

# CORRIGE

## PARTIE A – ÉLABORATION DE LA PIÈCE BRUTE

### A.1 – Opération de refoulement

Indiquer le type de machine permettant de réaliser la phase de refoulement. Sous forme de schémas et/ou de dessins à main levée, définir le principe de l'outillage. Préciser les fonctions assurées par chacune des parties composant cet outillage.

*Cette opération nécessite un outillage inférieur qui s'ouvre (éjection) et se ferme rapidement après introduction du lopin chaud (930°C). L'opération sur presse hydraulique demande approximativement 700 tonnes d'effort.*

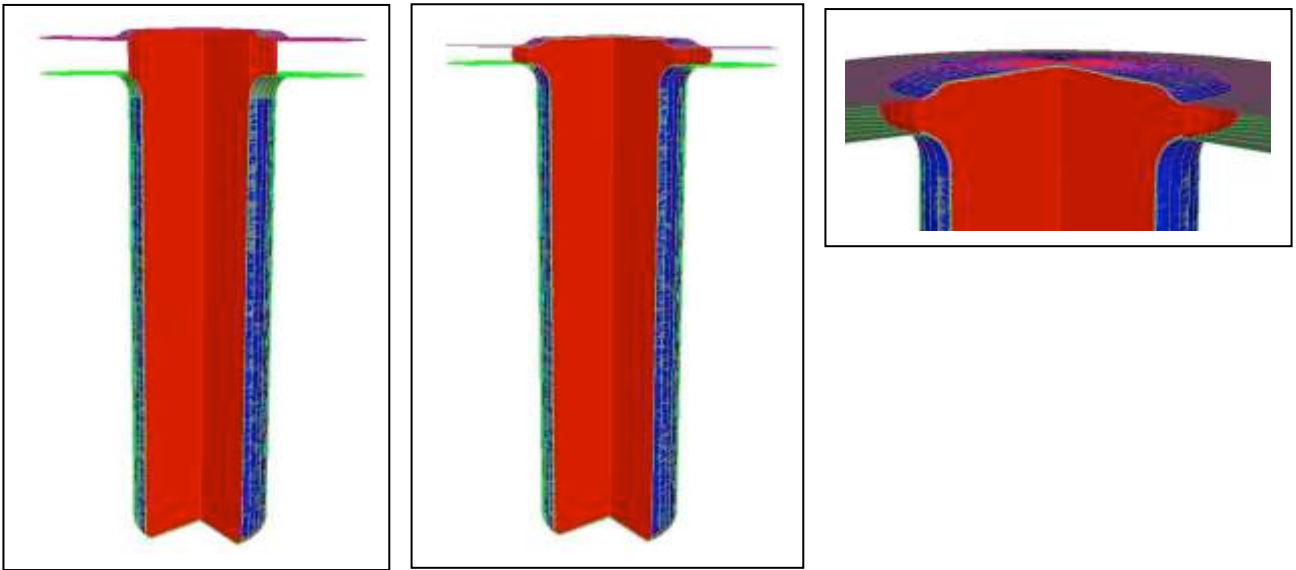
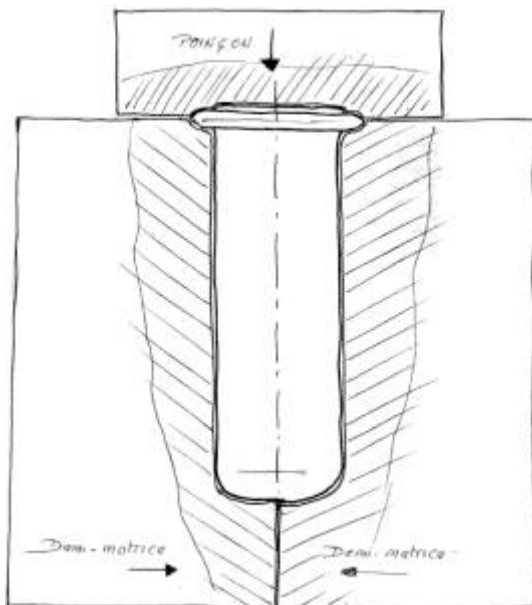


Schéma de principe de l'outillage



*Les deux demi matrices constituent l'outillage inférieur qui doit s'ouvrir et se refermer rapidement.*

*Fonctions assurées par cet outillage inférieur :*

- maintenir et positionner la pièce pendant l'opération de refoulement ;
- obtenir la forme inférieure de la collerette.

*Fonctions assurées par le poinçon :*

- communiquer l'effort de refoulement au lopin ;
- obtenir la forme supérieure de la collerette.

Autre solution : Une autre possibilité est de refouler dans une matrice inférieure monobloc. Il faut alors ajouter une dépouille de 1° et un éjecteur de diamètre égal au diamètre de fond. Cette solution est plus classique, mais elle nécessite davantage de métal et le chauffage de la totalité du lopin de départ.

## A.2 – Opération de matriçage

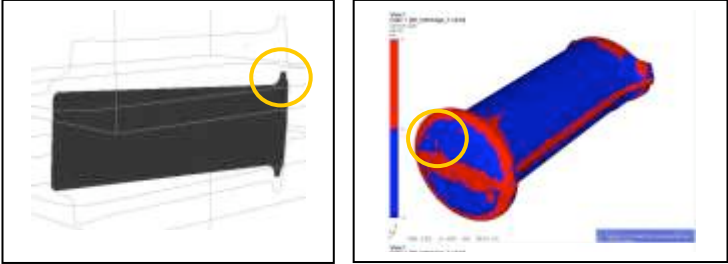
Le Document Technique **DT-6** fournit des images extraites d'une simulation numérique de la phase de matriçage en partant de conditions de travail, non encore optimisées, du processus prévisionnel d'élaboration de la pièce brute :

- les figures 1 et 2 donnent la position de la pièce au sein de l'outillage au démarrage de l'opération de matriçage (ouverture de l'outillage = 110 mm) ;
- les figures 3, 4 et 5 montrent les zones de contact outillage-pièce au cours du formage (ouverture de l'outillage = 4 mm) ;
- à l'instant qui correspond à la fin de la fermeture de l'outillage (matrices en contact), la figure 6 indique l'état de contact matière-outillage, la figure 7 fournit une cartographie des températures au sein du matériau et la figure 8 donne une image de l'état de déformation du matériau ( $\text{Log } \epsilon = \text{Log } (L / L_0)$ ) cumulé (refoulement + matriçage).

S'agissant d'une simulation numérique, tous les renseignements apportés par ces figures sont prévisionnels.

À l'aide du tableau ci-dessous, à reproduire sur feuille de copie, préciser l'exploitation qui peut être faite des informations apportées par chacune des figures et les conséquences prévisibles quant à la qualité de la pièce brute obtenue et quant au déroulement du processus d'élaboration :

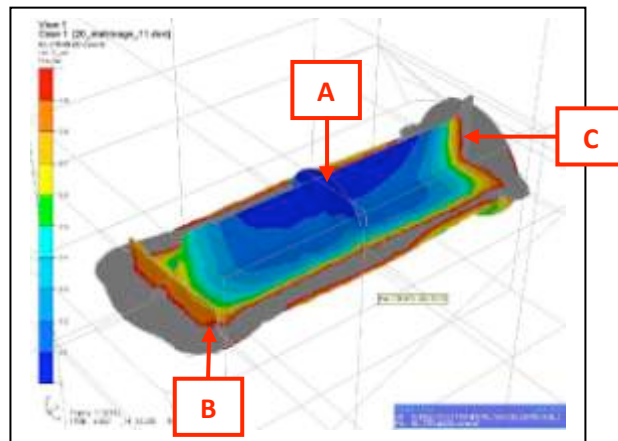
- de manière générale,
- dans le cadre du matriçage de la trompette de liaison.

Figures	Qualité de la pièce obtenue	Déroulement du processus
<p><b>Fig. 1, 2 et 5</b></p>	 <p>La position de l'ébauche au démarrage du matriçage est inclinée par rapport au plan de fermeture des matrices. Cette forme d'ébauche et cette position inclinée conduisent à créer un défaut de type « recoupe » qui apparaît sur la figure 5. La matrice supérieure « racle » ou recoupe l'ébauche en créant un bourrelet ou un repli.</p>	<p>L'usinage ultérieur de la collerette devra supprimer ce défaut (disparition lors de l'opération de carottage).</p>
<p><b>Fig. 3 et 4</b></p>	<p>Ces 2 figures, qui correspondent au même stade de la simulation du matriçage que la figure 5, indiquent les premières zones formées par l'outillage et, notamment le début d'écoulement de la bavure. C'est entre les deux branches de la chape (bout opposé à la collerette) que débute le formage de la bavure. Celle-ci se révèle légèrement excédentaire (constat confirmé sur la figure 6). Dans le cas d'une section d'ébauche trop forte, l'excédent de matière doit s'écouler complètement vers le cordon de bavure. Dans les zones où l'empreinte est remplie avant la fin du formage, le glissement de cet excédent de matière perturbe le fibrage du matériau. Le taux d'écrouissage y est important. Le « délaminage des fibres au plan de joint », expression utilisée par les forgerons pour désigner cette perturbation, peut provoquer des fissures à l'ébavurage et aux traitements thermiques.</p>	<p>Pas de modification de forme de l'ébauche au voisinage de la chape :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la matière située entre les deux branches de la chape sera enlevée lors de l'opération de carottage (le « délaminage des fibres au plan de joint » dans cette zone sera donc sans conséquences) ;</li> </ul>

	<p>Le forçage de l'écoulement de l'excédent de matière vers la bavure est consommateur d'énergie, il conduit, d'autre part, à une usure prématurée des outillages (érosion de la gravure de chacune des deux matrices).</p>	<p>- le gain économique d'une réduction d'énergie et d'une réduction de l'usure des outillages n'est avéré face au coût d'une modification de l'ébauche au voisinage de la chape.</p>
<b>Fig. 6</b>	<p>Le remplissage montre un manque léger de bavure autour de la collerette. L'épaisseur de la collerette réalisée lors de l'ébauche est insuffisante.</p>	<p><u>Opération de débit des lopins</u> : augmenter la longueur du lopin.</p> <p><u>Opération de refoulement</u> : augmenter l'épaisseur de la collerette et réduire la longueur du cylindre de <math>\varnothing 132</math></p>
<b>Fig. 7</b>	<p>La cartographie des températures fait apparaître une différence de <math>180^{\circ}\text{C}</math> au sein du matériau : <math>910^{\circ}\text{C}</math> au cœur de la pièce ; <math>730^{\circ}\text{C}</math> en périphérie de collerette et en périphérie de matière entre oreilles. Cette grande variation de température est due aux temps d'attente à la sortie du four et à la vitesse de forgeage.</p> <p>Le choix de la température de forgeage est dicté par des considérations métallurgiques, il en résulte une incidence sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>l'homogénéité de la structure</u> obtenue au sein du matériau (lors du matriçage, changement d'état de l'alliage non simultané en tous points de la pièce) – ici, la température ne dépasse pas <math>980^{\circ}\text{C}</math>, il n'y a donc pas de passage en phase <math>\beta</math> – l'histoire thermomécanique de chaque zone de la pièce (température, déformation) influencera la recristallisation et donc la taille de grain finale ;</li> <li>- <u>l'effort de forgeage</u>, compte tenu de la relation liant la contrainte d'écoulement du matériau à la température / l'effet de la température sur la contrainte d'écoulement est nettement plus important sur le titane que sur l'acier (lorsque leur température se rapproche de la température ambiante, les alliages de titane se caractérisent par une forte augmentation de leur résistance à la déformation - en conséquence, dès que la température décroît, le titane a une forte tendance au <u>criquage</u>).</li> </ul>	<p>Réduire les temps d'attente en sortie de four.</p> <p>Optimiser la vitesse de forgeage.</p>

**Fig. 8**

État de la déformation cumulée (refoulement + matriçage)



En zone A, parties supérieure et inférieure du cylindre de  $\varnothing 132$  ( $L/L_0 = 1$  donc  $\varepsilon = 0$ ), il n'y a pas (ou peu) de déformation de la matière. C'est une zone dite « Zone morte ».

En zone B, cordon de bavure, et zone C, formage du  $\varnothing$  extérieur de la collerette, la déformation est maximale. La collerette a subi une déformation importante au cours de la première opération : le refoulement.

Entre ces deux extrêmes, la pièce obtenue présente une hétérogénéité de déformation inévitable.

