matériau, le jeu poinçon matrice et l'épaisseur de la tôle.



A.3.7 Le découpage fin est fondé sur un très faible jeu de découpe et sur le principe que le matériau est retenu et bloqué au moyen d'un jonc annulaire, avant et pendant toute la durée de l'opération de découpage, le travail se faisant sur une presse à triple effet. Etant donné la très faible vitesse de travail et la compression hydrostatique créée dans la zone de découpe, le matériau a le temps nécessaire pour s'écouler et il n'y a pas de zone de rupture dans la zone de cisaillement. On obtient des pièces découpées avec des parois présentant un très bon état de surface sur toute la hauteur.



Principe du découpage fin (d'après document des techniques de l'ingénieur B 7564).

## A.4 Etude de la mise en forme de la cible actuelle.

A.4.1 Les causes principales sont : un trop grand diamètre de flan par rapport au diamètre du poinçon (rapport limite d'emboutissage)

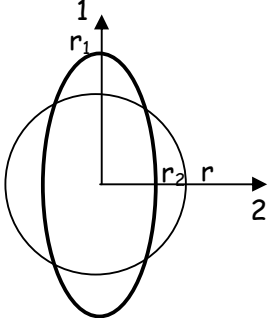
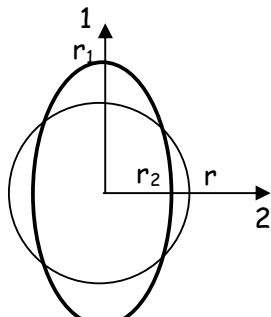
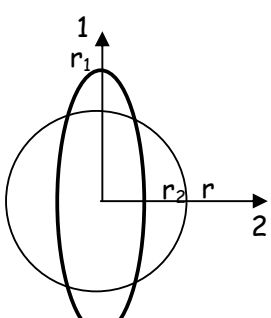
Un effort de serre-flan trop important

Un rayon d'entrée matrice trop faible

Une mauvaise lubrification au contact matrice/flan/serre-flan.

La déformation se fait alors en expansion avec amincissement de l'épaisseur de la tôle et risque de déchirement.

A.4.2 On a par définition  $\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{r_1}{r}\right)$  ;  $\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{r_2}{r}\right)$

	<p>En cisaillement pur,  <math>\varepsilon_1 = -\varepsilon_2</math>            Donc, <math>\ln\left(\frac{r_1}{r}\right) = \ln\left(\frac{r}{r_2}\right)</math> ;            d'où :  <math display="block">r_2 = \frac{r^2}{r_1}</math></p>
	<p>En compression uniaxiale,  <math>\varepsilon_1 = -\frac{1}{2}\varepsilon_2</math>            Donc, <math>\ln\left(\frac{r_1}{r}\right)^2 = \ln\left(\frac{r}{r_2}\right)</math> ;            d'où :  <math display="block">r_2 = \frac{r^3}{r_1^2}</math></p>
	<p>En traction uniaxiale,  <math>\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2</math>            Donc, <math>\ln\left(\frac{r_1}{r}\right) = \ln\left(\frac{r}{r_2}\right)^2</math> ;            d'où :  <math display="block">r_2 = \sqrt{\frac{r^3}{r_1}}</math></p>

A.4.3 Dans la zone 1, la déformation  $\varepsilon_2$  correspond à la déformation circonférentielle du flan. Comme les circonférences en n'importe quel point de la zone 1 vont diminuer lors de la phase 10, on a bien  $\varepsilon_2 < 0$  et  $\varepsilon_1 > 0$ , donc un état de retreint.

A.4.4 La déformation  $\varepsilon_2$  maximale est obtenue pour le périmètre circulaire du flan qui va le plus diminuer au cours de la phase 10. Les deux cas limites sont les suivants :

- Cas A - Le plus grand rayon  $R_x$  du flan qui sera embouti au rayon de la zone tubulaire : on notera la déformation  $\varepsilon_{2a}$
- Cas B - le rayon extérieur du flan : on notera la déformation  $\varepsilon_{2b}$

Le calcul s'effectue sur la ligne neutre.

Le raisonnement se base sur les notations du document corrigé DR1.

On nomme  $R_{ext}$  le rayon extérieur de l'embouti après l'OP10.

Hypothèse du sujet : l'épaisseur de la tôle ne varie pas au cours de l'emboutissage.

$$\text{Cas A : } \varepsilon_{2a} = \ln\left(\frac{R_3}{R_x}\right) ; \quad \text{Cas B : } \varepsilon_{2b} = \ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{flan}}\right)$$

Cas A : Raisonnement : L'OP10 forme la cible du point A au point H , Du point H au point J , la cible sera formée à l'OP30.

Donc, le rayon  $R_x$  se calcule de la façon suivante :

$$R_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 S_i}{\pi}} ; \text{ A.N. : } R_x = 58,5 \text{ mm} \quad \varepsilon_{2a} = \ln\left(\frac{R_3}{R_x}\right) = -0,0819 ;$$

**soit un peu plus de 8%**

Cas B : La collerette de l'embouti à la fin de la phase 10 se termine au point H.

La surface du point H au point J correspond au flan théorique de  $\varnothing 160$  mm, il faut encore rajouter la surface pour passer au flan de  $\varnothing 171$  mm.

$$\text{Soit } S_8 + S_9 + \frac{\pi}{4}(171^2 - 160^2) = \pi(R_{ext}^2 - R_H^2) ;$$

$$\text{d'où } R_{ext} = 80,56 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{2b} = \ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{flan}}\right) = -0,0594 ; \text{ soit environ 6\%}$$

La déformation  $\mathcal{E}_2$  maximale se situe donc sur le périmètre du flan de rayon  $R_x$ .

A.4.5 Emboutir complètement le flan revient à faire se rejoindre les deux cas A et B de la question précédente.

Le rayon initial du flan  $R_{\text{flan}}$  va devenir sensiblement égal au rayon  $r_a$  (doc DT3). Dans la zone de traction tubulaire, l'embouti n'est soumis qu'à une contrainte de traction suivant l'axe de l'opération d'emboutissage.

La contrainte de traction dans une section annulaire de la zone 3 sera prise égale à :

$$\sigma_r = \left[ \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \left[ \ln\left(\frac{R}{r_a}\right) \right] + \frac{2\mu f_{SF/M}}{2\pi \cdot r_a \cdot e_0} \right] e^{\mu' \phi}$$

**Il ne faut pas que cette contrainte dépasse  $\sigma_{lr}$ .**

Remarques :

Quelque soit le taux d'écroutissage du métal à l'entrée de la zone 3, la contrainte  $\sigma_0$  respecte l'inégalité suivante :  $\sigma_0 \leq \sigma_{lr}$ .

D'après la formule de  $\sigma_r$  :

- plus  $R$  est important plus  $\sigma_r$  est important.
- Plus  $f_{SF/M}$  est important plus  $\sigma_r$  est important.
- Plus  $\phi$  est important plus  $\sigma_r$  est important.

On prendra donc les valeurs maximales de chacun de ces paramètres pour le calcul, ce qui surdimensionne légèrement  $\sigma_r$ . En effet, lorsque le flan arrive en contact maximal avec l'arrondi d'entrée matrice, le rayon maximal est inférieur au rayon  $R_{\text{flan}}$ .

A.N. Données :

- Soient  $\sigma_r = 460$  Mpa et  $\sigma_e = 360$  Mpa
- $\phi = \pi / 2$
- $f_{SF/M}$  D'après le document DT3-4, paragraphe 8, l'effort de serre-flan s'exprime par la relation suivante :  $f_{SF/M} = P_{SF} \cdot S$   
avec  $S = \pi(R^2 - (r_{\text{matrice}} + r_{\text{pliA}})^2)$  sera maximal pour  $R = R_{\text{flan}}$   
pour une tôle de 2,5mm la  $P_{SF}$  maximale vaut :  $3 \text{ MPa} \times \frac{2,5}{0,7} = 10,7 \text{ MPa}$ .



Soit un effort de serre-flan maximal  $f_{SF/M} = S_{\max i} P_{SF \max i} = 105 \text{ KN}$

L'abaque du CETIM (Doc DT3-5) nous donne la valeur du rayon  $r_{pliA} = 10 \text{ mm}$

Le DT3-4, paragraphe 6, donne le jeu poinçon matrice  $J = 3,2 \text{ mm}$ .

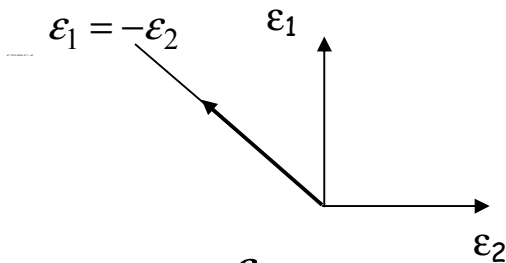
D'où  $r_a = 53,1 \text{ mm}$

**Calcul de  $\sigma_{r \max i}$  : 351,5 MPa pour  $\sigma_r = 460 \text{ Mpa}$ ; donc  $\sigma_{r \max i}$  inférieure à 360 MPa.**

(Le calcul donne  $\sigma_{r \max i}$  : 400 MPa pour  $\sigma_r = 530 \text{ Mpa}$  ; donc  $\sigma_{r \max i}$  inférieure à 460 MPa). On peut donc conclure que  $\sigma_{r \max i} < \sigma_{e \text{ écroui}}$  et même inférieur à  $\sigma_e$  avant formage.

A.4.6 Pendant l'OP10, on se place dans le cas idéal d'emboutissage où l'épaisseur de la tôle ne varie pas (cisaillement pur), soit  $\varepsilon_3 = 0$  et donc  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ .

D'où le parcours suivant :



A.4.7 On a  $r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3}$  ;  $\bar{r}$  est une valeur moyenne de  $r$  ; si  $\bar{r}$  est très grand, alors

$\varepsilon_2$  est très grand devant  $\varepsilon_3$  et pour une déformation  $\varepsilon_2$  donnée,  $\varepsilon_3$  restera petit. La tôle aura donc une bonne aptitude à l'emboutissage puisque son épaisseur ne variera pas beaucoup.

A.4.8 La conservation du volume s'exprime localement par la relation suivante :

$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$  ; comme  $r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3}$  ; on peut déduire de ces deux relations :

$$\boxed{\varepsilon_1 = -\frac{(1+r)}{r} \varepsilon_2} \quad (1)$$

A.4.9 L'opération OP10 d'emboutissage cylindrique transforme un élément de rayon  $dR$  en un élément  $dh$  (cf. document DT7).

Pour simplifier le calcul, on considère les rayons d'entrée matrice et de bout de poinçon ainsi que l'épaisseur de la tôle comme nuls.

