

SESSION 2009

**CONCOURS EXTERNE
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS**

Section : GÉNIE MÉCANIQUE

ÉPREUVE D'ÉTUDE D'INDUSTRIALISATION

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

Ce sujet comporte :

- un fascicule sujet comprenant 3 parties identifiées "**PARTIE A**", "**PARTIE B**" et "**PARTIE C**"
- une chemise intitulée "**DOSSIER TECHNIQUE**"
- une chemise intitulée "**DOSSIER RESSOURCES**"
- une chemise intitulée "**DOSSIER RÉPONSES**".

Après avoir complété les en-têtes, le candidat remettra en fin d'épreuve ses copies paginées et ses "documents-réponses" regroupés dans trois chemises distinctes :

PARTIE A – ÉLABORATION DE LA PIÈCE BRUTE

PARTIE B – ÉLABORATION DU PRODUIT FINI

PARTIE C – CONTRÔLE ET FRETTAGE

Dès la distribution du sujet, le candidat s'assurera que l'exemplaire du dossier remis est complet.
Les documents réponses seront insérés à plat dans les copies, l'entête détachable placé en haut.

FASCICULE SUJET

Avertissement :

- Le candidat est invité à formuler toutes les hypothèses nécessaires à la résolution du problème posé.
- Il sera tenu compte dans la correction de la clarté et de la concision des réponses.

Organisation des documents associés au fascicule sujet :

- Une chemise "**DOSSIER TECHNIQUE**" dans laquelle des documents spécifiques au support de l'étude sont identifiés "**DT-[n° du document]**" ;
- Une chemise "**DOSSIER RESSOURCES**" dans laquelle des documents extraits de catalogues sont identifiés "**DRS-[n° du document]**" ;
- Une chemise "**DOSSIER RÉPONSES**" dans laquelle des documents utilisés pour répondre aux questions sont identifiés "**DR-[n° du document]**" ;
- Les feuilles de copie compléteront ces documents réponses.

Les 3 parties, "PARTIE A", "PARTIE B" et "PARTIE C", du sujet sont indépendantes.

MISE EN SITUATION

Le support technique industriel de cette épreuve est la trompette de liaison équipant le modèle d'hélicoptère représenté sur le Document Technique **DT-1**.

La fonction principale de la transmission de puissance de cet hélicoptère est d'assurer le passage de la puissance depuis deux groupes turbomoteurs (chacun : 1140 kW maxi au décollage) au rotor principal, au rotor arrière et aux divers équipements (pompes hydrauliques, compresseurs, etc.).

Dans cette transmission de puissance deux composants essentiels interviennent :

- la boîte de transmission principale (BTP) située sous le rotor principal, elle doit transmettre la puissance motrice au rotor principal et aux divers équipements ;
- la boîte de transmission arrière (BTA), non représentée sur le Document Technique **DT-1**, située à l'extrémité de la queue de l'appareil, elle fournit la puissance motrice au rotor arrière.

La puissance des deux groupes turbomoteurs est transmise à la BTP par l'intermédiaire de deux arbres de transmission principale (un arbre par groupe) repérés 10 sur le Document Technique **DT-2**. Chacun des deux arbres de transmission principale est situé à l'intérieur d'un fourreau appelé, compte tenu de sa forme, trompette de liaison (repère 14 sur le Document Technique **DT2**).

Nota : L'arbre de transmission arrière qui transmet la puissance à la BTA n'est pas représenté sur les Documents Techniques **DT-1** et **DT-2**. Il n'est pas concerné par l'étude conduite dans ce sujet.

La BTP et les deux groupes turbomoteurs sont liés au plancher mécanique (un des composants structurels du fuselage) par l'intermédiaire d'un dispositif de suspension afin de filtrer les sollicitations dynamiques générées par le rotor principal. Les trompettes de liaison participent à ce dispositif de suspension. Chaque trompette de liaison est en liaison encastrement avec le carter d'un groupe turbomoteur et en liaison avec le carter de la BTP, par l'intermédiaire de l'étrier 4, équivalente à une rotule à doigt (voir le Document Technique **DT-2**).

La trompette de liaison, compte tenu des fonctions qu'elle assure, est une des pièces vitales de l'hélicoptère. Elle est définie sur le Document Technique **DT-3**. Les principales caractéristiques mécaniques du matériau constituant la trompette de liaison, l'alliage de titane Ti 6Al 4V, sont données sur le Document Technique **DT-4**.

En charge nominale, l'entreprise produit 10 pièces par mois.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SUJET

Le sujet se décompose en trois parties distinctes :

- **PARTIE A – ÉLABORATION DE LA PIÈCE BRUTE**
- **PARTIE B – ÉLABORATION DU PRODUIT FINI**
- **PARTIE C – CONTRÔLE ET FRETTAGE**

PARTIE A – ÉLABORATION DE LA PIÈCE BRUTE

Le Document Technique **DT-4** donne le dessin de la trompette de liaison à l'état brut. Le Document Technique **DT-5** fournit le processus prévisionnel d'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.

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 juste avant le 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.

A 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 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

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.

PARTIE B – ÉLABORATION DU PRODUIT FINI

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

B.1.1 Indiquer le rôle de cette phase 20 dans le processus opératoire de la fabrication de la trompette.

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

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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**_{1, 2, 3}.

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

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.

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.

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.

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.

B.4.5 Deux essais d'usure ont été réalisés : un premier essai dans les mêmes conditions que l'opération de ½ 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.

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 Φ 122,5 de gauche.

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_ϵ 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 .

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

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

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.

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.

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

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

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

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 multiaxes 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 multiaxes 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 ?

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-C13₁**, 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-C13₂**, prendre soin de repérer les éléments définis précédemment ;
- sur le Document Réponse **DR-C13₃**, 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.

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 Φ 20H7 équipé d'une de ces bagues.

C.2.1 Quelles sont les fonctions de ces bagues

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

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

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 $\Phi=42$ mm.

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 :

- α , le coefficient de dilatation linéique ;
- δ , la valeur de la contraction ou dilatation au diamètre ;
- d , le diamètre nominal de l'emmanchement ;
- D , le diamètre extérieur du moyeu ;
- ν , 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.

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 $\Phi 20H7$?