Cette hétérogénéité aura une influence sur la structure du matériau obtenue. Pour une bonne résistance à la fatigue de cette pièce de sécurité, il convient de viser l'obtention d'une microstructure de type équiaxe.

En revanche, la taille de grain ( $G$  ou  $d$ ) est variable suivant les zones de la pièce. On recherche un grain fin.

L'obtention d'une microstructure équiaxe résulte :

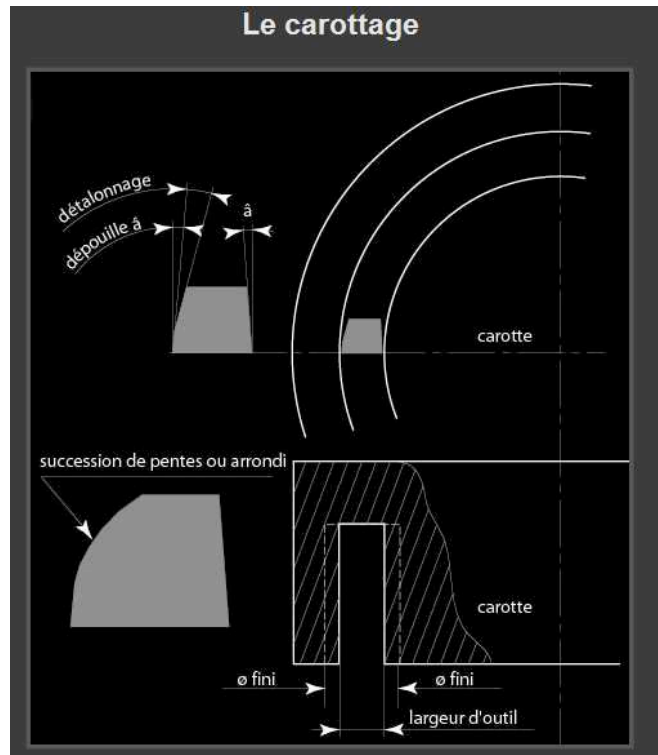
- du traitement thermomécanique du lopin de départ (forgeage ou laminage et traitement thermique de recristallisation) pour obtenir une macrostructure fine et régulière ;
- du taux de corroyage obtenu suite au refoulement et au matriçage et au traitement thermique associé en fin de matriçage (ici recuit).

### A.3 – Opération de carottage

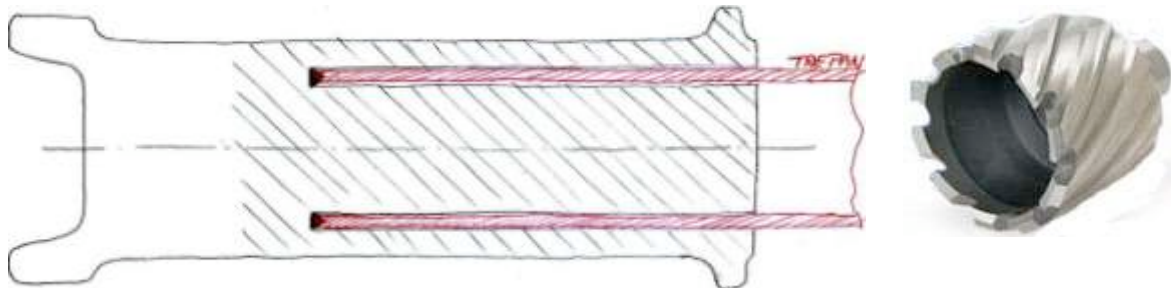
Le Document Technique **DT-4** présente l'ébauche matriçée et définit le cylindre de matière, appelé carotte, issu de l'opération de carottage. Indiquer en quoi consiste cette opération de carottage et préciser les intérêts d'une telle opération. Sous forme de schémas et/ou de dessins à main levée, définir le principe de l'outillage nécessaire.

*Il s'agit de réaliser un alésage de grande dimension (ici  $\varnothing 100$  mm) sur des profondeurs courtes ou longues à l'aide d'un outil appelé outil à carotter ou bien trépan (opération de trépanage). Cette opération permet d'enlever un grand volume cylindrique de matière sans avoir à le transformer tout en copeaux.*

**Réalisation d'une « carotte » à l'aide d'un outil de type « Trépan » ou encore « scie cloche »**



**Application au carottage de la trompette de liaison**



**Intérêts du carottage (ou trépanage) :**

- faible volume de copeaux générés pour réaliser l'alésage par rapport à une opération de perçage ou de fraisage (si il n'y avait pas d'opération de carottage, il y aurait  $3242 \text{ cm}^3$  de matière à évacuer qui, transformée en copeaux fragmentés "espérons-le", peuvent représenter avec un taux de foisonnement de l'ordre de 1200 %,  $38\,904 \text{ cm}^3$  de copeaux) ;
- maîtrise de la vitesse de coupe (usinage à  $\emptyset$  constant) ;
- facilité de recyclage ou de réutilisation de la carotte : solution simple, pour ce type de pièces, d'application des procédures aéronautiques attachées aux pièces de haute sécurité (conserver une partie de pièce « témoin » et permettre la confection d'éprouvettes pour contrôle systématique des caractéristiques du matériau de chaque pièce)
- une attention particulière doit être portée à l'évacuation des copeaux : risques de « bourrage » entre l'outil et la carotte ou/et la pièce.

## PARTIE B - ÉTUDE PARTIELLE DE LA GAMME OPÉRATOIRE

La nomenclature des phases d'obtention du produit fini est précisée sur le Document Technique **DT-7**. Ce produit fini correspond à la trompette de liaison usinée et équipée de deux bagues de réparation définies sur le Document Technique **DT-8**. Les phases figurant en gras feront l'objet d'une étude détaillée.

### **B.1 Etude de la phase 20 : Essais mécaniques pour contrôle réception matière**

**B1.1** Indiquer le rôle de cette phase 20 dans le processus opératoire de la fabrication de la trompette.

*Vérification de l'adéquation des caractéristiques mécaniques avec le cahier des charges suite au procédé de matriçage et au recuit de relaxation. Il s'agit d'un contrôle à 100%.*

*Il s'agit d'une pièce vitale (de sécurité), qui ne doit présenter en conséquence aucuns défauts de santé matière. Il est donc important de vérifier toutes ces caractéristiques mécaniques avant de débiter l'usinage qui apportera une très forte valeur ajoutée. De plus, les résultats des essais permettront aussi d'apporter une traçabilité des pièces au cours de leur utilisation.*

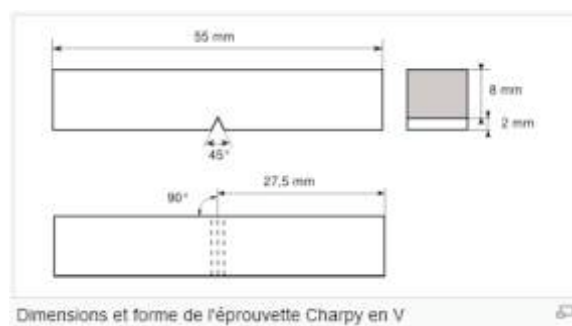
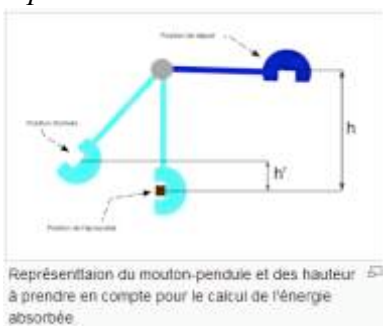
**B.1.2** Détailler les contrôles qui seront effectués, ainsi que les plages de valeur d'acceptation.

*Sur le dessin de définition de la trompette à l'état brut (**DT-4**) se trouvaient les caractéristiques mécaniques à contrôler.*

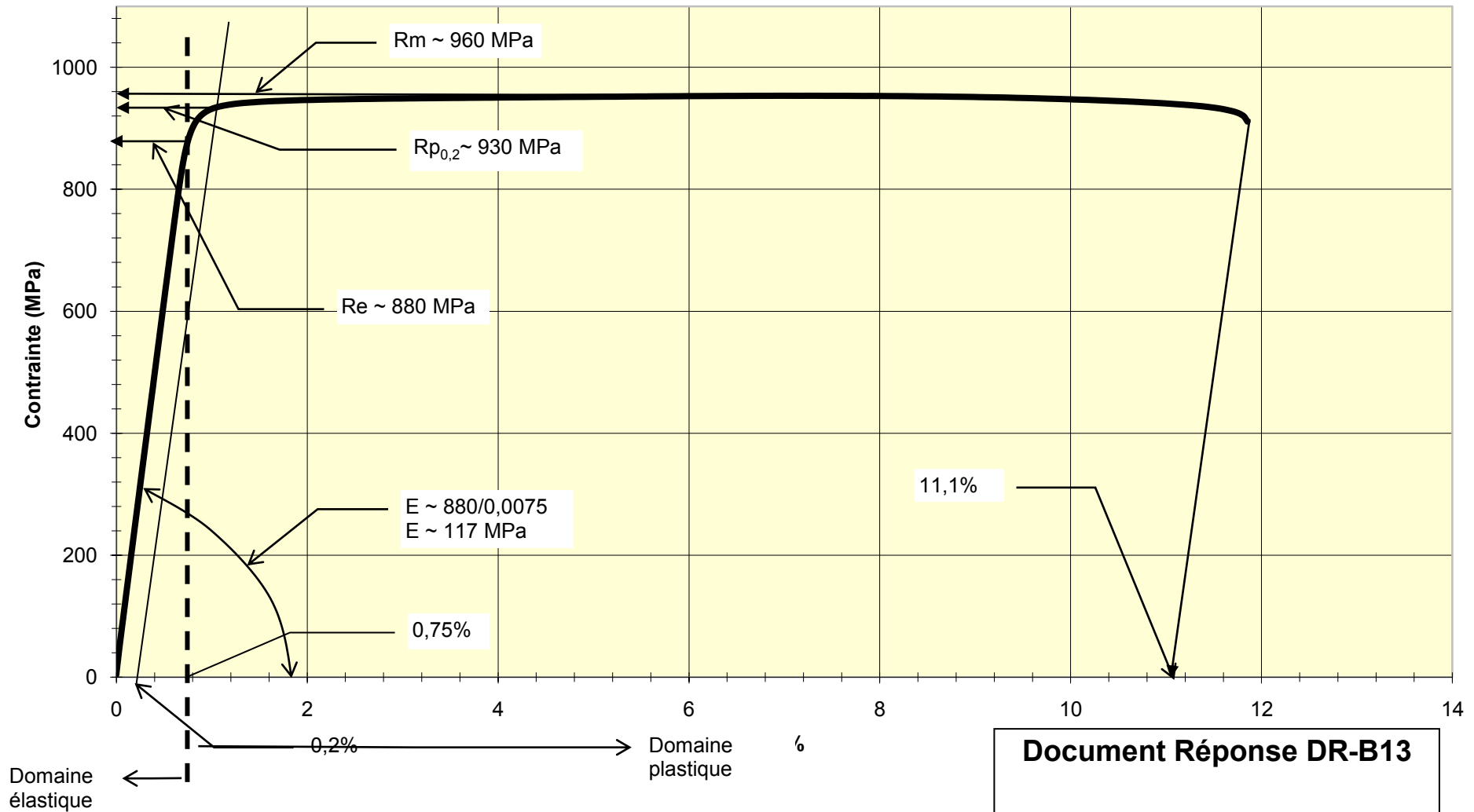
*Ces essais mécaniques standards permettront d'établir un certificat de conformité matière.*

- *Essais de traction sur éprouvettes extraites dans le sens long et travers (suivant les indications issues de **DT-4**). Résistance mécanique à la rupture  $R_m$  comprise entre 900 et 1160 MPa, Résistance élastique pour un allongement de 0,2% ;  $R_{p0.2} > 830$  MPa, Allongement à la rupture  $A\% > 10\%$  (sens long) et  $> 8\%$  (sens travers).*
- *Essais de dureté Brinell HB compris entre 260 et 360 HB. Mesure de l'empreinte d'une bille (diamètre ou profondeur) sous une charge connue.*
- *$E = \sigma / \varepsilon$ ; module de Young ou d'élasticité longitudinal, représenté graphiquement par la pente de la droite dans le domaine élastique (voir **DR-B13**).*
- *Essais de résilience  $KCU > 25$  (sens long) et 20 (sens travers). Cet essai caractérise la ténacité d'un matériau (résistance au choc) et s'effectue au mouton de Charpy qui permet de mesurer l'énergie nécessaire pour rompre une éprouvette munie d'une amorce de rupture en forme de U dans notre cas. L'éprouvette peut présenter aussi une entaille en forme de V ( $KCV$ ).*

*Il est à noter que certains essais sont faits dans les sens long et travers pour vérifier l'anisotropie du matériau.*



**Courbe de traction de l'alliage de titane Ti6Al4V phase  $\beta$**



**B.1.3** À partir de la courbe du Document Réponse **DR-B13** issue d'un essai de traction d'une éprouvette extraite dans le sens long de la carotte, vérifier si les caractéristiques mécaniques concernées du cahier des charges sont bien respectées.