L'allongement du métal  $A$  s'exprime donc par la relation suivante :

$$A(\theta) = h_{\text{totale}}(\theta) - R_{\text{flan}} + r_{\text{poinçon}}$$

Il faut donc calculer la hauteur totale de l'embouti  $h_{\text{totale}}(\theta)$  en fonction de l'angle  $\theta$ .

$$\text{Soit la déformation } \mathcal{E}_1 \text{ du métal lors de l'emboutissage : } \mathcal{E}_1 = \ln \frac{dh}{dR} \quad (2)$$

$$\text{De même, } \mathcal{E}_2 = \ln \frac{r_{\text{poinçon}}}{R} \quad (3)$$

A l'aide des relations (1), (2) et (3), on peut écrire :

$$\frac{dh}{dR} = \left[ \frac{R}{r_{\text{poinçon}}} \right]^{\left( \frac{r+1}{r} \right)} \quad (4)$$

En intégrant (4) entre 0 et  $h_{\text{totale}}$ , on obtient :

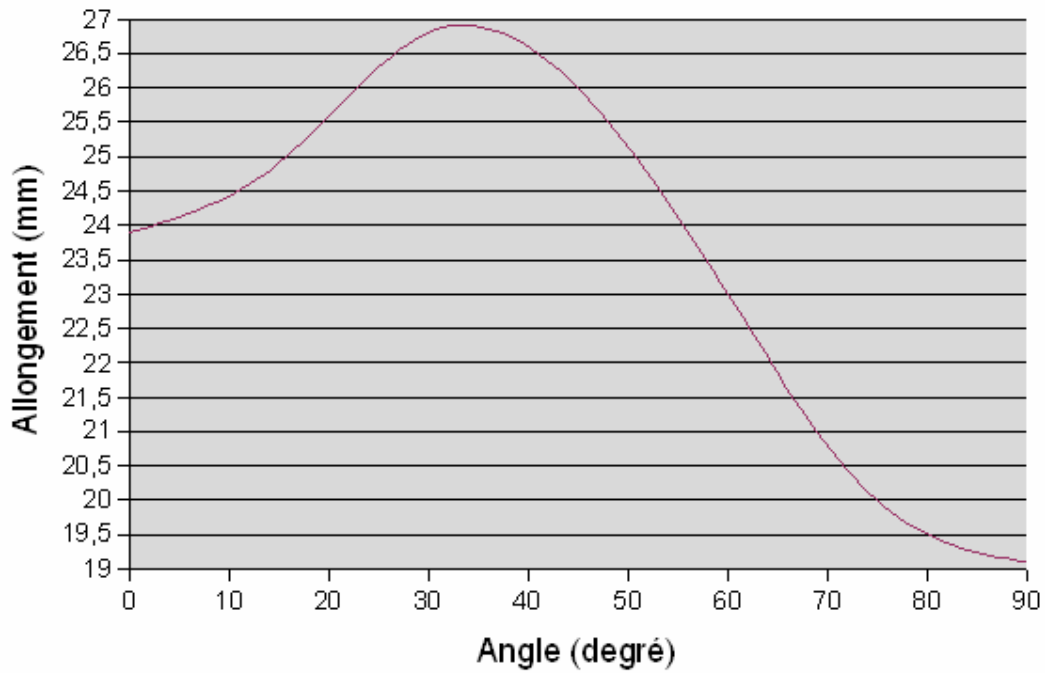
$$\int_0^{h_{\text{totale}}} dh = \int_{r_{\text{poinçon}}}^{R_{\text{flan}}} \left( \frac{R}{r_{\text{poinçon}}} \right)^{\frac{r+1}{r}} dR ; \text{ soit :}$$

$$h_{\text{totale}} = \left[ \frac{1}{r_{\text{poinçon}}} \right]^{\frac{1+r}{r}} \left[ (R_{\text{flan}})^{\frac{2r+1}{r}} - (r_{\text{poinçon}})^{\frac{2r+1}{r}} \right] \left( \frac{r}{2r+1} \right) \quad (5)$$

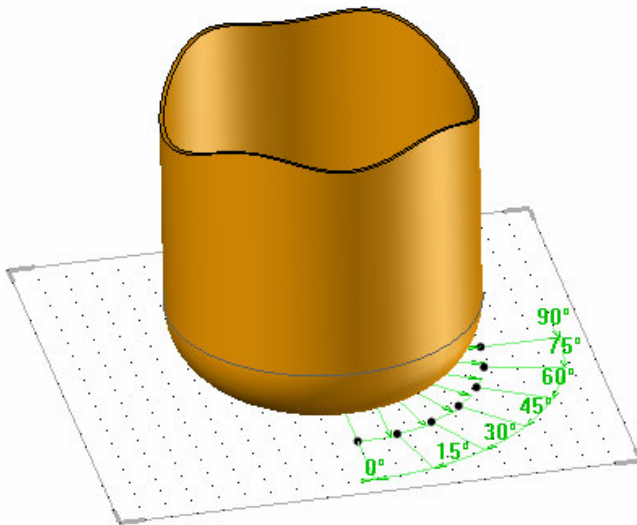
A.4.10 A partir de la relation (5), on obtient :

$\theta$	0	15	30	45	60	75	90
$h(\theta)$	57,9	58,9	60,8	60	57	54	53,1
$r(\theta)$	1,23	1,15	1,03	1,08	1,3	2	1,87
A	23,9	24,9	26,8	26	23	20	19,1

Evolution de l'allongement en fonction de l'angle



A.4.11



A.4.12 Sur le document DT1 figure la cote de  $24,85_0^{+1,5}$  sur la hauteur finale de la cible.

La tolérance sur cette hauteur est donc nettement inférieure à la variation d'allongement du métal calculée à la question précédente ( $26,8-19,1 = 7,7$  mm). Même si l'on n'emboutit pas complètement le flan à l'OP 10, un détourage reste nécessaire après cette opération pour respecter les tolérances sur les hauteurs de la cible.

#### JUSTIFICATION DES OPERATIONS OP60 ET OP70

A.4.13 Toutes les cotes serrées ainsi que les petits rayons :

$\varnothing 102,8 \pm 0,05$	(D.D)
$\varnothing 127,6 \pm 0,2$	(E.E)
$\varnothing 132,2 \pm 0,2$	(D.D)
rayon R1,5 mini	(Détail E)
rayon R	(D.D)

A.4.14 Le jeu poinçon/matrice dans une opération d'emboutissage cylindrique ne permet pas de tenir les tolérances ni de générer de petits rayons.

Le formage se fait ici par un léger laminage du métal entre poinçon et matrice (0,1 mm), ce qui génère un fort écrouissage en surface.

## A.5 Reconception d'un nouveau sous-ensemble complet.

### A.5.1 Relation masse et contrainte de torsion.

Un arbre soumis essentiellement à de la torsion doit admettre une contrainte

tangentielle maximale telle que :  $\tau_{\max} = \frac{T}{\pi \times R^3} \leq \tau_l = \frac{\sigma_l}{2}$  ce qui donne  $R \geq \left( \frac{4 \times T}{\pi \times \sigma_l} \right)^{\frac{1}{3}}$

$$\text{Or } m = \pi \times \rho \times L \times R^2 \geq \pi \times \rho \times L \times \left( \frac{4 \times T}{\pi \times \sigma_l} \right)^{\frac{2}{3}} = \left( \frac{4 \times \sqrt{\pi} \times T}{L^3} \right)^{\frac{2}{3}} \times L^3 \times \left( \frac{\rho}{\sigma_l^{\frac{2}{3}}} \right)$$

Ainsi cette expression est découpée en trois parties, une partie chargement, une partie géométrie et une partie matériau.

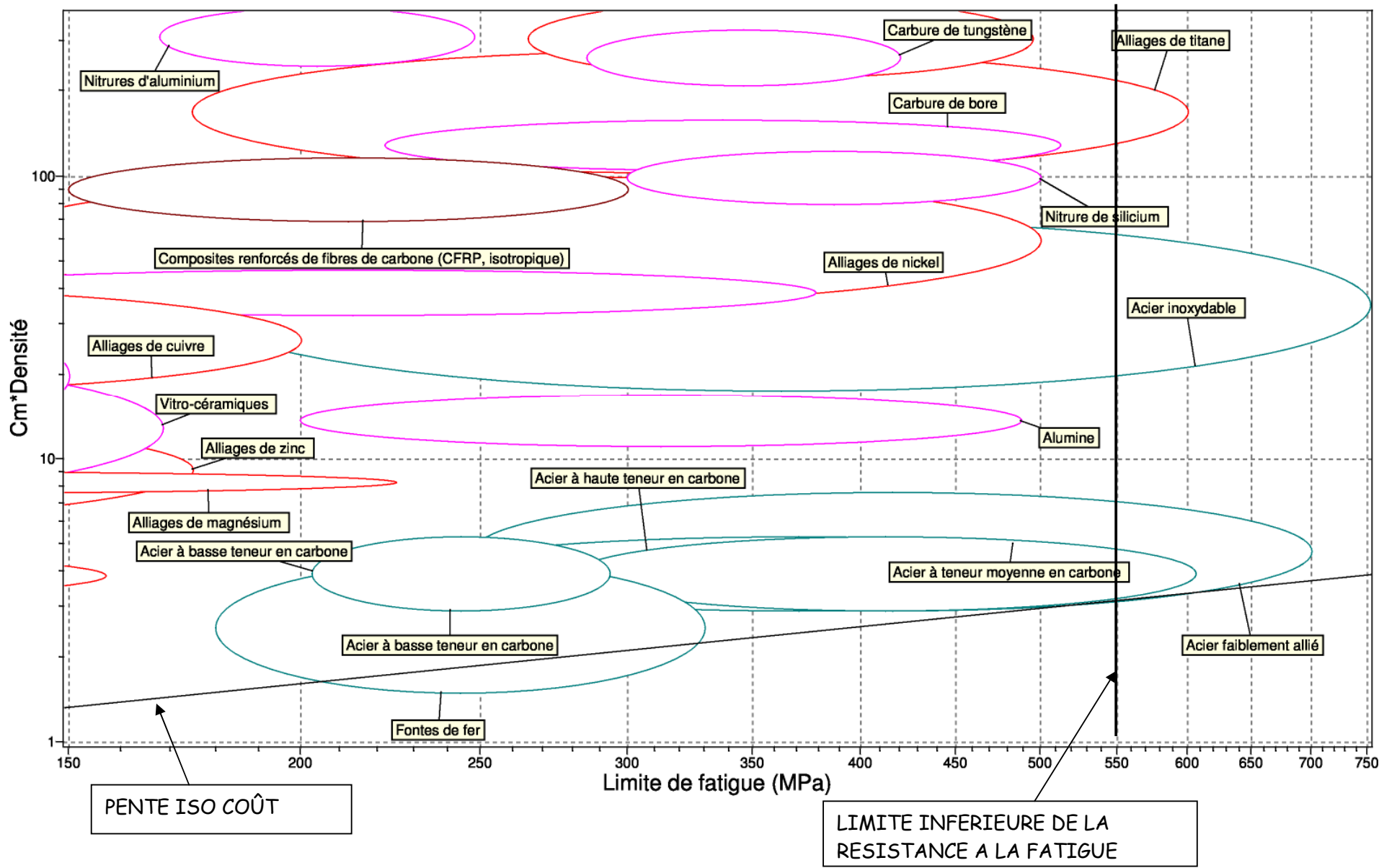
On montrerait aisément que pour un objectif coût il suffit de remplacer  $\rho$  par  $\rho \times C_m$  dans l'expression précédente.  $C_m$  désignant le coût massique.

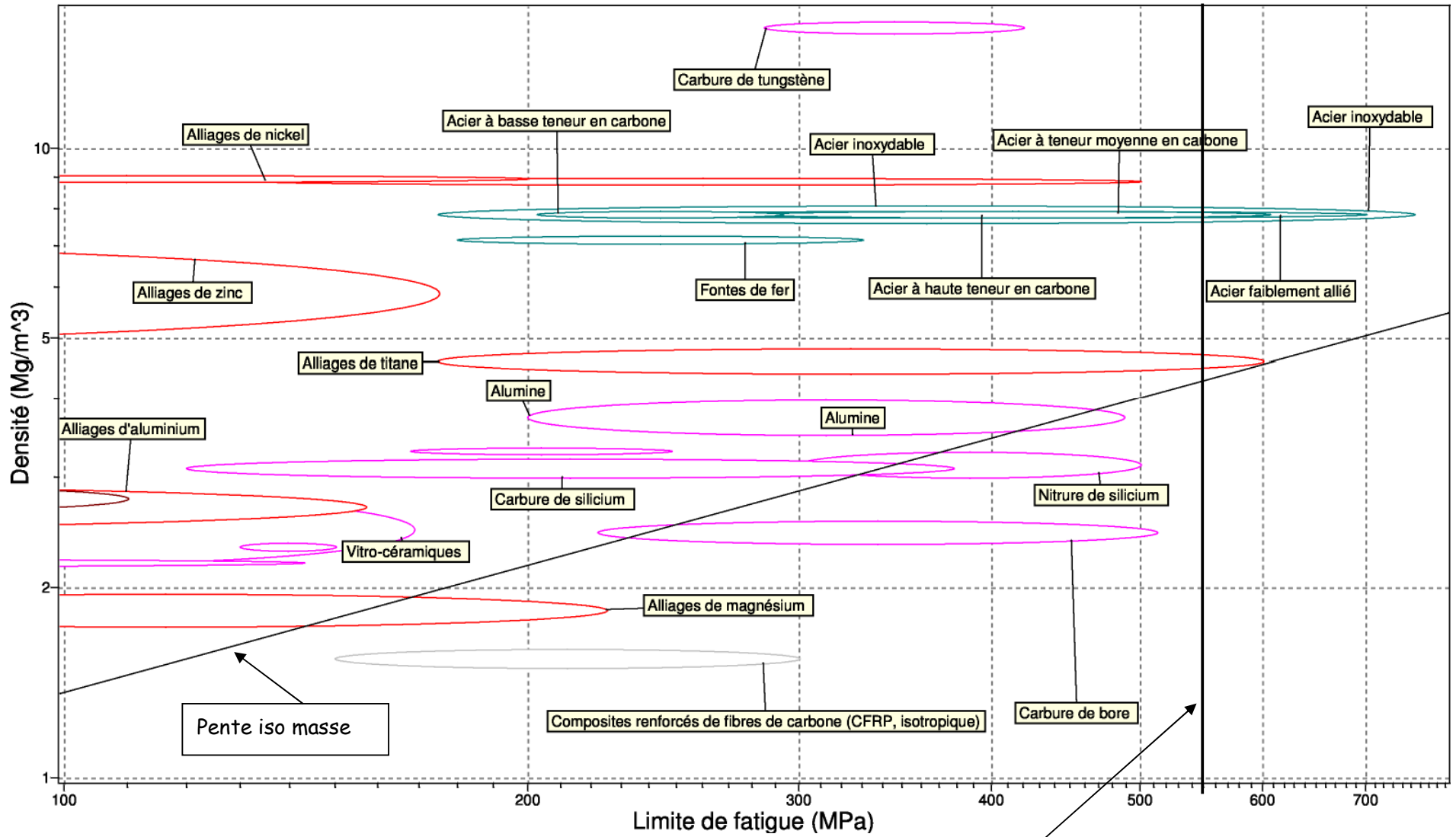
### A.5.2 Utilisation des abaques.

En utilisant le graphe reliant limite de résistance à la fatigue au coût on remarque que la courbe iso coût est à la fois tangente à la famille des aciers à moyenne teneur en carbone et à la famille des aciers faiblement alliés.

En considérant le graphe reliant densité à limite à la fatigue on s'aperçoit que les titanes, les aciers inoxydables ainsi que les aciers faiblement alliés peuvent convenir.

A partir des données de l'énoncé et des différents graphes on obtient que l'utilisation des aciers faiblement alliés s'impose des points de vue masse et coût.





LIMITE INFERIEURE DE LA RESISTANCE A LA FATIGUE

#### A.5.5 Justifications économiques et techniques.

En choisissant à iso-coût un acier faiblement allié possédant une limite à la fatigue nettement supérieure aux meilleurs aciers à teneur moyenne en carbone (630 au lieu de

550 Mpa) il est alors possible de diminuer la section de l'arbre :  $R \geq \left( \frac{4 \times T}{\pi \times \sigma_f} \right)^{\frac{1}{3}}$ .

Ceci a pour conséquence un allègement de celui-ci. Les performances dynamiques de l'arbre sont améliorées ainsi que la masse totale de la boîte de vitesse.



## B. Etude et définition de processus.

### B.1 Définition d'un processus de fabrication.

B.1.1 Justification de la position de la soudure laser dans l'ordonnancement des opérations.

Les spécifications géométriques des deux portées galetées imposent que tous les usinages liés à la partie qui doit subir cet assemblage soient réalisés au préalable. En effet le galetage ainsi que le soudage laser induisent des contraintes assez importantes. Ainsi la maîtrise du processus nous impose de réaliser ces surfaces en dernier lieu.

#### B.1.2 Graphe du processus.

Phase	Désignation	observation
10	Perçages radiaux	Machine transfert
20	Trempe hautes fréquences	Durée très rapide
30	redressage	
40	Tournage extérieur	
50	Roulage des cannelures	Déformation à froid
60	Rectification extérieure.	
70	Ebavurage électrochimique	Suppression des bavures
80	Soudure laser	
90	Tournage int. galetage	

#### B.1.3 Cadence et proposition d'amélioration.

Ce maximum de cadence est imposé par le poste qui représente le goulet d'étranglement. Dans notre cas les temps de cycle les plus élevés concernent les opérations qui se déroulent sur les deux tours : 114 et 110 cmin ce qui donne la cadence suivante : 736 sous ensembles par jour.

Afin d'améliorer la productivité le plus efficace consiste en un dédoublement de ces moyens de production. Ainsi les différentes durées de cycle deviennent homogènes et la nouvelle cadence devient : 1235 sous ensembles par jour car le nouveau poste goulet est alors la rectification extérieure de l'arbre.

### B.2 Etude de l'usinage des surfaces intérieures.

#### B.2.1 Spécifications des surfaces avant galetage.

La maîtrise du galetage passe par la maîtrise des usinages qui précèdent. Il est donc nécessaire de maîtriser la surépaisseur ainsi que l'état de surface des différentes surfaces délicates.

Ainsi d'après le document DRS4-9 il convient de garder une surépaisseur de 0.02mm et adopter un Ra de 2  $\mu m$ .

### B.2.2 Rôle de l'état de surface.

La maîtrise conjuguée impose des conditions de coupe qui définissent un état de surface donné. D'après la question précédente il faut obtenir un Ra de  $2 \mu m$ .

L'ébauche et la demi finition des surfaces intérieures délicates ayant été réalisées, un seul outil de semi finition sera employé.

La géométrie des surfaces à réaliser nous conduit à ne retenir qu'un outil dont la plaquette admet un rayon de 0,8mm. Le document DRS4-11 nous permet d'adopter une avance de 0,25 mm/tr qui permettra de respecter le Ra défini précédemment.

### B.2.3 Contrat de phase et définition des trajectoires.

DR2-1 et DR2-2.

Les différentes précautions à prendre sont les suivantes :

- respecter le rayon de 1mm dans la partie dégagement du diamètre 54H7.
- avoir des dépouilles suffisantes pour respecter les angles de  $23^\circ$  et  $25^\circ$ .
- Choisir des trajectoires qui facilitent l'évacuation des copeaux.
- Choisir des conditions de coupe qui fragmentent correctement la matière.

Les trajectoires devront donc partir de l'intérieur de la pièce afin que l'évacuation des copeaux en soit facilitée, de plus la dernière passe avant galetage devra être effectuée d'un seul tenant afin de rejeter les éventuelles bavures vers l'extérieur où il sera plus facile de les éliminer.

En prenant en compte toutes ces contraintes le choix de l'outil de semi finition (dernière passe avant galetage) est le suivant :

S20S-SDUCR/L 11-M avec une plaquette DCMT 11T308 UM GC4025

avec les conditions de coupe suivantes : s ou f= 0,25 mm/tr  $V_c = 275$  m/min.

La surépaisseur recommandée avant cette opération est de 1,3mm et l'outil devra laisser une surépaisseur de 0.02mm cf. DRS4-9.

Les outils de galetage sont différents, pour le diamètre 54H7 il sera considéré comme débouchant puisqu'il y a une zone de dégagement, alors que pour le diamètre 32H7 il doit être considéré comme trou borgne.

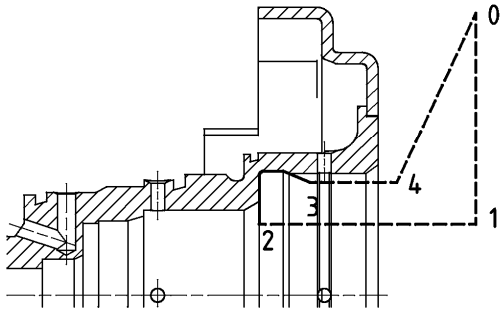
Opérations	Désignation de l'outil	N tr/min	s mm/tr
Galetage $\phi 54H7$	SRMR54	540	3,454
Galetage $\phi 32H7$	SRMB32	900	1,625

La trajectoire de l'outil de semi finition est assez complexe, en effet il faut veiller au respect de plusieurs contraintes :

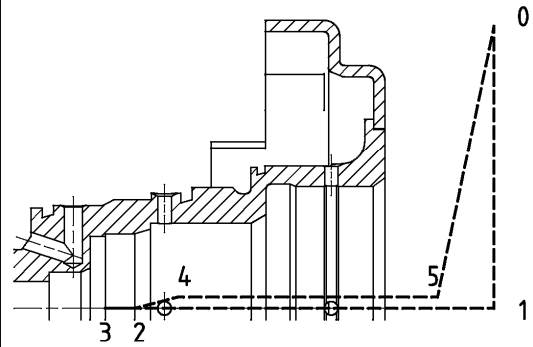
- garder des surépaisseurs pour la dernière passe sur les deux portées à galeter ( $\approx 1,3 \text{ mm}$ )
- Imposer une surépaisseur éventuellement moindre ( $\approx 0,8 \text{ mm} = r_\epsilon$ ) sur les autres surfaces afin de garantir de bonnes conditions de travail pour la dernière passe.
- Enfin la passe finale va laisser une surépaisseur de  $0,02 \text{ mm}$  sur les portées, et finir complètement les autres surfaces. Cette dernière passe devra s'effectuer de l'intérieur vers l'extérieur.