Mettre en place les domaines élastique et plastique, ainsi que le module de Young  $E$ .

Voir Document **DR-B13** joint.

## **B.2 – Etude de la phase 30 : Tournage de deux portées de lunette ( $\Phi 166$ et $\Phi 132,5$ )**

La phase 30, détaillée sur le Document Technique **DT-9**, correspond principalement à la préparation en tournage CN de deux portées de lunette de  $\Phi 166$  et  $\Phi 132,5$ .

**B.2.1** Détailler technologiquement ce qu'est une lunette et indiquer son rôle dans la suite de la gamme opératoire.



*Il s'agit d'un dispositif utilisé dans le cas de l'usinage de pièces longues afin de compenser les défauts liés à la flexion ou au porte à faux de la pièce. Les lunettes peuvent être fixes (notre cas) ou à suivre (cas de pièces très longues et sans variation de diamètre). Cet accessoire est fixé sur le bâti ou le chariot du tour respectivement fixe ou à suivre. La mise en position correspond à une liaison linéaire annulaire (centrage court). Elle est utilisée en phase 40 et est visible sur le Document **DRS-B6**<sub>1,2</sub>.*

**B.2.2** Indiquer les degrés de liberté éliminés par chacun des éléments technologiques représentant la mise en position de la pièce. Prendre en considération la base orthonormée affichée.

<i>Élément technologique</i>	<i>Degrés de liberté éliminés</i>	
<i>Mandrin 3 mors de forme</i>	<i>Linéaire annulaire sur diamètre de carottage de 100 mm : <math>T_X</math> et <math>T_Y</math></i>	<i>Liaison rotule à doigt</i>
	<i>Butée <math>T_Z</math> sur <math>B_1</math></i>	
	<i>Entraînement par adhérence <math>R_Z</math></i>	
<i>Contre pointe tournante sur cimblot</i>	<i><math>R_X</math> et <math>R_Y</math></i>	<i>Liaison annulaire</i>

## **B.3 – Etude de la phase 40 : Tournage ébauche du profil 2**

L'objet de la question concerne l'optimisation de cette opération d'ébauche (détaillée sur le Document Technique **DT-10**) qui correspond, pour le processus, à celle présentant le plus fort taux d'enlèvement de matière.

**B.3.1** Indiquer les degrés de liberté éliminés par chacun des éléments technologiques représentant la mise en position de la pièce. Prendre en considération la base orthonormée affichée.

<i>Élément technologique</i>	<i>Degrés de liberté éliminés</i>	
<i>Mandrin 3 mors doux</i>	<i>Linéaire annulaire sur diamètre extérieur 166 mm : <math>T_X</math> et <math>T_Y</math></i>	<i>Liaison rotule à doigt</i>
	<i>Butée <math>T_Z</math></i>	



	<i>Entraînement par adhérence <math>R_z</math></i>	
<i>Lunette fixe</i>	$R_x$ et $R_y$	<i>Liaison annulaire</i>

**B.3.2** Indiquer pour quelles raisons, toutes les phases du processus d'usinage de la trompette de liaison sont toujours réalisées avec des conditions de lubrification intense à l'huile soluble.

*Un des rôles de la lubrification est d'évacuer les copeaux et de nettoyer la zone de travail.*

*Pour information, dans notre cas la pièce forgée pèse 27,2 kg, après carottage 12,6 kg et en fin d'usinage 1,8 kg. Ce qui représente environ 5640 cm<sup>3</sup> de matière. Dans le secteur aéronautique, nous parlons du ratio "By to fly", c'est-à-dire la masse de matière en vol par rapport à celle au départ de la fabrication. Pour notre étude de cas, ce ratio vaut : 1,8/27,2 soit 6,6 %.*

*La lubrification a aussi pour rôle d'évacuer les calories et en conséquence améliorer la durée de vie des outils de coupe et éviter d'affecter thermiquement l'intégrité de la surface de la pièce. N'oublions pas que cet alliage de titane est réfractaire et est caractérisé parmi les familles de matériaux à usinabilité difficile.*

*Enfin et c'est la raison principale, les copeaux de titane sont inflammables et par sécurité, il est obligatoire de lubrifier pour ne pas prendre le risque d'un incendie de la machine-outil.*

**B.3.3** A partir des données indiquées sur le Document Technique **DT-10**, qui correspondent aux données actuelles de l'entreprise de sous-traitance, calculer le temps d'usinage de la phase 40.

*Le temps d'usinage pouvait être vu comme le temps de coupe (copeau) ou le temps de cycle. En fonction des hypothèses des candidats, les deux solutions ont été retenues.*

*Ici, la correction mentionnera uniquement le temps de coupe. Pour le temps de cycle, il est nécessaire d'inclure les temps d'entrée et de sortie matière, ainsi que les temps de retour rapide à vide. Les temps d'accélération et de décélération sont aussi à prendre en compte. Cependant, aucune information ne le permettait ici.*

*La solution la plus simple consistait à évaluer le volume de copeau à enlever et ensuite calculer le débit matière en fonction des données indiquées sur le Document Technique **DT-10**.*

*Solution 1 :*

$$\text{Volume matière à enlever } V = \frac{\pi}{4} [(11,4^2 - 10^2) \times 38 + (11,9^2 - 10^2) \times 8,4] = 1168 \text{ cm}^3$$

*Les 84 mm venant de la longueur totale de la pièce soit 464 mm (**DT-4**) – 380 mm (**DT-10**).*

*Le débit copeau  $Q$  vaut :  $V_c \times f \times a_p$  soit numériquement  $40 \times 0,3 \times 2,5 = 30 \text{ cm}^3 / \text{min}$*

*D'où le temps de coupe pur qui vaut :  $V/Q = 38,9 \text{ min}$*

*Solution 2 :*

*Le calcul du temps se fait passe par passe.*

*Le calcul de  $N$  se fait sur le diamètre usiné.*

<i>Longueur <math>L</math></i>	<i>Diamètre usiné</i>	<i><math>V_f</math> (mm/min)</i>	<i><math>N</math> (tr/min)</i>	<i><math>T=L/V_f</math> (min)</i>
<i>464</i>	<i>105</i>	<i>36,3</i>	<i>121</i>	<i>12,78</i>

464	110	34,5	115	13,44
464	115	33	110	14
464-380 = 84	119	32	107	2,62
<b>Temps total</b>				<b>42,84 min</b>

*En faisant le calcul de N sur le diamètre moyen, le temps total vaudrait 41,7 min.  
Un temps approximatif de 40 minutes à 10% près était considéré comme bon.*

**B.3.4** Suite à une augmentation de charge, le sous-traitant décide d'améliorer sa technologie d'usinage. Il fait appel à un laboratoire d'essais qui lui propose de changer de matériau usinant en passant d'une plaquette carbure à une plaquette diamant monocristallin (MCD).

Les résultats des expérimentations menées en laboratoire sont détaillés sur les Documents Ressources **DRS-B34**<sub>1, 2, 3</sub>.

D'après vous, le passage à l'outil diamant serait-il plus productif que l'outil carbure ? Commenter votre réponse.

*Trois Documents Ressources **DRS-B34**<sub>1,2,3</sub> étaient fournis, correspondant chacun à l'évolution de l'effort spécifique de coupe en fonction des paramètres opératoires.*

*Deux solutions ont été retenues :*

*Solution 1 :*

*L'objectif de l'ébauche étant le débit maximal, nous considérerons tous les paramètres à leur maximum. C'est-à-dire que sur les courbes nous relevons :*

- $V_c \text{ max} = 275 \text{ m/min}$
- $f \text{ max} = 0,3 \text{ mm/tr}$
- $a_p \text{ max} = 0,5 \text{ mm}$

*Soit un débit copeau Q qui vaut numériquement  $275 \times 0,3 \times 0,5 = 41,25 \text{ cm}^3 / \text{min}$*

*D'où un temps de coupe de 28,3 min, représentant un gain de 10,58 min. Dans ce cas l'usinage à l'outil diamant se révélera plus productif.*

*Solution 2 :*

*Cela consistait à choisir sur les courbes, les valeurs des paramètres opératoires qui minimisaient l'effort spécifique de coupe, soient :*

- $V_c \text{ max} = 200 \text{ m/min}$
- $f \text{ max} = 0,3 \text{ mm/tr}$
- $a_p \text{ max} = 0,3 \text{ mm}$

*Soit un débit copeau Q qui vaut numériquement  $200 \times 0,3 \times 0,3 = 18 \text{ cm}^3 / \text{min}$*

*D'où un temps de coupe de 64,88 min, représentant une perte de 26 min. Dans ce cas l'usinage à l'outil diamant n'est plus productif.*

*Le choix de la solution 1 ou 2 par rapport à l'outil carbure ne pourra se faire que par une optimisation plus précise qui dépendra du coût d'une arête de coupe, de la durée de vie de l'arête et du coût horaire d'usinage.*

*Cependant au regard du Document Ressources **DRS-B45**, nous pourrions présager que l'effet de la vitesse de coupe n'est pas le paramètre le plus pénalisant pour la durée de vie, ce qui en conséquence mettrait en avant la solution 1.*

*A ce stade, sans une étude d'optimisation plus poussée nous ne pouvons pas dire quelle serait la solution la plus économique.*

## B.4 – Etude de la phase 140 : Tournage ½ finition et finition du profil 1 en tirant et en poussant

**B.4.1** A partir des indications du Document Technique **DT-11**, expliquer pourquoi une des opérations s'effectue-t-elle toujours à l'outil carbure ?

*Sur le Document Technique **DT-11**, la plaquette carbure est utilisée pour la première opération qui s'intéresse au contournage finition extérieur des deux oreilles. La coupe est à ce moment là, discontinue et il est donc préférable d'utiliser une matière de plaquette résiliente pour mieux résister aux chocs. C'est le cas du carbure par rapport au diamant qui est très fragile. D'autre part la vitesse de coupe étant plus importante lors de l'utilisation d'un outil diamant, le risque de générer des vibrations sera plus grand lors de l'usinage de cette partie de pièce.*

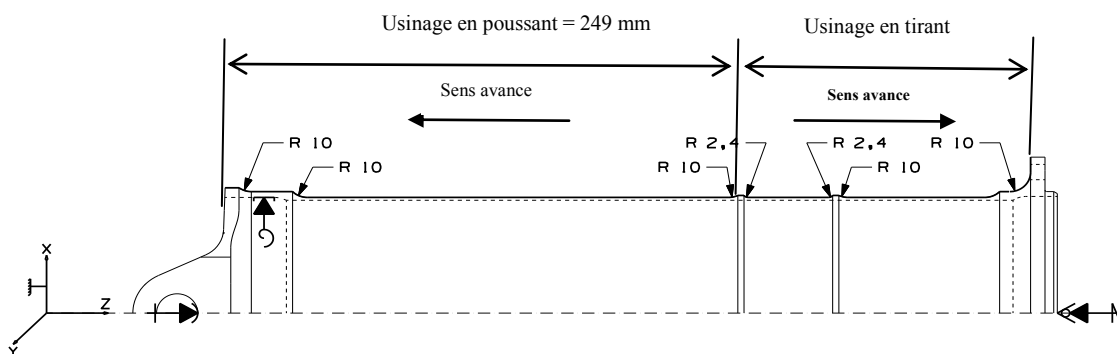
**B.4.2** Expliquer ce que signifie "en tirant et en poussant". A l'aide du Document Ressources **DRS-B42**, faire le choix du (des) porte-plaquettes dans le cas des opérations de ½ finition et de finition à l'outil diamant.

L'usinage en poussant : mouvement d'avance en direction des mors ( $\vec{V}_f \cdot \vec{Z} < 0$ )

L'usinage en tirant : mouvement d'avance en direction de la contre pointe ( $\vec{V}_f \cdot \vec{Z} > 0$ )

Choisir un porte-plaquette à gauche pour l'usinage en poussant et à droite pour l'usinage en tirant.

Choisir le  $\chi_r$  le plus proche de  $90^\circ$  pour limiter les efforts radiaux car la pièce est déformable. Faire attention au  $\chi'_r$  pour la descente afin d'éviter le risque de talonnage au niveau de R10. L'angle limite de talonnage dans le pire des cas est de  $46,36^\circ$ . En conclusion il faut choisir une plaquette montée sur un porte-plaquette qui nous donne un angle  $\chi'_r$  supérieur à cette valeur. Seulement des plaquettes de type V conviennent.



Choix outil :

Le rayon de 2,4 mm impose un rayon de plaquette inférieur. Les plaquettes diamant VCMW 16 04 04 choisies en phase 140 ont un rayon de plaquette de 0,4 mm et un angle de pointe de  $35^\circ$ . Pas de problème.

La remontée de la face à droite impose un angle de direction d'arête  $\chi_r$  supérieur à  $90^\circ$ .

En poussant, 3 porte-outils sont possibles : SVVBN, SVJBL, SVHBL

En tirant, 2 porte-outils sont possibles : SVJBR, SVHBR

En conclusion, notre choix se portera plutôt sur le SVJBR et SBJBL, car le  $\chi_r$  est le plus proche de  $90^\circ$ .

**B.4.3** A l'aide du Document Ressources **DRS-B42** et dans un but de rationalisation des outils de coupe, indiquer s'il est possible d'effectuer l'ensemble des opérations en poussant. Argumenter votre réponse.

*Notre choix se porte sur une plaquette de profilage ronde dont le rayon de pointe doit être inférieur à 2.4 mm (plaquette de profilage N151.2-400-40 F-P) qui sera montée sur un porte-outil de type SRDCN. Celle-ci est aussi beaucoup plus robuste qu'une plaquette type V et en conséquence la partie usinage au choc pourrait être aussi envisagée. Attention ce type de plaquette entraîne des efforts radiaux plus importants. La faisabilité par rapport à l'épaisseur de 1.5 mm doit être vérifiée.*

**B.4.4** Lors de cette phase d'usinage, la pièce arrive à son épaisseur finale, soit 1,5 mm sur la longueur du fût.

Indiquer les problèmes engendrés par l'usinage d'une telle pièce et les conditions à imposer pour les minimiser.

D'une manière littérale, expliquer la démarche pour calculer le couple transmissible par le mandrin expansible.

*Un mandrin expansible enveloppant est utilisé afin de minimiser la triangulation de la pièce liée au contact des mors sur une paroi sensible à la déformation. En conséquence l'effort de serrage devra être contrôlé pour ne pas déformer la pièce, impliquant un calcul de la pression maximale à ne pas dépasser et autant que possible constante sur toute la périphérie du mandrin. Ce calcul peut s'effectuer en vérifiant que la contrainte de Von Mises ne soit pas dépassée. Aussi, il faudra tenir compte de l'effort centrifuge appliqué sur les mors (serrage dynamique) qui participera à serrer d'avantage la pièce (donc la déformer davantage) lors de sa rotation à moins que le mandrin ne soit compensé en force centrifuge.*

*L'entraînement est réalisé par un locating placé dans l'alésage recevant les bagues de réparation. Ce locating permet d'assurer un couple transmissible qui doit être supérieur au couple à la coupe. Il faudra donc vérifier que la pression maximale de contact entre le locating et l'alésage reste inférieure à la pression de matage pour ne pas endommager la surface qui devra recevoir la bague par frettage.*

*Le couple dû à la coupe peut être évalué à l'aide de la courbe expérimentale du Document Ressource **DRS-B34**.*

*C'est en 1/2 finition que le couple sera le plus important soit  $C_c = K_c \cdot a_p \cdot f \cdot R_u$*

*Avec  $R_u$ , rayon usiné maxi = 82 mm en haut de la face et  $K_c = 1430 \cdot f^{-0,23}$*

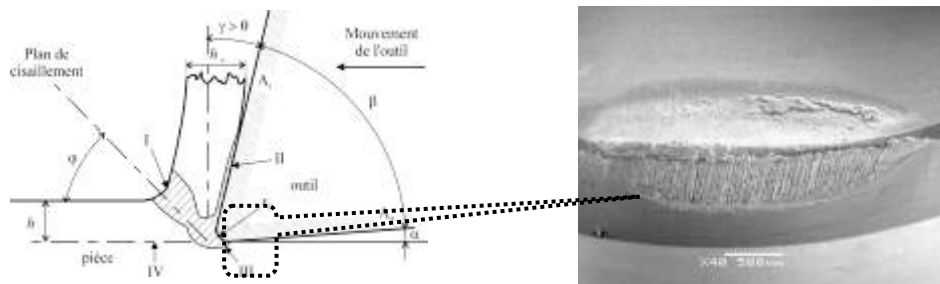
*L'estimation du couple de coupe maximal vaut  $C_c = 1430 \cdot (0,25)^{1-0,23} \cdot 0,5 \cdot 82 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ Nm}$ .*

*Afin de minimiser la déformation radiale et du fait que la pièce ne soit maintenue que sur ses extrémités, une forme de tonneau peut apparaître. La minimisation se fera comme il a été vu par le choix d'un angle de direction d'arête le plus proche de 90° et la réduction des sections coupées.*

**B.4.5** Deux essais d'usure ont été réalisés : un premier essai dans les mêmes conditions que l'opération de 1/2 finition ; un second avec les conditions de finition (Document Ressources **DRS-B45**).

Expliquer par un schéma ce qu'est une usure en dépouille. Quelles sont les conséquences de cette usure sur la pièce. Commenter les courbes issues des essais.

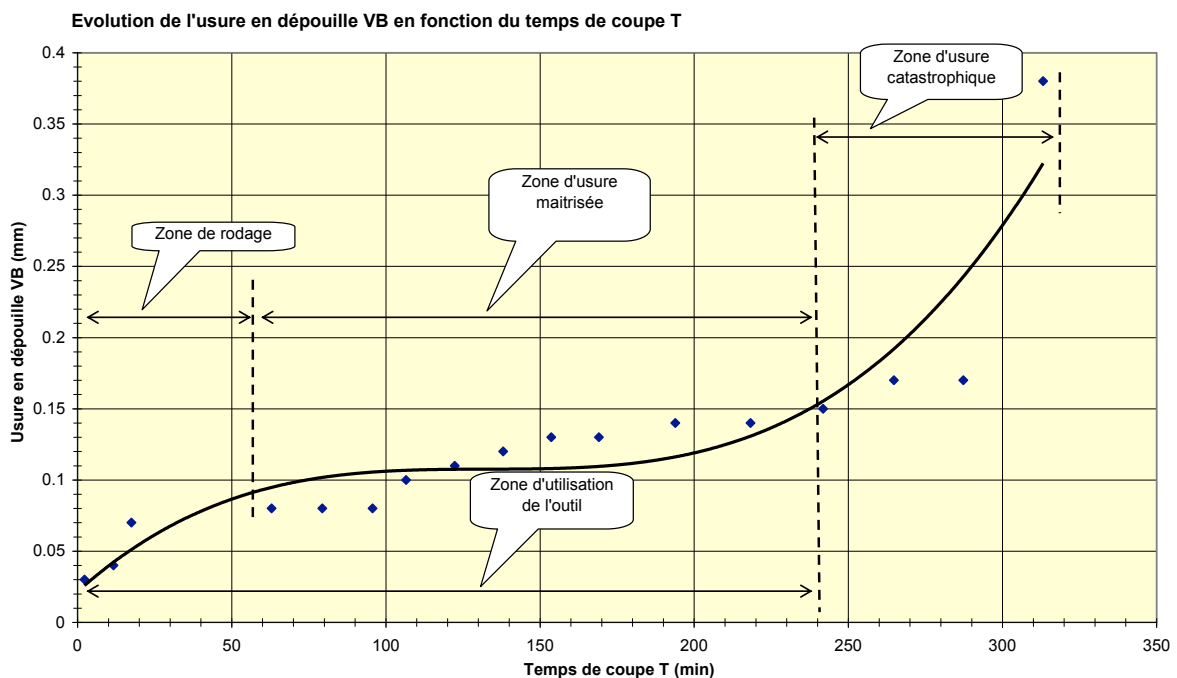
L'usure en dépouille, comme son nom l'indique, se situe sur la face de dépouille de l'outil (celle qui regarde la surface usinée). Cette usure correspond au frottement localisé au niveau de l'arête entre la pièce et la face de dépouille qui va engendrer une facette de hauteur pouvant être variable notée  $VB$  (voir norme). Cette usure conduira à une modification locale de l'angle de dépouille et en conséquence entraînera une dégradation de l'état de surface, un accroissement des efforts de coupe et un échauffement plus important. Cette usure s'accompagne d'un recul d'arête qui vaut  $V_B \cdot \tan \alpha$ , modifiant d'autant la valeur de la cote au rayon.



Une courbe d'usure en dépouille est souvent divisée en trois zones caractéristiques :

- Une zone de rodage de l'arête de l'outil ;
- Une zone d'usure maîtrisée (évolution quasi linéaire) ;
- Une zone d'usure dite catastrophique où l'usure croît exponentiellement.

Cette dernière zone est à éviter car l'usure est non maîtrisée et elle permet souvent de fixer le motif d'usure maximal retenu (ici  $VB^*=0,15 \text{ mm}$ ).



**B.4.6** À partir des courbes d'usure, calculer le nombre de pièces usinées entre deux changements de plaquette. Argumenter votre raisonnement.

Hypothèses :

- le même outil sera utilisé physiquement pour les opérations de ½ finition et de finition ;
- les usures en dépouille provoquées par les passes de ½ finition et celles de finition sont cumulatives ;
- l'étude sera conduite sur le travail en poussant, en considérant le départ de l'outil juste après la saillie de  $\Phi 122,5$  de gauche.

*La longueur usinée vaut approximativement 249 mm.*

*En ½ finition deux passes sont prises et une seule en finition.*

*La solution pouvait être traitée graphiquement à l'aide du Document Ressources **DRS-B45** ou par le calcul à l'aide des équations des courbes de tendance indiquées sur ce même document.*

Solution par le calcul :

Trouver le nombre de pièces usinées tel que :  $\Sigma V_B(1/2f) + \Sigma V_B(f) \leq V_B^*$

$$\text{Soit : } \left[ \begin{array}{l} 10^{-7}(n.t_{1/2f})^3 - 3.10^{-5}(n.t_{1/2f})^2 \\ + 0,0034(n.t_{1/2f}) + 0,018 \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} 4.10^{-8}(n.t_f)^3 - 10^{-5}(n.t_f)^2 \\ + 0,0019(n.t_f) + 0,026 \end{array} \right] \leq V_B^*(0,15)$$

$$\text{Avec } t_{1/2f} = L.\pi \cdot \left( \frac{D_1 + D_2}{f_{1/2f} \cdot V_c(1/2 \text{ finition})} \right) \text{ et } t_f = L.\pi \cdot \left( \frac{D_3}{f_f \cdot V_c(\text{ finition})} \right)$$

AN : avec  $D_1 = 121,6 \text{ mm}$  ;  $D_2 = 120,6 \text{ mm}$  ;  $D_3 = 120 \text{ mm}$  et  $n =$  le nombre de pièces

*Cette hypothèse est prise sachant que l'usinage se fait à vitesse de coupe constante, mais la longueur de 249 mm s'effectue en grande partie sur  $D_3$ , justifiant notre choix de prendre en considération ce diamètre.*

$$t_{1/2f} = 5,41 \text{ min et } t_f = 3,12 \text{ min}$$

*Nous avons à résoudre l'équation du 3<sup>ème</sup> degré de la forme :  $A.n^3 + B.n^2 + C.n + D = V_B^*$*

*Après résolution,  $n$  est égale à 6 pièces.*

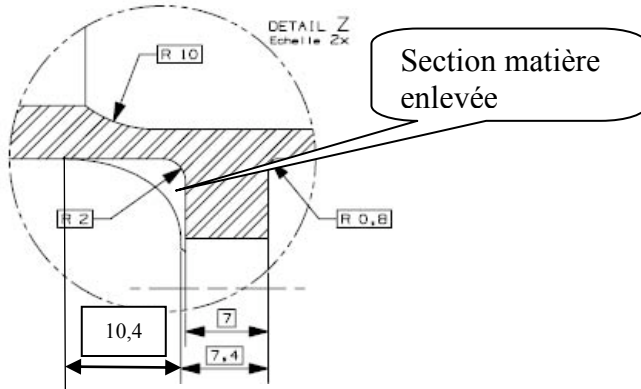
nb pièces (n)	VB atteint
1	0.05
2	0.07
3	0.09
4	0.11
5	0.13
6	0.15 (VB*)
7	0.16
8	0.18
9	0.19
10	0.20

### **B.5 – Etude de la phase 100 : Fraisage des 9 lamages R 40**

Lors de cette phase nous nous intéresserons uniquement au fraisage des 9 lamages de rayon 40 mm (Document Technique **DT-12**). L'outil utilisé est une fraise 3 tailles équipée de 6 cassettes réglables axialement comme l'indique le Document

Ressources **DRS-B42**, montées alternativement à droite et à gauche. Les plaquettes carbure montées ont un rayon  $r_\epsilon$  de 2 mm et sont de nuance adéquate pour cet alliage de titane. Le lamage se fait en plongée radiale.