## DR2-2: DEFINITION des TRAJECTOIRES

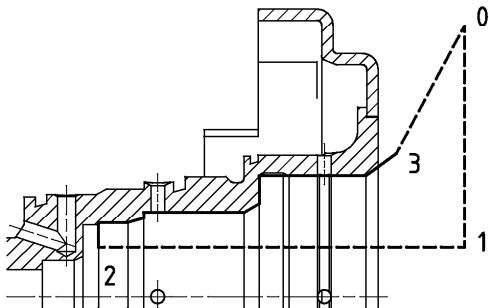
OP N° 1 Evider la gorge intérieure



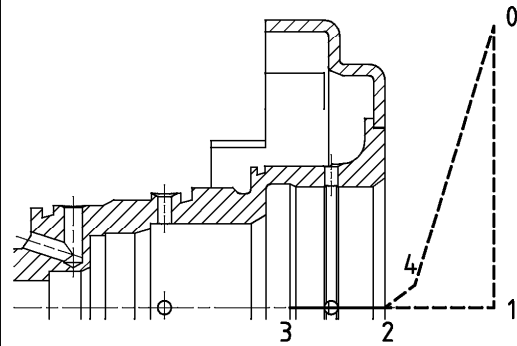
OP N°4 GALETAGE Diamètre 32H7



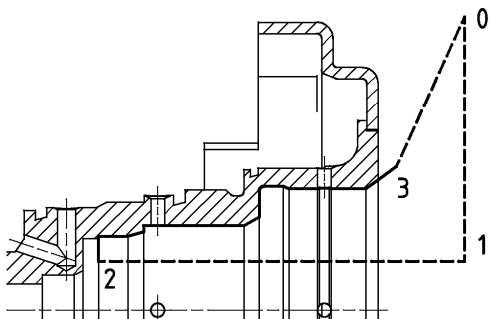
OP N° 2 DEMI FINITION avec SUREPAISSEURS



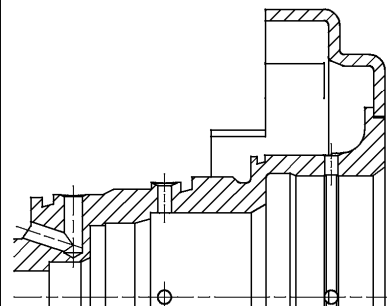
OP N°5 GALETAGE Diamètre 54H7



OP N°3 FINITION AVANT GALETAGES



OP N°\_\_



# DR2-1- CONTRAT DE PHASE

Ensemble: Arbre + cible d'entrée

Pièce:

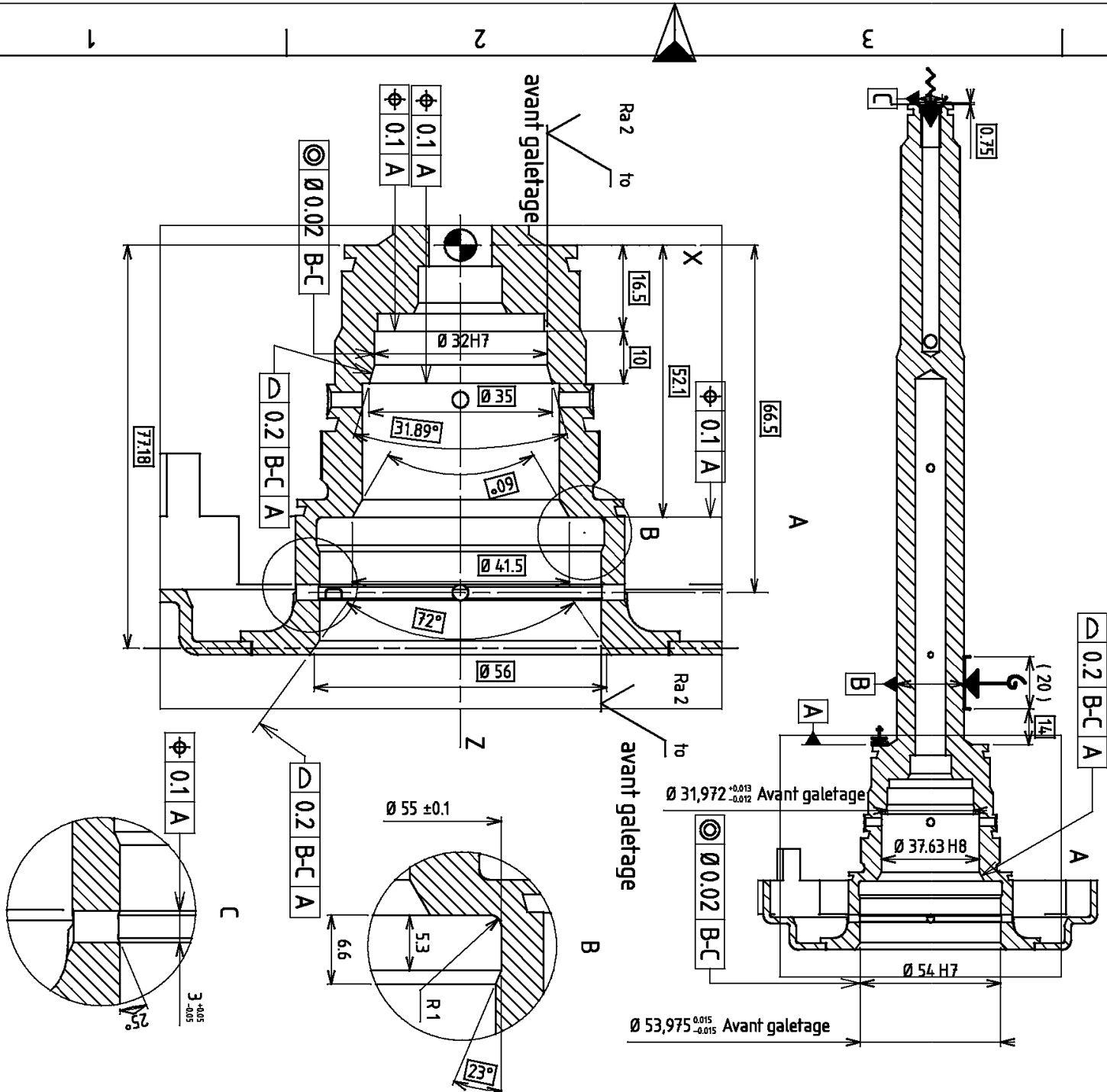
Lot: 1200

Fréquence: Tous les jours

Date:

Phase: Désignation de la phase: Usinages int. + galetage

Machine: TCN



N°	Opérations	Outils	Vc	f/Vf
1	Evider la gorge intérieure	S20S-SDUCR/L 11-M DCMT 11T308 UM GCA025	335 m/min	0.1
2	1/2 Finir les surfaces intérieures	S20S-SDUCR/L 11-M DCMT 11T308 UM GCA025	275 m/min	0.25
3	Finir avant galetage	S20S-SDUCR/L 11-M DCMT 11T308 UM GCA025	275 m/min	0.25
4	Galetter diamètre 32H7	SRMB32	900 t/min	1,625
5	Galetter diamètre 54H7	SRMR54	540 t/min	3,454

H G B A

#### B.2.4 Cotation de fabrication de la phase de tournage.

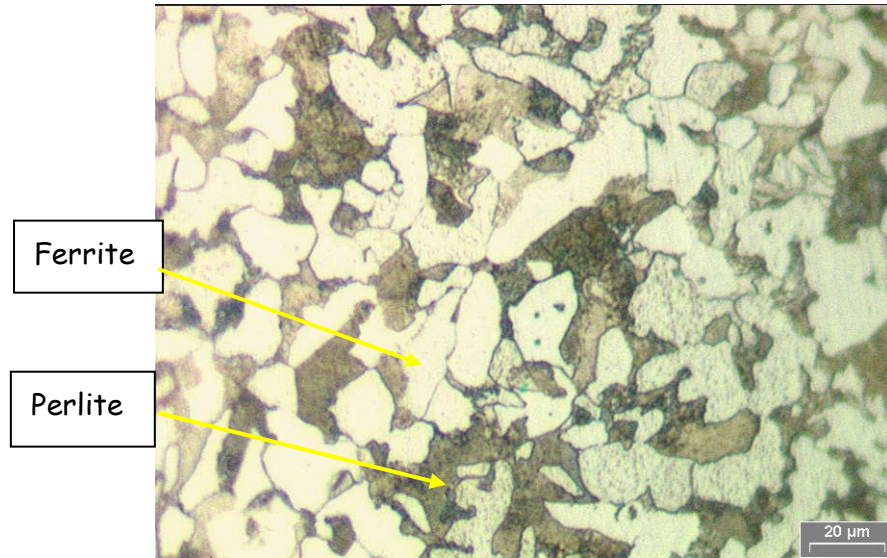
##### DR2-1

- Il est impératif de définir la situation ainsi que la nature de la mise en position.
- Il s'agit d'un ensemble constitué de deux pièces qui ne permet le maintien et la mise en position que sur la partie arbre dont le rapport L/D est important. Ceci nous impose une mise en position du type « centrage long + butée ». On rappelle que toutes les autres surfaces de la pièce sont terminées cf. question B.1.1.
- On doit également préciser la situation de l'origine de programmation ainsi que la définition des axes de la machine.
- Il est nécessaire de situer les différentes surfaces réalisées par rapport au référentiel de la phase.
- Dans cette phase on doit préciser les cotes le Ra avant galetage pour les diamètres 32H7 et 54H7.

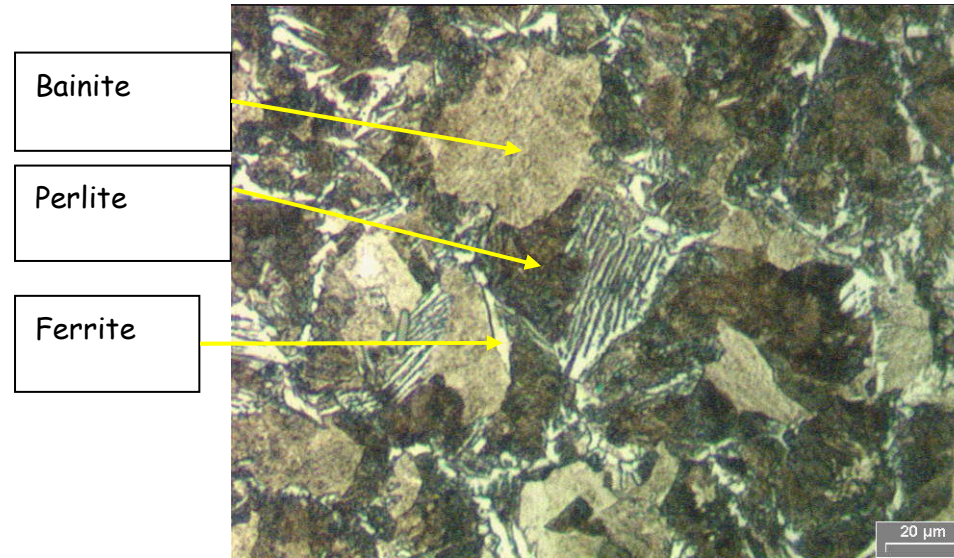


### B.3 Paramétrage d'un procédé de traitement thermique.

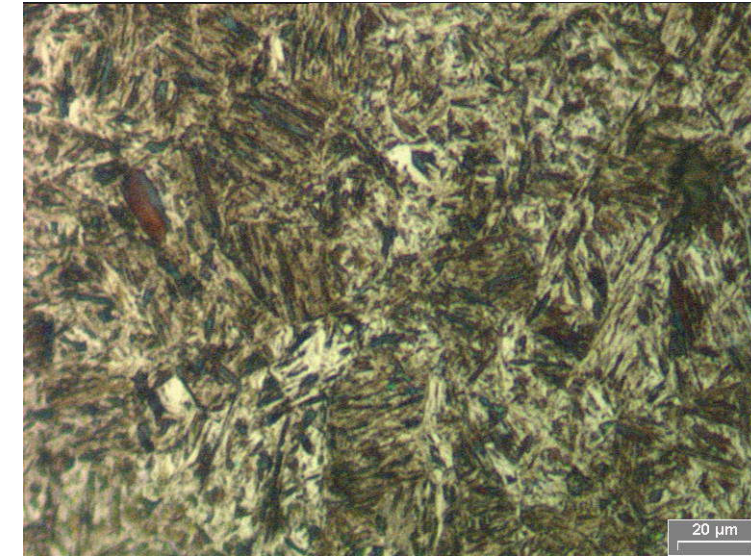
#### B.3.1 Ordonner les différentes micrographies.



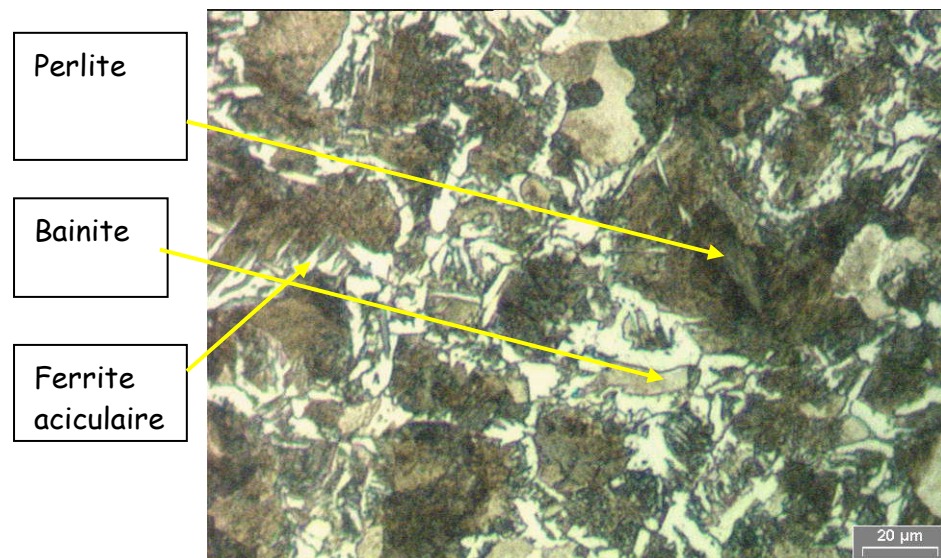
Profondeur Jominy : 45 mm  
Composition : ferrite + perlite  
Dureté approximative estimée HV = 160 - 170  
Courbe de refroidissement : f



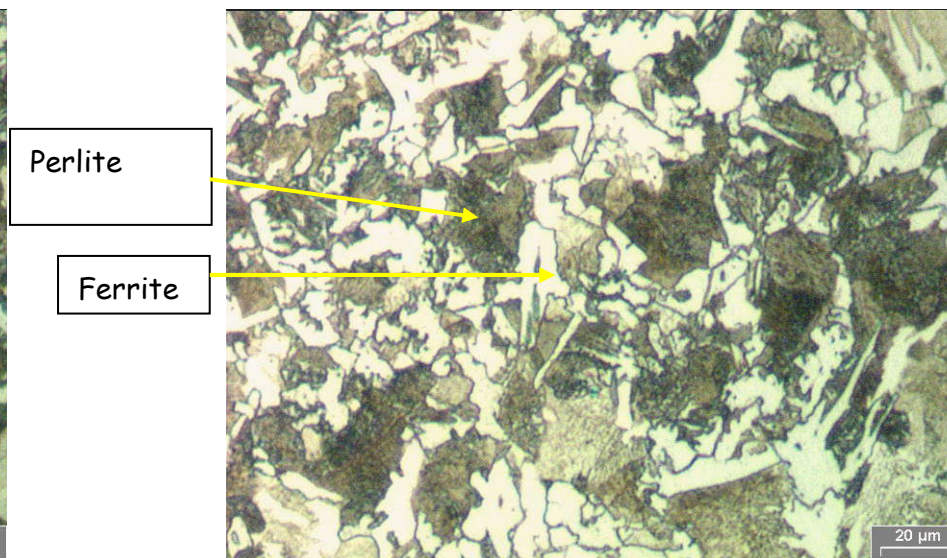
Profondeur Jominy : 7 mm  
Composition : Ferrite + bainite supérieure + bainite inférieure. Dureté estimée de l'ordre de 400 HV  
Courbe de refroidissement : c



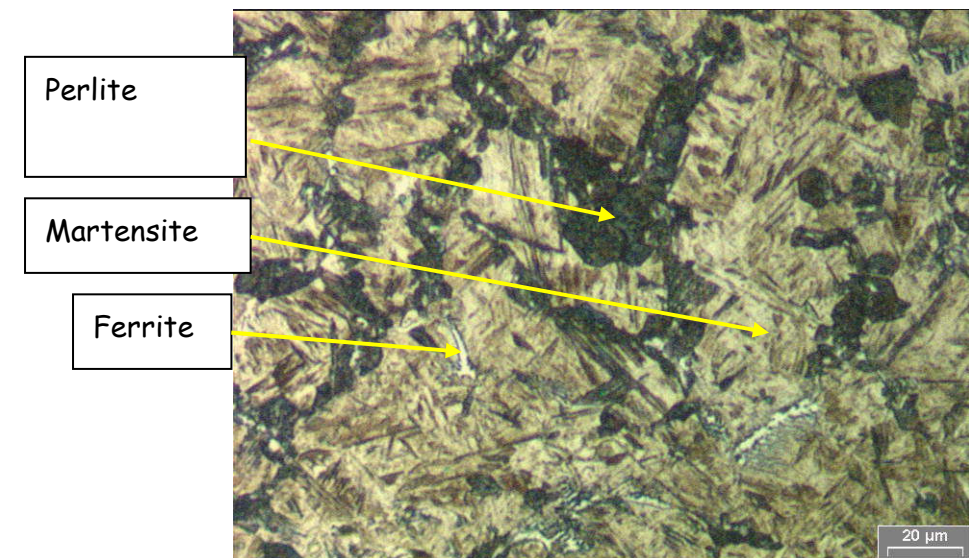
Profondeur Jominy : 1 mm  
Composition : martensite à 100%  
Dureté estimée de l'ordre de 600 HV ou plus  
Courbe de refroidissement un peu avant : a



Profondeur Jominy : 14 mm  
Composition : ferrite aciculaire + bainite supérieure et peut être un peu de bainite inférieure Dureté approximative de l'ordre de 200 à 220 HV. Courbe de refroidissement : d