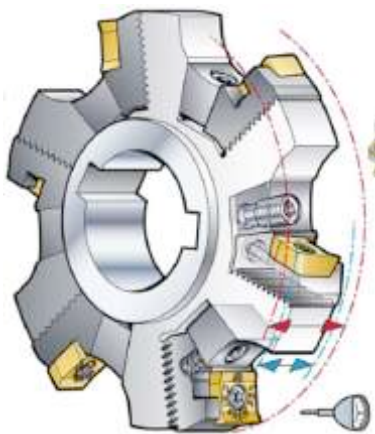
**B.5.1** À l'aide du détail Z du Document Technique **DT-3**, représenter la forme de la section de matière enlevée (reproduire sur copie les éléments du détail Z nécessaires pour répondre).



**B.5.2** Calculer la largeur de réglage minimale de la fraise correspondant à la profondeur de passe axiale  $a_p$ .

*Comme il est montré sur le schéma ci-dessus, la largeur minimale de la fraise doit être d'au moins 10,4 mm. En conséquence le réglage latéral des dents de la fraise devra être ajusté à une dimension permettant un léger recouvrement.*

**B.5.3** Choisir à l'aide du Document Ressources **DRS-B42**, la référence de fraise qui convient. Justifier votre choix.



*Compte tenu de l'information de la question **B.5.2**, il faut choisir une fraise dont la largeur de coupe est comprise entre 10 et 12 mm.*

*Le rayon des encoches étant de 40 mm, un diamètre de 80 mm s'impose, impliquant un nombre de dents égal à 6.*

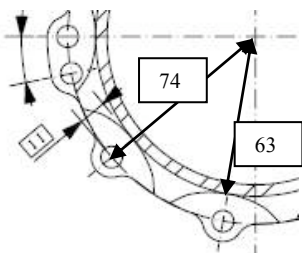
*Par la suite plusieurs choix sont possibles en fonction du type d'attachement et de la profondeur d'usinage radiale  $a_e$  (notée  $a_r$  sur le Document Ressources **DRS-B42**).*

*Soit  $a_e = 74 - 63 + \text{rayon bossage} = 19 \text{ mm}$*

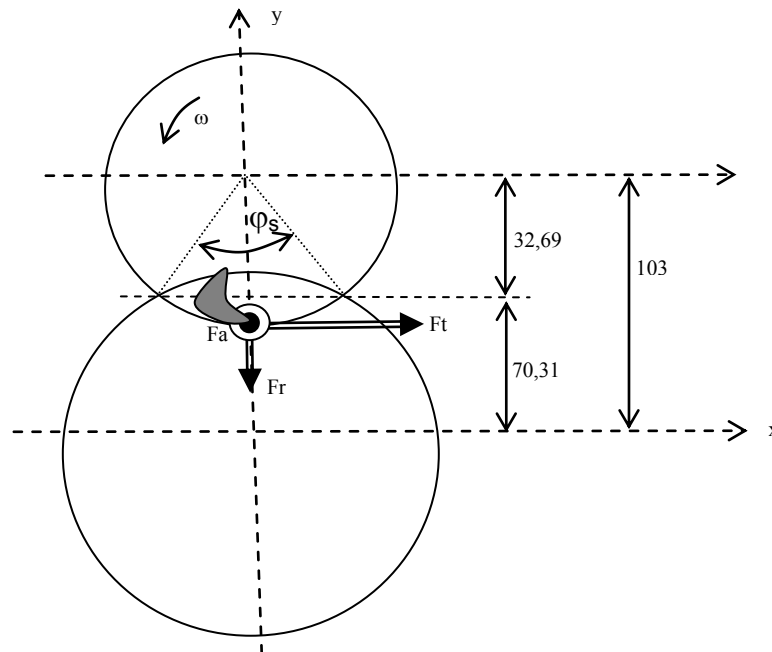
*Par précaution il est préférable de choisir la valeur proposée maximale soit 20 mm.*

*Le rayon de plaquette doit être de 2 mm comme indiqué sur le détail Z.*

*D'où le choix final de la référence : R331-32-080Q27EM12.2*



**B.5.4** Déterminer le nombre maximal de dents en contact. Commenter votre réponse.



Le nombre maximal de dents en contact se situe lorsque la plongée est terminée. C'est à ce moment que l'arc de contact est le plus grand.

Le nombre de dents en contact est égal à  $(Z/360^\circ) \times \varphi_s \geq 1$

L'angle d'engagement  $\varphi_s$  peut être calculé numériquement ou à l'aide d'un rapporteur.

Numériquement, il suffisait d'écrire que :

$$(1) : x^2 + y^2 = 74^2$$

$$(2) : x^2 + (y - 103)^2 = 40^2$$

$$\text{de (1), } y^2 = 74^2 - x^2$$

Injecté dans (2), nous trouvons que  $y = 70,31 \text{ mm}$

$$\text{D'où l'angle } \varphi_s = 2 \text{Arcos}\left(\frac{32,69}{40}\right) = 70,38^\circ$$

Donc le nombre maximal de dents en contact est égal à 1,17 soit 2 dents par moment.

Si cette valeur est inférieure à 1, alors il n'y a pas continuité de coupe et en conséquence des vibrations pourraient apparaître.

Cependant cette continuité n'est pas assurée tout le long de la plongée de la fraise.

**B.5.5** Représenter la fraise en position dans la pièce lorsque la section de copeau est maximale et placer les composantes ( $F_t$ ,  $F_r$  et  $F_a$ ) de l'action mécanique de la fraise sur la pièce.

Les actions mécaniques sont mises en place sur le schéma ci-dessus.

Il est à noter que le sens de l'effort axial dépendra du sens de l'angle d'inclinaison des plaquettes ( $\lambda_s$ ). A la question suivante la coupe est considérée quasi orthogonale ce qui implique un angle d'inclinaison ( $\lambda_s$ ) équivalent à zéro, et donc un effort axial nul.

**B.5.6** En considérant que la coupe est quasi orthogonale lors de la plongée de la fraise, la relation de coupe ci-dessous est validée pour le couple carbure/titane.



$$F_t = [k_{t1} \times (f_z - f_{z0}) + k_{t2}] \times a_p$$

$$\text{avec } k_{t1} = 1100 \text{ MPa}, k_{t2} = 100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}, f_{z0} = 0.05 \text{ mm} \cdot \text{dent}^{-1} \cdot \text{tr}^{-1}$$

Déterminer le couple que doit encaisser les éléments technologiques du maintien et de mise en position de la pièce.

*Ce couple maximal à la coupe sera supporté par le locating placé sur l'alésage de diamètre 20H7 qui à ce stade de la gamme ne vaut que 19H7. Le couple à la coupe  $C_c$  est de la forme :*

$$C_c = F_t \cdot R_u = [k_{t1} \times (f_z - f_{z0}) + k_{t2}] \times a_p \cdot R_u$$

avec :

$$11 \text{ mm} \leq a_p \leq 12 \text{ mm}$$

$$R_u = 63 \text{ mm}$$

$$f_z = 0,05 \text{ mm} / \text{tr} / \text{dent}$$

$$AN : 65,52 \leq C_c \text{ (mN)} \leq 75,6$$

*Par sécurité, le calcul final de dimensionnement du locating se fera avec la valeur maximale obtenue majorée par un coefficient de sécurité. Remarque qu'il n'est pas nécessaire de calculer la condition de non matage sur la surface d'appui de la pièce car à ce stade le diamètre sur lequel s'appuie le locating vaut 19H7, la dimension finale étant 20H7.*

## **B.6 – Simplification de la gamme opératoire**

Lors des essais d'usure effectués, il a été observé des écaillages prématurés des outils diamant suite à un manque de rigidité du tour CN en place. En conséquence, le sous traitant décide d'investir dans un centre de tournage/fraisage multi-axes bi-broches Mazak Integrex 400-S équipé d'une broche de fraisage permettant de monter des porte-outils à manche Capto de fraisage et de tournage. De plus, l'aspect multi-axes de cette machine équipée d'une lunette pilotée numériquement permettrait d'associer des phases d'usinage. Les caractéristiques de cette nouvelle machine sont présentées dans le Document Ressources **DRS-B6**.

### **B.6.1** Quels intérêts techniques présentent ce centre de tournage/fraisage dans le cas de la production des trompettes de liaison ?

*Cette typologie de machine outil multi-axes permet de combiner à la fois des opérations de tournage, de fraisage, de perçage... A l'aide des éléments technologiques tels que la lunette pilotée numériquement, la broche de reprise, l'ensemble de la gamme est réalisable sur la même machine. L'utilisation synchronisée des deux broches et le pilotage de la lunette permettront de réduire les déformations de la pièce (position de la lunette en opposition à l'action de coupe).*

*Cela conduira à une réduction importante du nombre de phases d'usinage entraînant une réduction des prises de pièces. Ceci permettra d'améliorer la qualité géométrique globale de la pièce. Inévitablement le temps d'usinage diminuera, limitant ainsi les en cours.*


*De multiples solutions de nouvelles gammes de fabrication sont envisageables avec ces moyens modernes de fabrication.*

*De plus, un seul opérateur plus compétent est nécessaire.*

## PARTIE C – CONTRÔLE ET FRETTAGE

### C.1 – Contrôle

Cette étude se situe dans une démarche de mesure et de contrôle réception de produit fini. On s'intéresse à la mise en œuvre sur machine à mesurer tridimensionnelle du contrôle de la spécification :

	∅ 0,02 CZ	A	B	D
---	-----------	---	---	---

**C.1.1** Sur le Document Réponse **DR-C11**, analyser et interpréter cette spécification.

L'analyse mettra en évidence l'(les) élément(s) tolérancé(s), l'(les) élément(s) de référence(s), la(les) référence(s) spécifiée(s) et la(les) zone(s) de tolérance. Pour chacun de ces éléments, préciser éventuellement la nature, la forme, la(les) dimension(s), la situation et les critères d'association.

**C.1.2** Pour contrôler cette spécification, on utilise la machine à mesurer tridimensionnelle schématisée sur le Document Réponse **DR-C12**. Sur ce document, définir, sous forme d'un schéma, la mise en position de la pièce sur la machine et son maintien en position (si nécessaire).

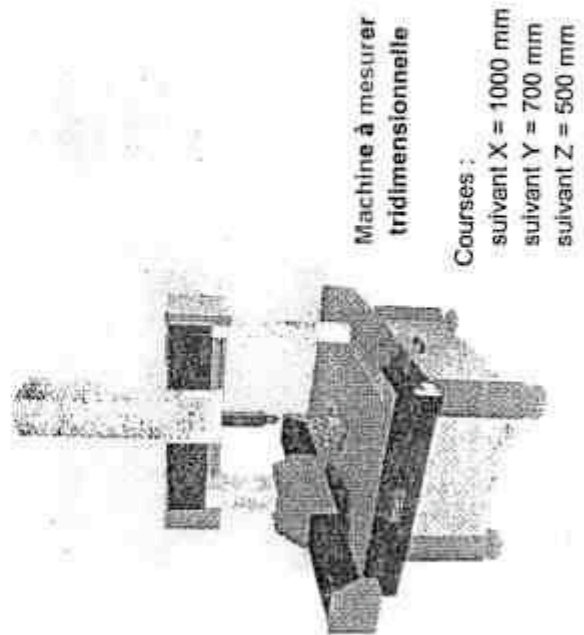
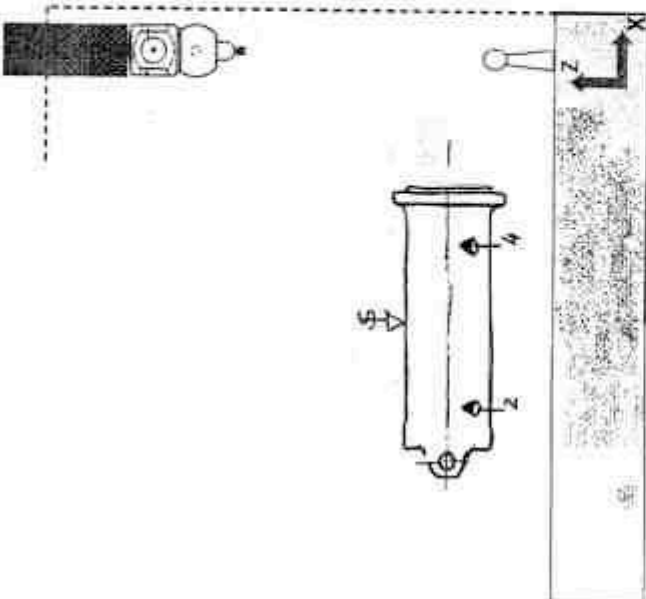
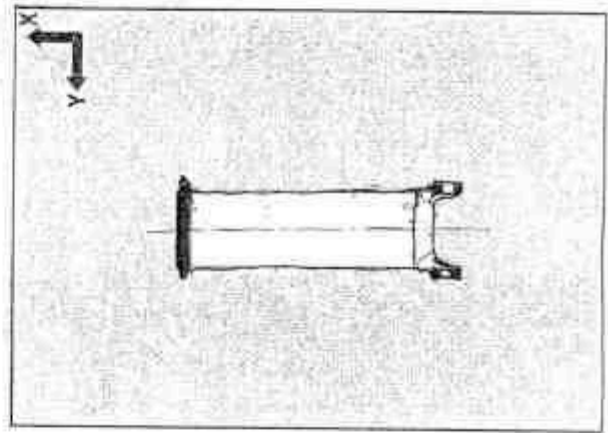
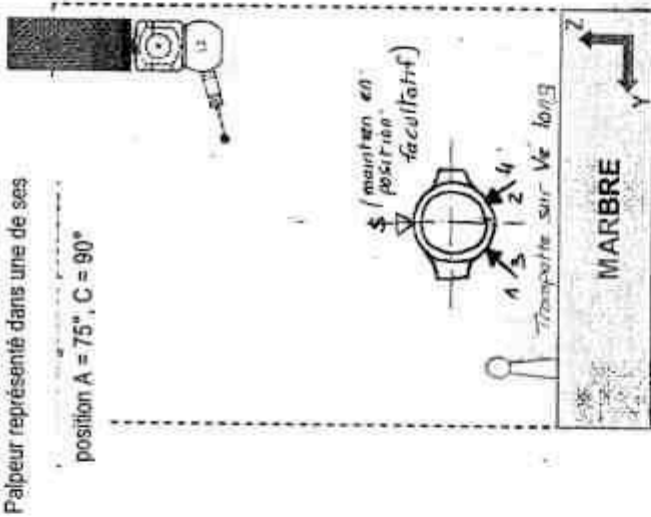
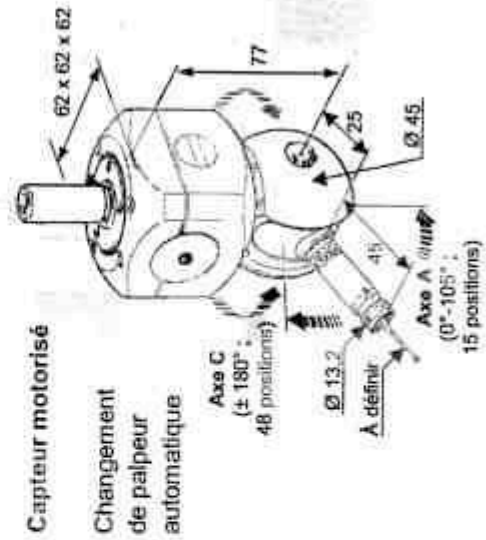
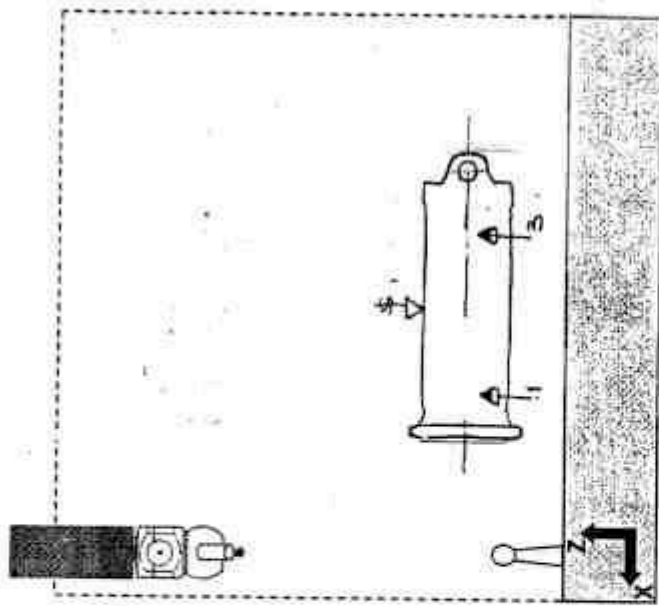
**C.1.3.** Sur le Document Réponse **DR-C13<sub>1</sub>**, proposer une gamme de mesurage.

Cette gamme définira les éléments palpés, les éléments construits et leur mode de construction, les repères éventuels (dégauchissages) et leur mode de construction et les critères d'acceptabilité :

- sur le Document Réponse **DR-C13<sub>2</sub>**, prendre soin de repérer les éléments définis précédemment ;
- sur le Document Réponse **DR-C13<sub>3</sub>**, définir le nombre de palpeurs utilisés et, pour chacun, son orientation et sa configuration ;
- proposer une structure rigoureuse et claire de la chronologie des opérations ;
- si nécessaire, indiquer des commentaires en liaison avec l'analyse de la spécification et la pièce.

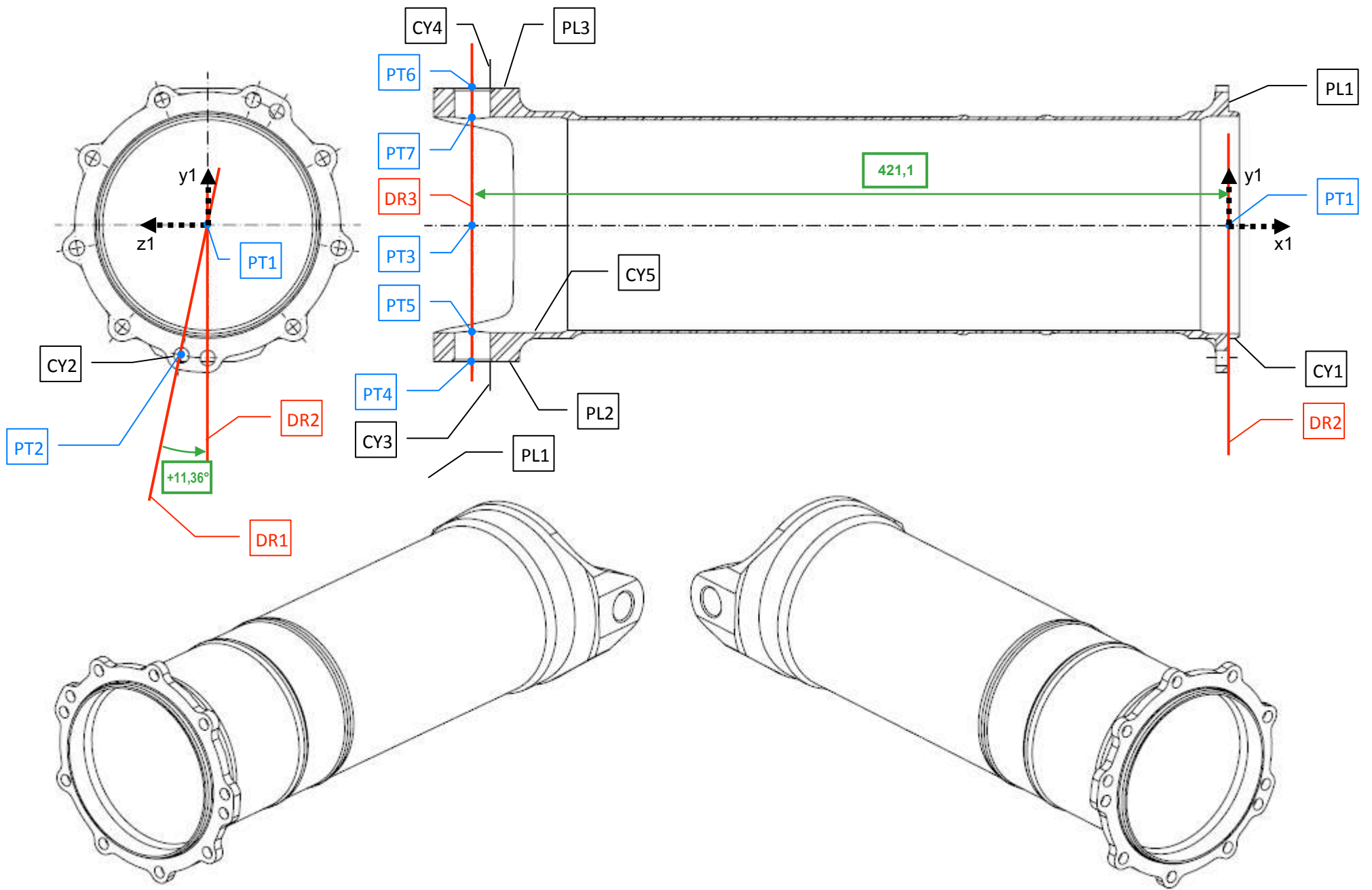


**Document Réponse DR-C12**



### GAMME DE MESURAGE SUR MMT

N° Op	N° palpeur	Opération de mesure	Repère élément palpé	Opération de construction ou de calcul. Contraintes	Repère élément construit
1	3	Palper plan	PL1		
2	3	Palper cylindre (contraint $\perp$ PL1)	CY1		
3	3	Palper cylindre (contraint $\perp$ PL1)	CY2		
4				Intersection PL1, axe de CY1	PT1
5				Intersection PL1, axe de CY2	PT2
6				Droite passant par PT1, PT2	DR1
7				Droite dans PL1, d'angle $+11,36^\circ$ avec DR1	DR2
8				Repère (origine PT1 ; $x1 \perp$ PL1 ; $y1 \parallel$ DR2)	R1
9				Dans le repère R1, point (- 421,1 ; 0 ; 0)	PT3
10				Dans le repère R1, droite (PT3 ; z1)	DR3
11	2	Palper cylindre	CY3		
12	2	Palper plan	PL2		
13	4	Palper cylindre	CY4		
14	4	Palper plan	PL3		
15	1	Palper cylindre	CY5		
16				Intersection PL2, axe de CY3	PT4
17				La plus proche intersection (CY5, axe de CY3) de PT4	PT5
18				Intersection PL3, axe de CY4	PT6
19				La plus proche intersection (CY5, axe de CY4) de PT6	PT7
				<b>Contrainte : distance PT4, DR3 <math>\leq</math> 0,01</b>	
				<b>Contrainte : distance PT5, DR3 <math>\leq</math> 0,01</b>	
				<b>Contrainte : distance PT6, DR3 <math>\leq</math> 0,01</b>	
				<b>Contrainte : distance PT7, DR3 <math>\leq</math> 0,01</b>	



CONFIGURATION DU (DES) PALPEUR(S) (à compléter)				
N° palpeur	Composition du palpeur		Orientation du palpeur	
	Allonge (SE <sub>x</sub> )	Stylet (PS-xxR)	Angle / axe A	Angle / axe C
1	néant	PS1-13R	90°	0°
2	néant	PS1-13R	90°	90°
3	néant	PS1-13R	90°	180°
4	néant	PS1-13R	90°	270°
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				

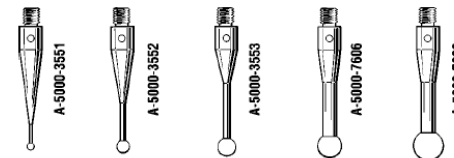
(si nécessaire, prolonger ce tableau sur feuille de copie)

Remarque : à chaque combinaison utile [composition – orientation] du palpeur différente est associé un numéro de palpeur différent.