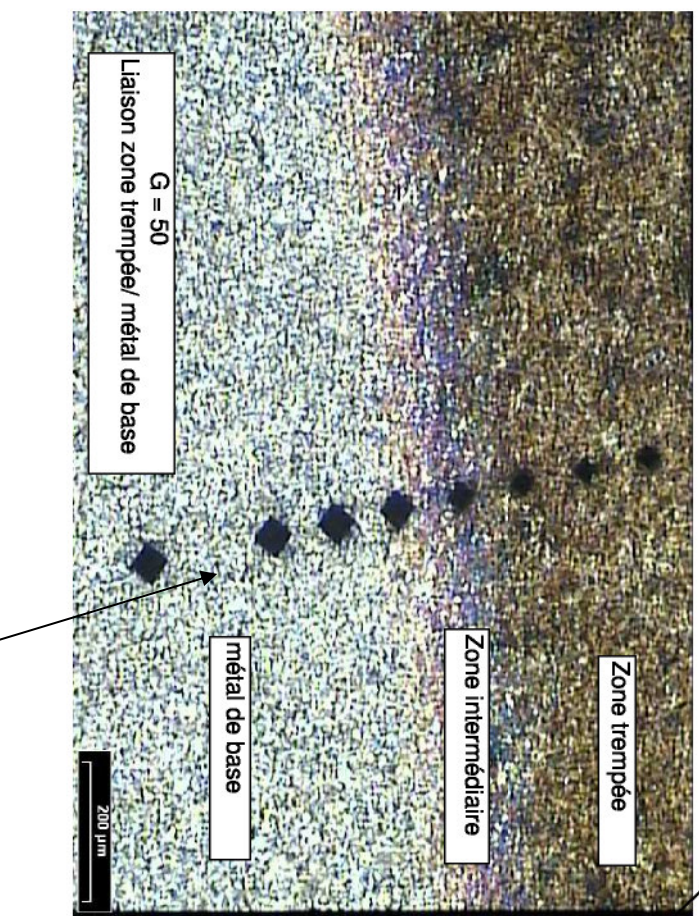
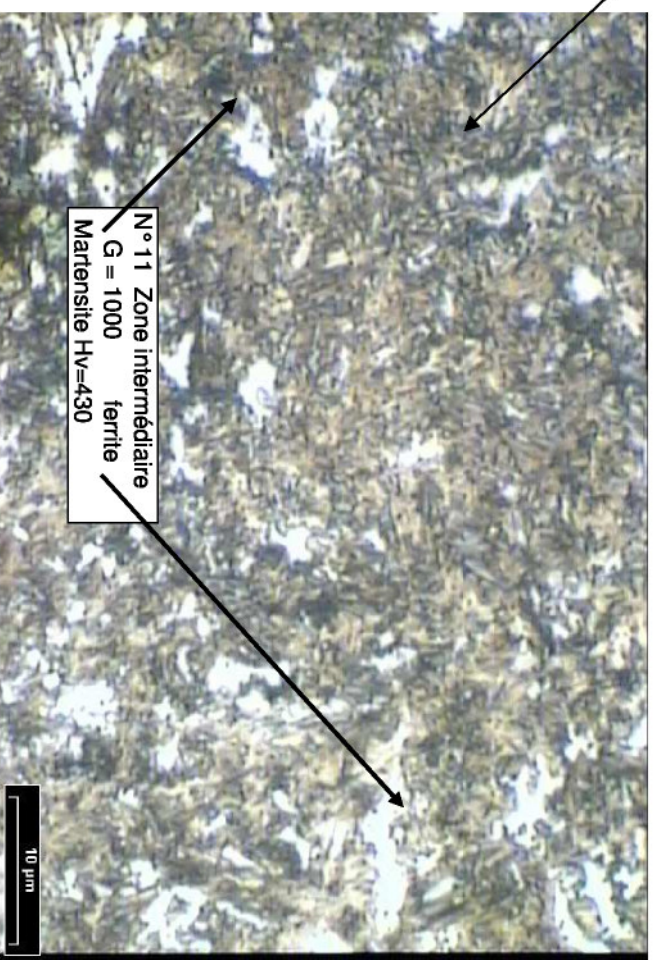
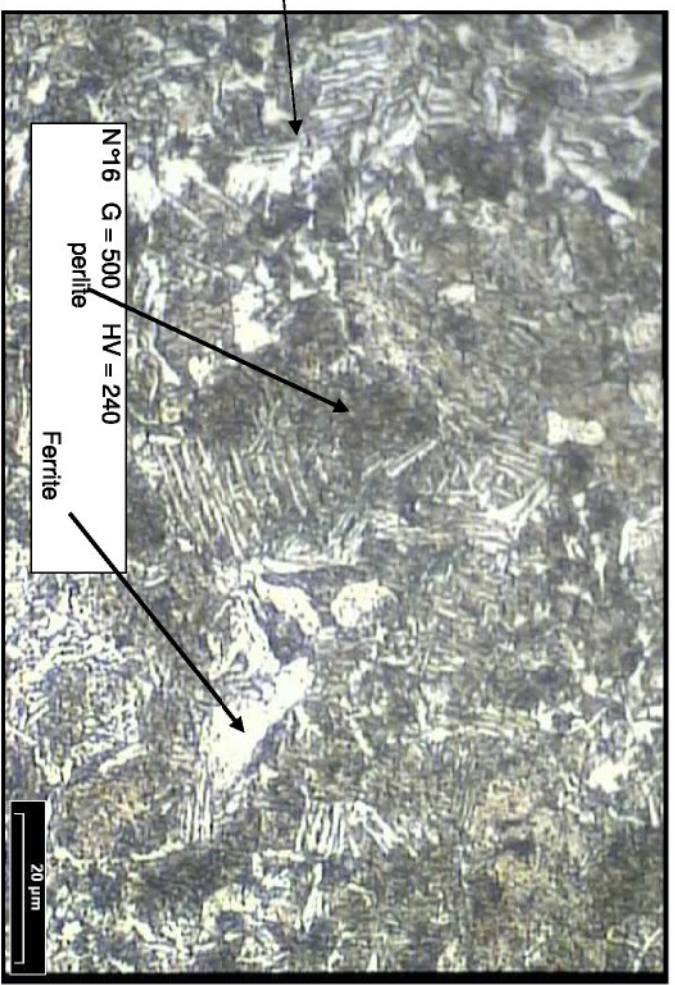
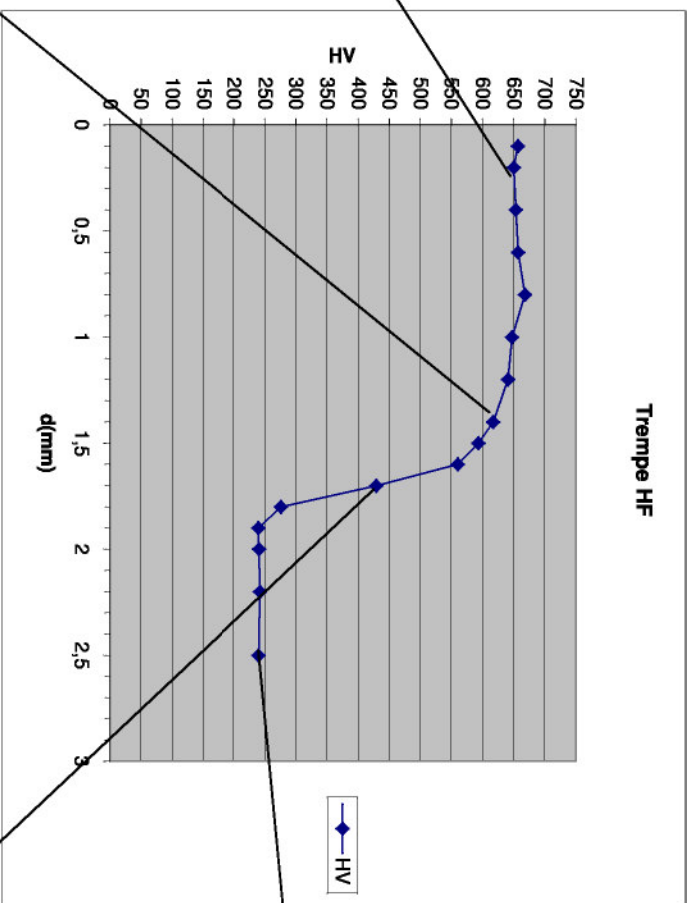
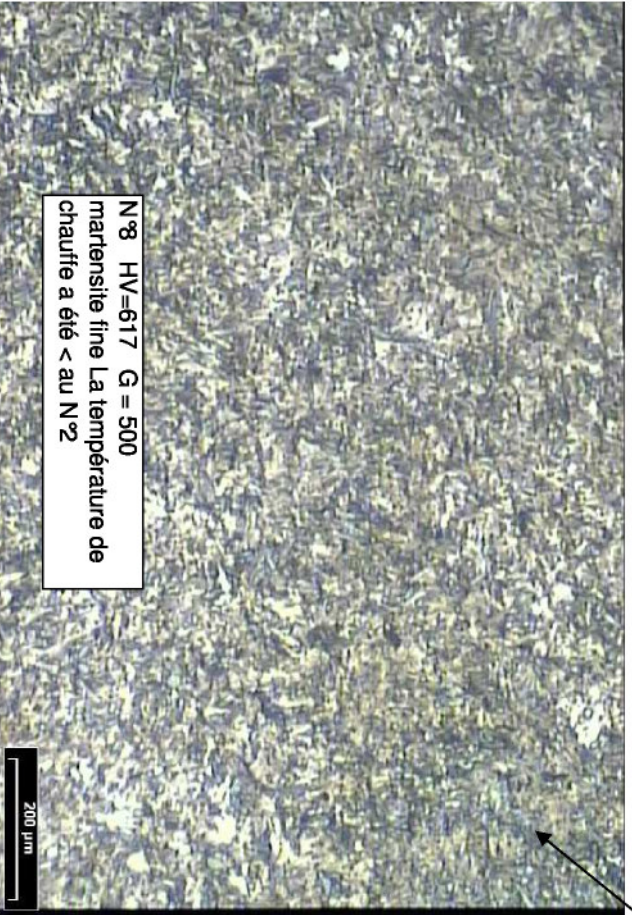
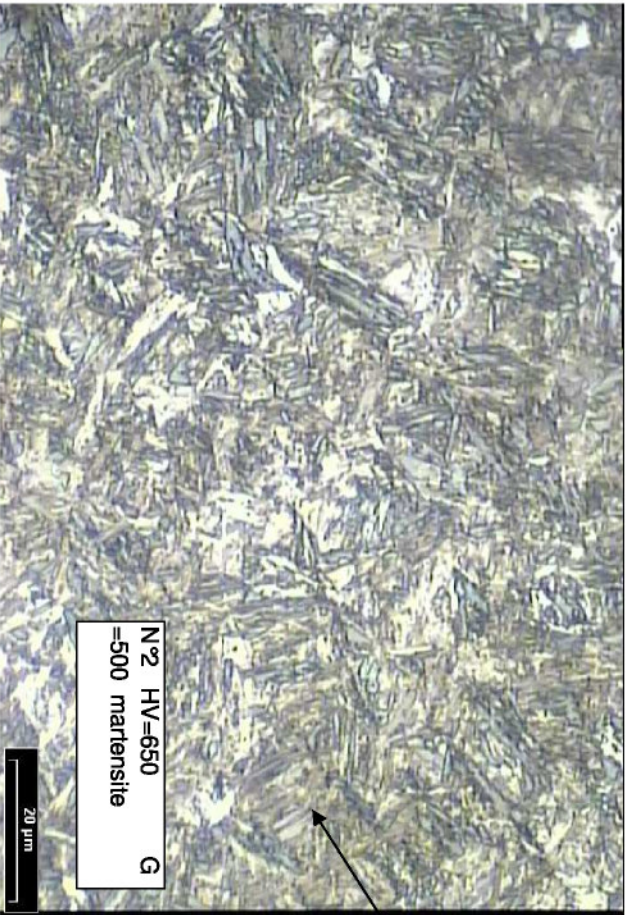
Profondeur Jominy : 20 mm  
Composition : Bainite supérieure et ferrite  
Dureté approximative = 200HV  
Courbe de refroidissement : e



Profondeur Jominy : 5 mm  
Composition : martensite + bainite supérieure + fins liserés de ferrite. Dureté approximative = 500HV.  
Courbe de refroidissement : b



EXAMEN D'UNE SECTION DROITE DE LA PIÈCE.



EMPREINTES LAISSEES PAR UN ESSAI DE MICRODURETE



### B.3.2 Justification du TTH

Ce traitement thermique doit respecter les contraintes fonctionnelles définies sur le dessin de définition, soit une dureté superficielle sur une couche de 0,5mm, en réalité on observe cette dureté sur une profondeur de 1,5mm. Par ailleurs il faut que le temps de cycle du procédé soit cohérent avec les autres procédés du process. Ainsi la trempe par induction respecte parfaitement ces différentes conditions.

### B.3.3 Paramètres pour le traitement thermique.

Les principaux paramètres du tth sont :

- la température d'austénisation : 850 °C
- la vitesse de refroidissement  $\Delta T_{300}^{700}$

En observant que la profondeur de traitement est très réduite 3mm Maxi, que l'exigence de dureté (500 Hv) doit tout même être satisfaite pour une profondeur de 0.5 mm mini, on peut considérer que le modèle de refroidissement au voisinage de la peau est acceptable.

Ceci correspond approximativement à la courbe de refroidissement b.

Ainsi le  $\Delta T_{300}^{700}$  correspond à la sévérité 0.013.

Pour ce matériau on observe que la vitesse de refroidissement doit être assez importante, ce qui impose un refroidissement à l'eau. Qui plus est, pour garantir ce refroidissement la mise en place d'un refroidissement par jet d'eau s'impose.

### B.3.4 Composition dans l'épaisseur du matériau.

Ainsi nous allons retrouver dans le matériau certaines structures observées dans la question 3.1. En effet la trempe H.F. localise assez bien la zone affectée thermiquement. Cela nous permet de dire que nous retrouverons d'une part des compositions équivalentes aux courbes de refroidissement : a et b et f d'autre part

### B.3.5 Causes des déformations.

La cause principale est due à l'inégale répartition des différents trous radiaux, on peut également évoquer l'hétérogénéité de la matière, le refroidissement par jet d'eau dont l'action ne respecte pas parfaitement la symétrie cylindrique de la pièce.

Dans tous les cas il faut garantir la rectitude de l'arbre pour son fonctionnement, ce qui impose une telle opération.

## **C. Maîtrise des paramètres, qualité et contrôle.**

### **C.1 Optimisation d'un procédé de soudage.**

#### **C.1.1 Avantages du procédé.**

Ce procédé est rapide, la zone affectée thermiquement est réduite, la maîtrise du procédé peut être stabilisée par la maîtrise de certains paramètres. En grande série ce procédé est rapidement amorti.

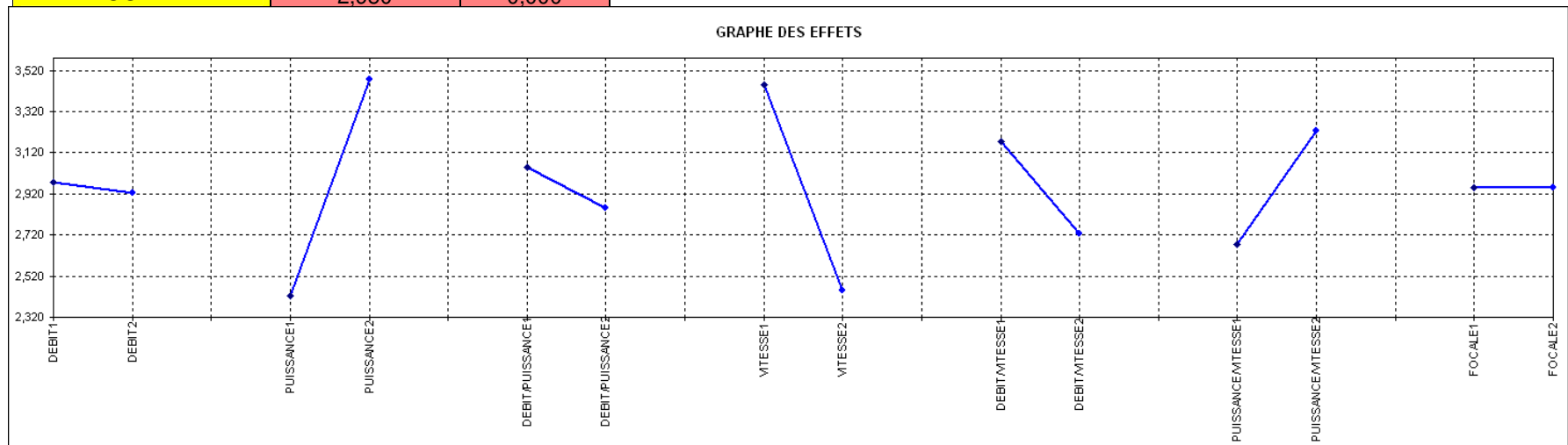
#### **C.1.2 Justification des paramètres de la soudure.**

Les différents paramètres permettent de maîtriser différents aspects du procédé. Le débit de gaz permet la maîtrise de la zone soudée en la préservant de toute oxydation, la puissance permet de contrôler l'énergie transmise aux objets à souder, la vitesse de défilement agit principalement sur le temps de cycle, enfin la distance focale assure la situation du point de fusion par rapport aux pièces à assembler.

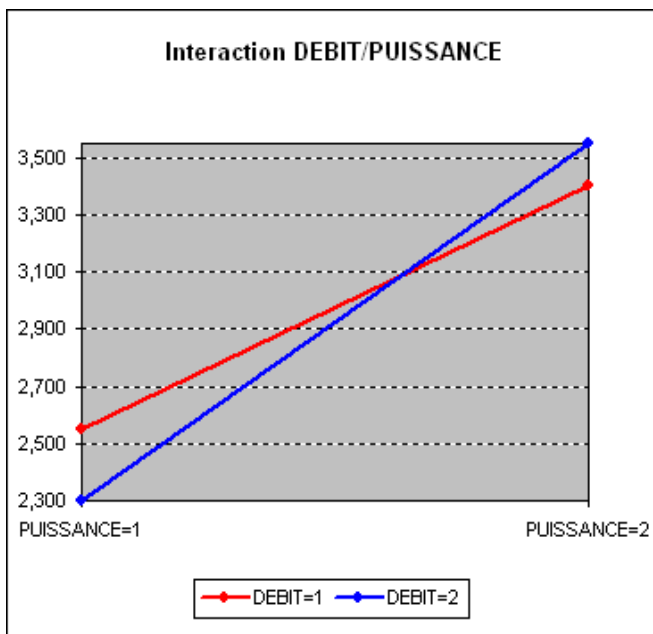
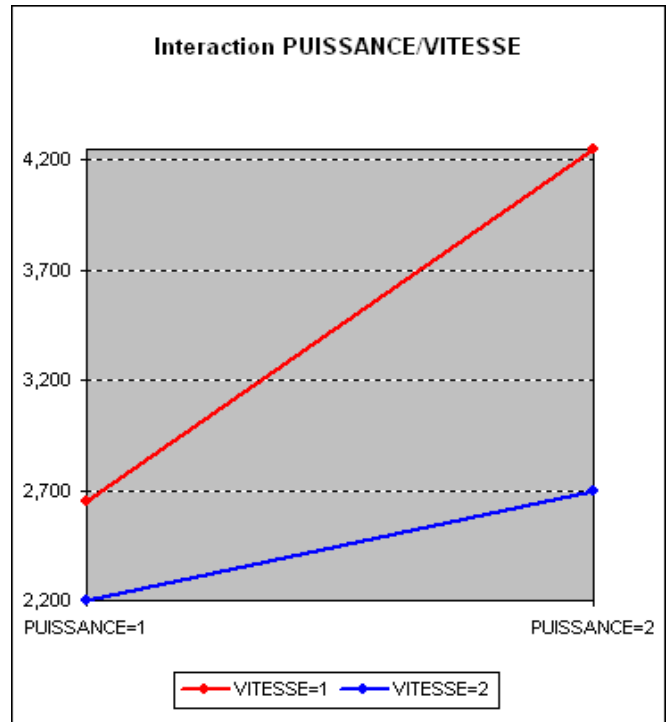
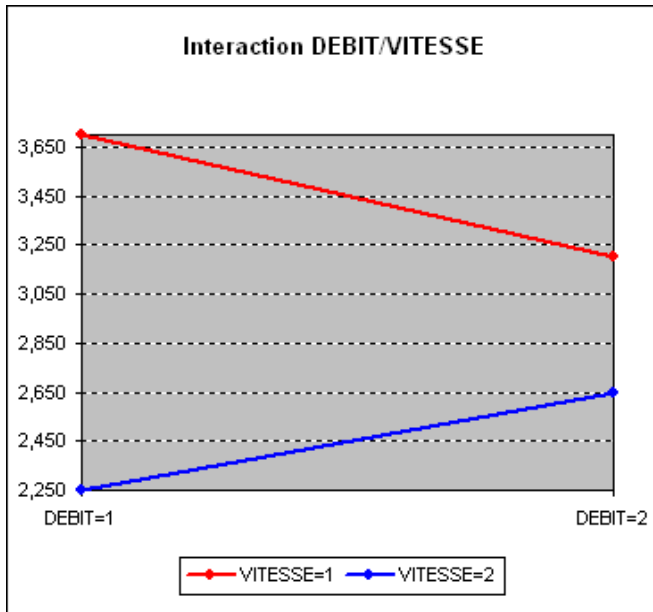
### C.1.3 Calcul des effets simples

Effets	Moyenne	Effet
DEBIT1	2,975	0,025
DEBIT2	2,925	-0,025
PUISSANCE1	2,425	-0,525
PUISSANCE2	3,475	0,525
DEBIT/PUISSANCE1	3,050	0,100
DEBIT/PUISSANCE2	2,850	-0,100
VITESSE1	3,450	0,500
VITESSE2	2,450	-0,500
DEBIT/VITESSE1	3,175	0,225
DEBIT/VITESSE2	2,725	-0,225
PUISSANCE/VITESSE1	2,675	-0,275
PUISSANCE/VITESSE2	3,225	0,275
FOCALE1	2,950	0,000
FOCALE2	2,950	0,000

On observe que certains paramètres agissent de façon nettement plus importante que d'autres. En particulier la puissance du faisceau ainsi que la vitesse de défilement. D'autres comme la focale ou bien le débit n'agissent pas ou peu sur la valeur de la pénétration.



### C.1.4 Etude des interactions.



L'étude des interactions montre qu'il existe une très forte interaction entre le débit de gaz et la puissance, mais on peut également noter que les deux autres interactions sont non négligeables.

### C.1.5 Analyse de la variance.

Les facteurs simples étant à deux niveaux chacun d'eux admet un seul degré de liberté. Le modèle s'écrivant de la façon suivante :

$$Y = m + \text{Débit} + \text{Vitesse} + \text{Puissance} + \text{Débit/Puissance} + \text{Focale} + \text{Vitesse/Puissance} + \text{Vitesse /Débit}, \text{ le degré de liberté du modèle complet est de } 8$$

Cette analyse conduit à un degré de liberté nul pour le résidus ce qui ne permet pas la caractérisation des paramètres du modèle.

### C.1.6 Analyse de la variance avec une seconde série.

Cette fois une deuxième série de données permet l'analyse de la variance.

En effet le modèle s'écrivant de la façon suivante :

$$Y = m + \text{Débit} + \text{Vitesse} + \text{Puissance} + \text{Débit/Puissance} + \text{Focale} + \text{Vitesse/Puissance} + \text{Vitesse /Débit}.$$

Le degré de liberté du modèle est donc de 8. Dans le cas d'une répétition d'expériences (ici le nombre total d'expériences  $N=16$ ) le degré de liberté du résidu existe.

Dans notre cas  $\gamma_r = N - ddl \text{ du modèle complet} = 8$ .