## Stylets filetage M3

### Stylets bille rubis (tige acier)

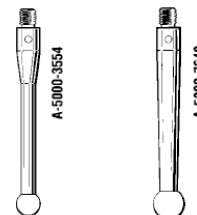
Longueur 21 mm



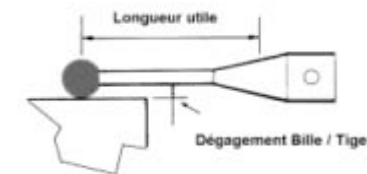
Ø Bille en mm	Longueur utile	Poids en gr.	Référence	Numéro PS
1	4	1	A-5000-3551	PS1-9R
2	8	1	A-5000-3552	PS1-10R
3	12	1	A-5000-3553	PS1-11R
4	17	1,3	A-5000-7606	PS1-12R
5	21	1,5	A-5000-7630	PS1-13R

### Stylets bille rubis (tige acier)

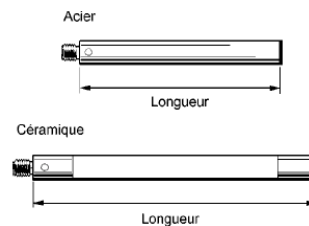
Longueur 31 mm



Ø Bille en mm	Longueur utile	Poids en gr.	Référence	Numéro PS
4	27	2,5	A-5000-3554	PS1-1R
5	31	3	A-5000-7648	PS1-14R



### Allonges pour stylets M3



Longueur en mm	Poids en gr.	Matière	Référence	Numéro SE
10	0,9	Acier	M-5000-7633	SE8
20	1,6	Acier	M-5000-3592	SE2
35	2,9	Acier	M-5000-3593	SE3
50	2,95	Céram.	A-5003-0075	SE29

**Document Réponse DR-C13<sub>3</sub>**

## C.2 – Frettage des deux bagues de réparation

Deux bagues de réparation sont définies sur le Document Technique **DT-8**. Le détail Y du Document Technique **DT-3** montre l'alésage  $\Phi$  20H7 équipé d'une de ces bagues.

### C.2.1 Quelles sont les fonctions de ces bagues ?

*Ces bagues permettent de réaliser la liaison avec l'étrier 4 par l'intermédiaire des axes 3 (voir **DT-2**).*

*Comme leur nom l'indique (bague de réparation), ce sont des pièces d'usure qui pourront être remplacées afin d'éviter de remonter une trompette neuve.*

### C.2.2 Quelle est la désignation de la matière des bagues et expliquer ce choix.

Matière : X5CrNiCuMo 16 06 03

*Il s'agit d'un acier fortement allié dont le % de carbone est de l'ordre de 0,05%.*

*Le fort % de chrome (16%) et de nickel (6%) lui confère des propriétés de résistance à la corrosion. Il s'agit d'un acier inoxydable (chrome >11%).*

*Cet acier contient aussi 3% de cuivre pour améliorer les propriétés tribologiques de la liaison assurée. Il y a aussi des traces de molybdène.*

### C.2.3 Indiquer les différentes solutions quant au frettage de ces bagues

*Il existe plusieurs solutions pour le montage de ces bagues :*

- *L'emmanchement classique en force à la presse ;*
- *La contraction de la bague par refroidissement à l'azote liquide (sans force) ;*
- *La dilatation de l'alésage de la trompette par chauffage localisé (sans force) ;*
- *La combinaison des deux dernières solutions (sans force).*

### C.2.4 Dans une première approche, nous envisageons de réaliser le frettage en ne contractant que la bague.

La procédure est la suivante :

- Contrôle des bagues et des alésages
- Dégraissage des bagues et des pièces à l'acétone
- Tremper les bagues dans l'azote liquide (-195°C)
- Enduire de mastinox (produit graissant) les alésages et les bagues
- Emmanchement des bagues sur la trompette

Hypothèse :

Le diamètre de l'oreille sera considéré comme un moyeu cylindrique de diamètre  $D=42$  mm.

Il est aussi considéré que la collerette de la bague n'a pas d'influence sur la déformation.



### Données :

$$\alpha_{\text{titane}} = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C/m}$$

$$\alpha_{\text{acier inoxydable}} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C/m}$$

$$\delta = \alpha_i \times \Delta T \times d$$

$$\nu_{\text{titane}} = 0,25 ; \nu_{\text{acier inoxydable}} = 0,29$$

$$E_{\text{titane}} = 115 \text{ GPa} ; E_{\text{acier inoxydable}} = 203 \text{ GPa}$$

Avec :

- $\alpha$ , le coefficient de dilatation linéique ;
- $\delta$ , la valeur de la contraction ou dilatation au diamètre ;
- $d$ , le diamètre nominal de l'emmanchement ;
- $D$ , le diamètre extérieur du moyeu ;
- $\nu$ , le coefficient de Poisson ;
- $E$ , le module de Young.

Calculer si la contraction de la bague est suffisante pour effectuer un emmanchement sans force. Commentaires.

Si cela n'est pas le cas, proposer une autre solution.

*Le cas le plus défavorable correspond à un serrage maximal. Celui-ci est obtenu pour un diamètre de bague maximal (20,035 mm) et un diamètre d'alésage minimal (20 mm).*

*$d$  : le diamètre nominal de l'emmanchement vaut ici 20 mm.*

$$\delta = \alpha_i \cdot \Delta t \cdot d$$

$$AN : 16 \cdot 10^{-6} \times 20^\circ - (-195^\circ) \times 20 = 0,0688 \text{ mm}$$

*Ainsi dans le pire des cas, le diamètre de la bague contractée vaut :*

$$20,035 - 0,0688 = 19,966 < 20.$$

*Il reste donc un jeu de 0,04 mm pour effectuer l'assemblage sans force.*

*Après le montage, il est nécessaire de contrôler la valeur de l'alésage 10H7.*

### **C.2.5 Démontage de la bague pour réparation**

Expliquer de quelle manière seront ôtées les bagues après usure pour remplacement.

Calculer l'effort d'éjection des bagues à l'aide des données ci-dessus et du Document Ressources **DRS-C24**. Le coefficient de frottement entre la bague de réparation et la trompette de liaison équipée sera évalué à 0,2.

Quelle vérification faut-il faire pour s'assurer du non endommagement de l'alésage  $\Phi$  20H7 ?

*Il n'est pas possible d'enlever les bagues par chauffage car le coefficient de dilatation de la bague est deux fois supérieur à celui de la trompette. Le refroidissement localisé de la bague est guère envisageable pratiquement.*

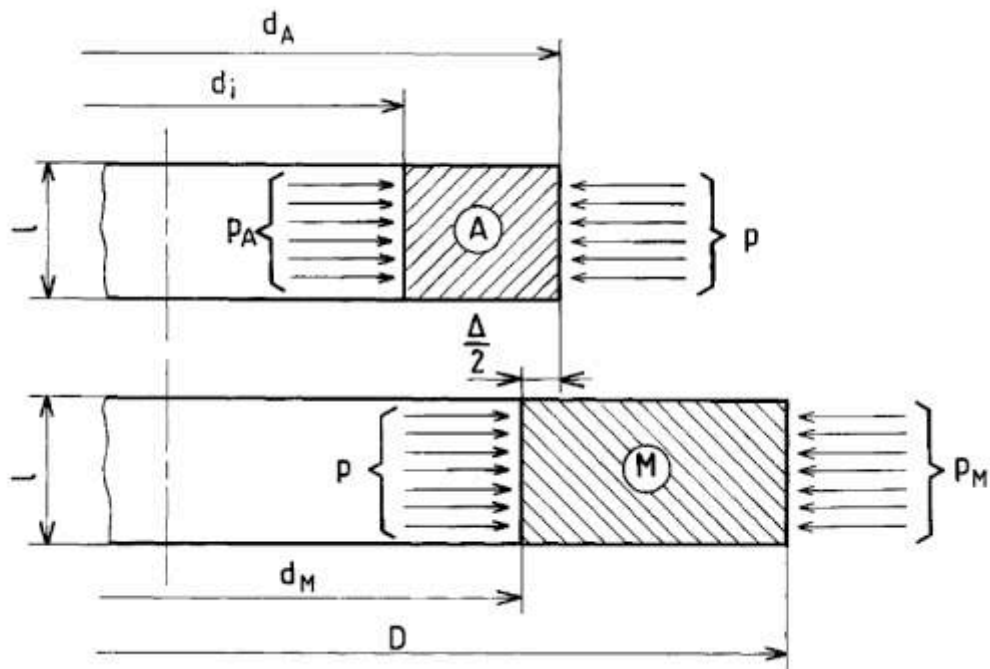
*La solution consiste donc à ôter la bague à l'aide d'une presse. Un outillage spécifique sera envisagé pour ne pas déformer localement les oreilles.*

*L'effort pour l'éjection de la bague est de la forme :*

$$F_{\text{éjectionmax}} = p_{\text{max}} \times \mu \times 2 \times \pi \times \frac{d}{2} \times h$$

$$\text{avec } \mu = 0,2 ; d = 20 \text{ mm} ; h = 15 \text{ mm}$$

Le calcul de la pression de contact entre les deux surfaces se fait à l'aide des formules jointes d'après les normes AFNOR NFE 22-621, Janvier 1984.



**Relation liant  $p$  et  $\Delta$**

Les relations traduisant l'équilibre d'un élément de l'arbre et de la frette sous l'action des différentes contraintes s'exerçant sur lui, les lois de déformation de ces éléments, les formules de Lamé et les lois de Hooke généralisées permettent d'écrire :

$$\frac{\Delta}{d} = p_{\min} \left[ \frac{d^4 \cdot (a_M - a_A) + d^2 \cdot D^2 \cdot (a_A + b_M) + D^2 \cdot d_1^2 \cdot (b_A - b_M) - d_1^2 \cdot d^2 (b_M + a_A)}{(D^2 - d^2) \cdot (d^2 - d_1^2)} \right]$$

Pour le calcul des contraintes, il y a lieu de considérer le cas des pièces usinées au maximum de matière : arbre au maximum de sa tolérance, moyeu, au minimum. Le serrage est alors égal à :

$$\Delta_{\max} = \Delta + IT_A + IT_M$$

et la pression de frettage est :

$$p_{\max} = p_{\min} \frac{\Delta + IT_A + IT_M}{\Delta}$$

C'est cette pression  $p_{\max}$  qui servira à calculer les contraintes.

$$a_A = \frac{1 - \nu_A}{E_A} \quad ; \quad a_M = \frac{1 - \nu_M}{E_M}$$

$$b_A = \frac{1 + \nu_A}{E_A} \quad ; \quad b_M = \frac{1 + \nu_M}{E_M}$$

(A : Arbre ; M : Moyeu)

La pression maximale est directement proportionnelle à l'interférence. Les calculs se feront au pire des cas, c'est-à-dire au maximum de matière.

$$p_{max} = p_{min} \times \frac{\Delta_{min} + IT_A + IT_M}{\Delta_{min}}$$

$$\Delta_{max} = \Delta_{min} + IT_A + IT_M$$

$$\Delta_{min} = 20,022 - 20,021 = 0,001 \text{ mm}$$

$$IT_A = 20,035 - 20,022 = 0,013 \text{ mm}$$

$$IT_M = 20,021 - 20 = 0,021 \text{ mm}$$

$$a_A = 3,49 \cdot 10^{-12}$$

$$b_A = 6,35 \cdot 10^{-12}$$

$$a_M = 6,52 \cdot 10^{-12}$$

$$b_M = 10,86 \cdot 10^{-12}$$

$$\frac{\Delta}{d} = p_{min} \left[ \frac{20^4 \cdot 3,03 + 20^2 \cdot 42^2 \cdot 14,35 - 42^2 \cdot 16^2 \cdot 4,51 - 16^2 \cdot 20^2 \cdot 14,35}{(42^2 - 20^2)(20^2 - 16^2)} \right] \cdot 10^{-12}$$

$$\frac{\Delta}{d} = p_{min} \cdot 36,17 \cdot 10^{-12}$$

$$\text{soit } p_{min} = 1,38 \cdot 10^6 \text{ Pa et } p_{max} = 48,3 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$F_{\text{éjectionmax}} = p_{max} \times \mu \times 2 \times \pi \times \frac{d}{2} \times h$$

$$\text{avec } \mu = 0,2 ; d = 20 \text{ mm} ; h = 15 \text{ mm}$$

$$\text{Soit } F_{\text{éjectionmax}} = 4550 \text{ N}$$

Il est à noter que le produit graissant (mastinox), garde ses propriétés graissantes longtemps afin de faciliter le démontage et éviter ainsi le grippage (arrachement de matière).

Pour vérifier le non endommagement de l'alésage 20H7, il faut vérifier que la contrainte tangentielle générée par le défretage ne dépasse pas la contrainte de Von Mises.

D'autre part, il faut aussi vérifier après frettage que la pression maximale  $p_{max}$  reste inférieure à la limite élastique des deux matériaux, ce qui est le cas.

# **Agrégation de Génie Mécanique – Concours externe**

## **Commentaires du jury sur l'épreuve Étude d'industrialisation**

### **Session 2009**

#### **Commentaires relatifs à la partie A**

Cette partie a permis d'évaluer les connaissances technologiques des candidats dans le domaine de trois procédés : le refoulement, le matriçage et le carottage.

La sous-partie consacrée à l'opération de refoulement de la trompette a été abordée par 80 % des candidats. Mis à part quelques candidats qui se sont égarés (confusions avec les procédés de fluotournage, galetage ou formage à froid au travers d'une filière) les réponses fournies montrent une bonne connaissance de ce procédé. Les réponses apportées au choix du type de machine ont été globalement correctes. Par contre, peu de réponses sur la description du principe de l'outillage ont été satisfaisantes, un bon nombre de candidats ayant proposé une solution pour laquelle, après refoulement, l'extraction de la pièce de l'outillage était quasiment impossible.

L'étude de l'opération de matriçage n'a été abordée que par 75 % des candidats et a été la moins bien traitée des trois études de procédés constituant la partie A du sujet. Il s'agissait donc d'exploiter qualitativement les images extraites d'une simulation numérique de la phase de matriçage de la trompette. Peu nombreux sont les candidats qui ont évoqué les conséquences de la mauvaise position de l'ébauche de la pièce au sein de l'outillage constatée sur les premières figures fournies. L'analyse des autres clichés aurait dû leur permettre de signaler le risque prévisionnel d'un manque de matière (figure 6) et celui d'une hétérogénéité de structure (cartographie des températures de la figure 7 de l'état de déformation cumulé de la figure 8) et d'en déduire les conséquences sur le processus (effort et vitesse de forgeage, durée du cycle, traitement thermomécanique). Là aussi, les réponses apportées ne correspondaient pas aux attentes.

Près de 85 % des candidats ont décrit et caractérisé l'opération de carottage (ou trépannage). Dans la partie A du sujet, c'est de loin l'étude de ce procédé qui a donné le plus de satisfaction lors de la correction des copies de cette épreuve. Ce procédé est connu et l'allure des outils (trépan) susceptibles de convenir pour réaliser cette opération a globalement été bien décrite.

#### **Commentaires relatifs à la partie B**

La partie B de ce sujet s'intéressait principalement à des interrogations sur la fabrication de la pièce par enlèvement de matière. Cette partie était décomposée en 6 sous-parties, qui elles-mêmes contenaient des questions à difficulté croissante de manière à ce que le candidat rentre progressivement dans la réflexion.

La sous-partie B.1 proposait un questionnement simple sur des fondamentaux de base concernant des essais mécaniques liés à la réception matière. Les éprouvettes d'essais étaient extraites dans les sens long et travers de la carotte issue de la phase de carottage. Il ressort qu'une très grande partie des candidats ne connaissent pas l'essai de résilience (mouton de Charpy) et qu'il a été très difficile de trouver des copies complètement justes de l'illustration d'une courbe de traction. Cette sous-partie avait été posée dans le but de tester les candidats sur les essais mécaniques standard. Les résultats reflètent une méconnaissance inquiétante de ces bases dans le cadre d'une agrégation de génie mécanique.

La sous-partie B.2 traitait de l'étude de tournage ébauche du profil 2 en phase 40. Les règles d'isostatisme semblent inconnues pour certains qui n'hésitent pas à éliminer plus de 6 degrés de liberté. Il y a un manque évident d'adéquation entre le modèle de mise en position isostatique proposé et l'identification des degrés de liberté éliminés par chacun des éléments matériels. Cela

reflète une lacune quant à la matérialisation des éléments de mise en position, indiquant un manque d'utilisation pratique de matériels expérimentaux. La question B.3.4 a été peu traitée par les candidats. Il y avait plusieurs manières de proposer des solutions. L'objectif du débit maximal était souhaitable et entraînait un gain en "temps" avec l'utilisation de l'outil diamant.

La sous-partie B.4 concernant l'étude de la phase 140 de tournage en ½ finition et finition du profil 1 permettait d'évaluer les candidats sur des choix d'outil par rapport à des stratégies d'usinage et des contraintes géométriques liées à la pièce.

Les deux dernières questions permettaient d'évaluer l'usure de l'outil et, en conséquence, de déterminer le nombre de pièces entre chaque changement. Ces questions ont été traitées par moins de 10% des candidats. Nous en déduisons que les bases élémentaires sur les usures d'outil sont méconnues. Placer une usure en dépouille sur une face de dépouille relève du miracle.

La sous-partie B.5 concernait la phase 100 de fraisage de lamage en plongée. L'objectif était de déterminer la section maximale de copeau enlevée par la pièce, de choisir la fraise adéquate et, à partir d'un modèle d'effort de coupe simple, de calculer le couple de maintien de la pièce pour éviter sa rotation. L'ensemble des questions a été en général bien traité par uniquement 40% des candidats.

La sous-partie B.6 s'intéressait à l'optimisation de la gamme actuelle si un centre de tournage-fraisage bi-broches était utilisé. Il s'agissait de donner des arguments qui permettaient de démontrer l'intérêt de l'utilisation d'une telle machine. Cette question ouverte a été bien traitée par moins de 45% des candidats.

En conclusion, la partie B permettait d'évaluer les connaissances des candidats sur des fondamentaux du référentiel de l'agrégation de génie mécanique B3. Des lacunes fortes ont été constatées en science des matériaux, isostatisme et endommagement des outils.

## **Commentaires relatifs à la partie C**

Cette partie traite du contrôle lié à une spécification de localisation avec référence commune aux deux cylindres Ø 20 H7 réputés coaxiaux et l'étude originale du frettage de deux bagues de réparation dans chacun de ces deux cylindres.

### L'étude de l'opération de contrôle (sous-partie C1)

Les candidats sont rompus aux exercices de décodage des spécifications. Cette question, traitée par 85 % des candidats a donné de bons résultats. De même, la mise en position et le maintien de la pièce sur la table de la machine à mesurer tridimensionnelle ont été bien abordés. Il faut quand même signaler que quelques candidats ont cherché à positionner l'axe principal de cette pièce perpendiculairement à la face supérieure de la table de la machine !

Pour le capteur motorisé, un choix raisonné visant la précision du contrôle conduit à adopter un seul stylet, le plus rigide et le plus court possibles (Ø 5 et longueur utile 21) et à proscrire l'utilisation d'une allonge. Une dizaine de candidats, seulement, a fait ces choix.

Les résultats obtenus par les candidats qui ont proposé une chronologie des opérations de contrôle (65 % de la totalité des candidats) sont satisfaisants et sont en accord avec les résultats obtenus à la question relative au décodage de la spécification.

### L'étude de l'opération de frettage (sous-partie C2) :

Cette sous-partie C2 en relation avec la phase 190 de la gamme proposait dans un premier temps de définir le rôle de ces bagues et de commenter la désignation du matériau de ces dites bagues. Si les premières questions ont été bien traitées par l'ensemble des candidats, il ressort que uniquement 15% des candidats ont été capables de trouver la bonne désignation de la matière. A nouveau, ce constat montre un manque manifeste de connaissance en science des matériaux.

Le choix de refroidir la bague a été choisi par l'entreprise et il était demandé de calculer si la contraction suite au refroidissement était suffisante. Cette question a été bien comprise par uniquement par 1/3 des candidats.

La dernière question de cette sous-partie se proposait d'étudier l'enlèvement des bagues lorsqu'elles étaient usées. La résolution consistait à utiliser un modèle de pression, appliqué sur des enveloppes minces et d'évaluer la force d'éjection de la presse en vérifiant la non-détérioration de l'alésage de 20 H7. Cette question a très bien été traitée par uniquement 4 candidats.

## **Commentaire global**

La grande variété des champs d'investigation technologique de ce sujet a permis à la majorité des candidats de ne pas rester bloqué sur des questions et d'utiliser pleinement et efficacement le temps imparti à cette épreuve. Un juste équilibre entre questions de connaissances générales et questions calculatoires a été recherché lors de l'élaboration de ce sujet. En conséquence, les résultats globaux obtenus à cette épreuve sont presque corrects.

Il est à noter que certains candidats se sont contentés de picorer les questions les plus simples dans chaque sous-partie dans le but d'amasser des points. Suite à l'analyse des résultats, il en ressort que les candidats persévérants ont eu de bien meilleurs résultats.

Il est recommandé aux formations en place de veiller au niveau des candidats dans le domaine de la science des matériaux qui est un volet de formation inévitable pour les enseignements que l'on peut attendre d'un professeur agrégé de génie mécanique ou les travaux de recherche pour un doctorant/agrégé.

D'autre part, certaines questions pragmatiques ont démontré un manque évident de connaissances technologiques pratiques sur machine qui sont, en somme, très formatrices pour effectuer le lien entre le réel et le modèle.

## Graphiques

61 candidats ont composé cette épreuve sur 166 inscrits

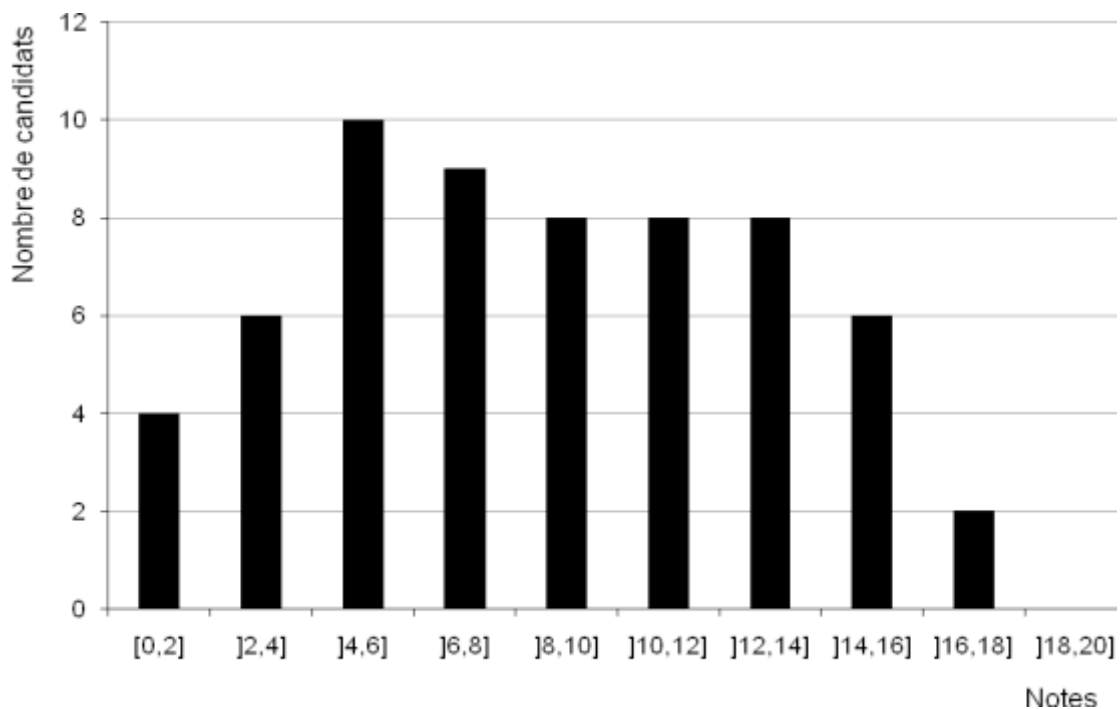
Moyenne : 8,47

Ecart type : 4,32

Note mini : 0,77

Note maxi : 17,04

### Distribution des notes



### Moyenne / 10

### Moyenne par question