### Analyse de la variance

	S <sup>2</sup>	ddl	V	F calc	Signif
1 DEBIT	0,02	1	0,02	0,04	non
2 PUISSANCE	2,64	1	2,64	6,51	oui
3 DEBIT/PUISSANCE	0,05	1	0,05	0,12	non
4 VITESSE	2,33	1	2,33	5,73	oui
5 DEBIT/VITESSE	0,33	1	0,33	0,82	non
6 PUISSANCE/VITESSE	0,95	1	0,95	2,34	non
7 FOCAL	0,00	1	0,00	0,00	non
Résidus	3,25	8	0,41		
Total	9,56	15	0,637		

### C.1.7 Modèle matriciel.

On ne garde que les termes significatifs. Le modèle théorique devient :

$$Y = m + \text{Puissance}[-0,406 \quad 0,406] + \text{Vitesse}[0,381 \quad -0,381], \text{ avec } m=2,544 \text{ mm}$$

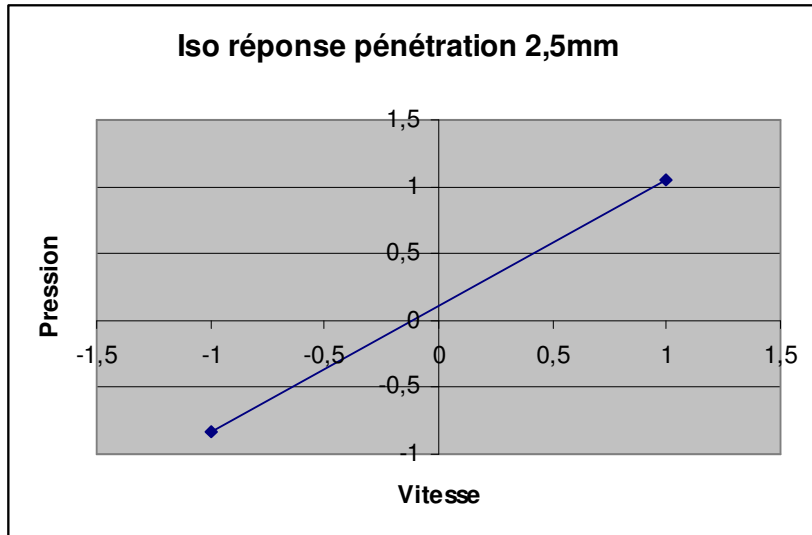
ou bien en adoptant la notation de YATES car tous nos facteurs sont à deux niveaux :

$$Y \sim m - 0,406 P[1 ; -1] + 0,381 V[1 ; -1] \text{ soit } Y \sim 2,544 - 0,406 P[1 ; -1] + 0,381 V[1 ; -1]$$

C.1.8 Courbe d'iso réponse pour une pénétration de 2,5mm.

Dans notre cas une représentation dans un plan  $P=f(V)$  donne évidemment une droite.

$$P = 0,044/0,406 + 0,381/0,406 V = 0,108 + 0.938V$$



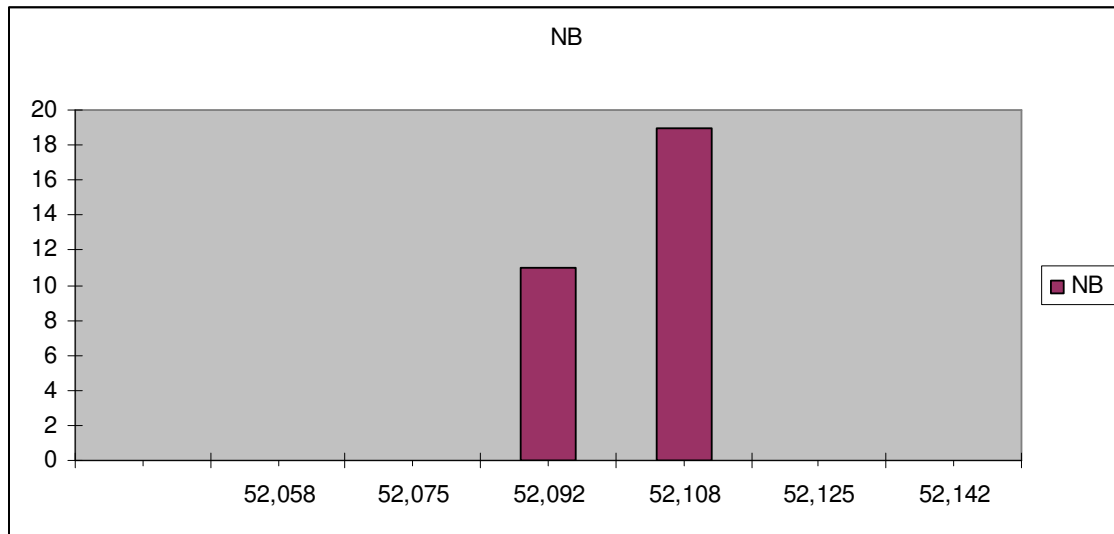
## C.2 Porte pièce de contrôle.

### C.2.1 Test de la distribution

	Pièce 1	Pièce 2	Pièce 3	Pièce 4	Pièce 5	Etendue	Moyenne
Echantillon 1	52,097	52,095	52,094	52,105	52,095	0,0110	52,0972
Echantillon 2	52,114	52,097	52,098	52,096	52,103	0,0180	52,1016
Echantillon 3	52,098	52,099	52,099	52,107	52,109	0,0110	52,1024
Echantillon 4	52,102	52,109	52,112	52,11	52,11	0,0100	52,1086
Echantillon 5	52,108	52,106	52,109	52,105	52,11	0,0050	52,1076
Echantillon 6	52,098	52,105	52,113	52,111	52,114	0,0160	52,1082

Le nombre de classes ( $\sqrt{n}$ ) peut être pris soit égal à 5 ou à 6.

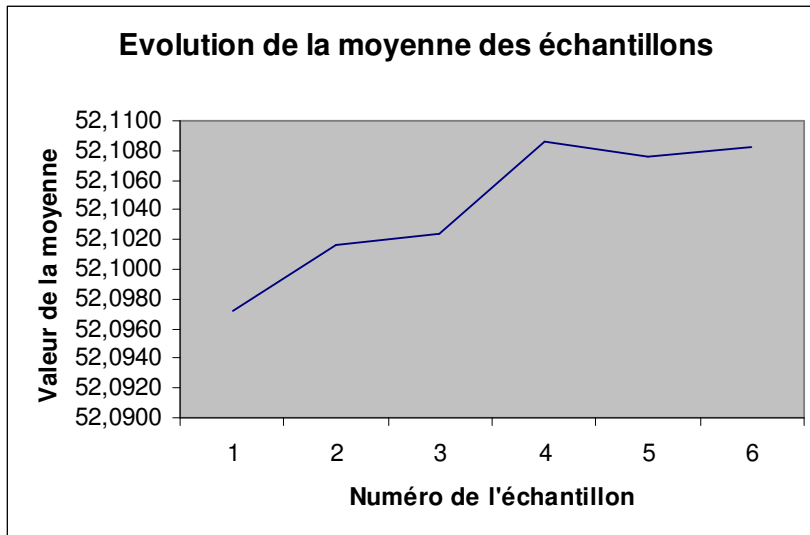
Dans le cas de 6 classes on obtient l'histogramme suivant :



Ce qui manifestement ne correspond pas au graphe d'une loi normale.



Par ailleurs l'évolution de la moyenne admet l'aspect suivant :



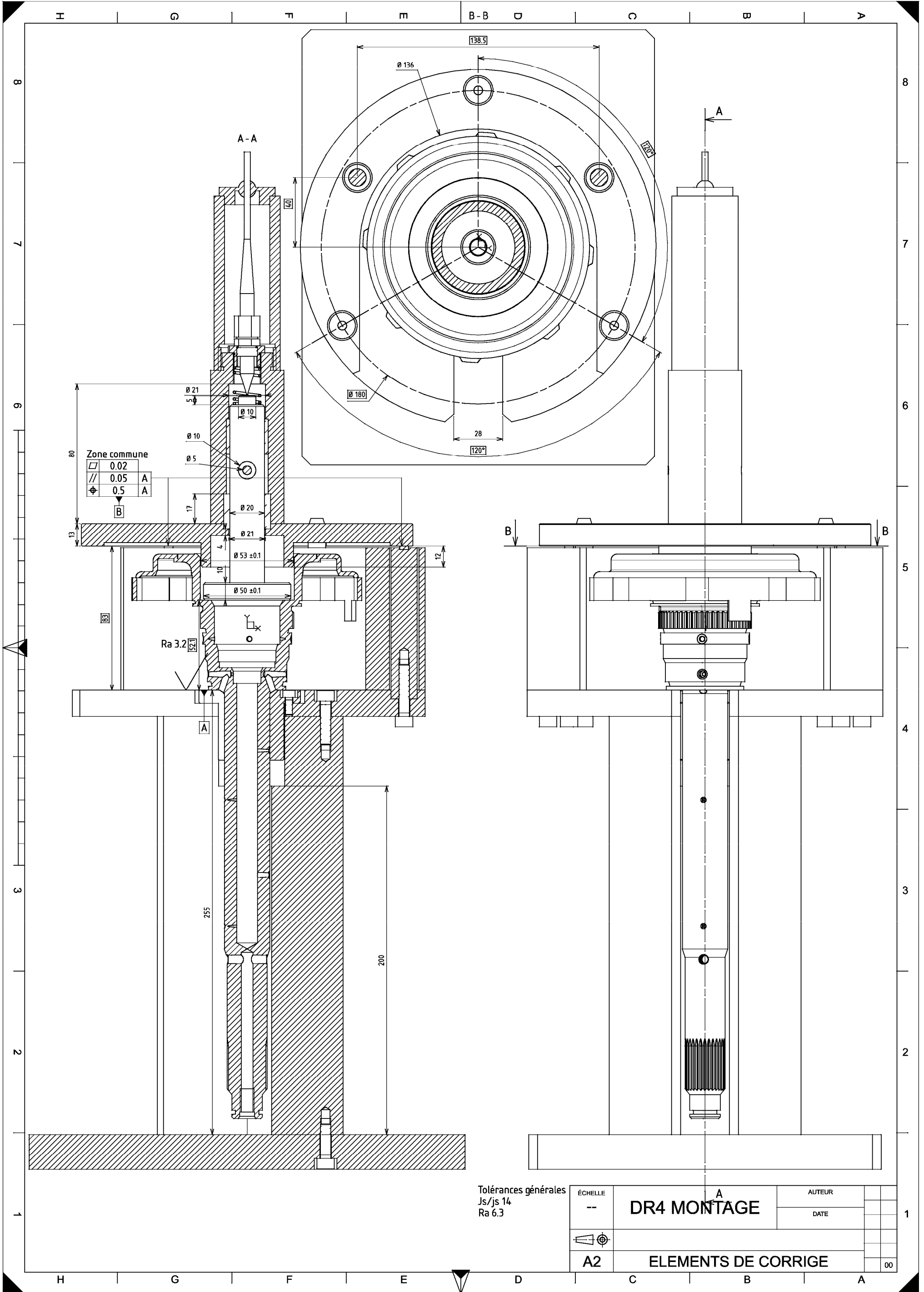
Manifestement la maîtrise de cette spécification n'est pas atteinte.

C.2.2 Croquis à main levée.

Cf. fichier DR4.pdf

C.2.3 Cotation d'aptitude.

Cf. fichier DR4.pdf



Zone commune

	0.02	
	0.05	A
	0.5	A

Tolérances générales  
Js/js 14  
Ra 6.3

ÉCHELLE --	DR4 MONTAGE	AUTEUR	
		DATE	
	A2	ELEMENTS DE CORRIGE	
			00

