

**ÉPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES B**  
**ÉTUDE DU ROTOR ARRIÈRE D'UN HÉLIROPTÈRE DAUPHIN**

Durée : 6 heures

**PRÉSENTATION DU SUJET**

Le sujet porte sur l'étude de la boîte de transmission arrière d'un hélicoptère Dauphin, conçu et commercialisé par la société Eurocopter.

Le produit comporte deux chaînes fonctionnelles indépendantes. La première permet de transmettre la puissance de l'arbre de transmission arrière au rotor arrière. La seconde permet à l'arbre de commande de modifier l'angle de pas des pales et ainsi d'adapter le moment aérodynamique du rotor arrière dont le but est contrer celui du rotor principal. Le sujet propose d'étudier ces deux chaînes, en particulier de déterminer la course du levier de commande de pas nécessaire, d'établir des critères de dimensionnement pour les faisceaux en pied de pale ainsi que de valider les choix réalisés pour le guidage en rotation de l'arbre d'entrée. Il permet également de mettre en œuvre les solutions constructives pour le guidage en rotation de l'arbre d'entrée, avec le réglage de sa position axiale ainsi que des liaisons complètes entre l'axe de commande et le plateau de commande et entre le pied de la pale et le faisceau.

Les poids relatifs des différentes parties du sujet sont :

- |  |      |
|--|------|
| - Notice justificative                     | 48 % |
| - Dessin d'étude de construction mécanique | 52 % |

Thématiquement, sur la notice justificative, la répartition de la notation a été faite de la manière suivante :

- |  |       |
|--|-------|
| - Etude de la commande de l'angle de pas Q1 à Q3                   | 5,1 % |
| - Etude des efforts subis par les pales Q4 à Q16                   | 14 %  |
| - Etude de la résistance du faisceau en traction Q17 à Q21         | 4,5 % |
| - Etude de la résistance du faisceau en torsion Q22 à Q27          | 6,4 % |
| - Etude des efforts dans la liaison pivot Q28 à Q31                | 5,1 % |
| - Calcul de la durée de vie des roulements Q32 à Q34               | 6,4 % |
| - Etude de la cotation et de la fabrication du couvercle Q35 à Q37 | 4,5 % |

**COMMENTAIRE GÉNÉRAL DE L'ÉPREUVE**

Le sujet est structurellement long, les candidats peuvent ainsi s'exprimer sur l'ensemble de leurs compétences et montrer leur capacité à aborder un problème dans sa globalité. Une lecture complète du sujet est conseillée en début d'épreuve afin de s'imprégner du sujet.

Les calculatrices sont interdites. Certaines applications numériques étaient délicates et demandaient donc une aptitude à effectuer des approximations pour pouvoir atteindre le résultat. Lors de l'évaluation des copies, une tolérance a été appliquée sur la précision des résultats obtenus.

Le sujet ne posait pas de difficulté particulière de compréhension. Chacune des phases d'utilisation du produit était détaillée.

Toutes les questions posées sont au niveau des candidats (à chaque question, plusieurs candidats obtiennent le maximum des points, et, pour 75 % des questions, au moins 10 % des candidats obtiennent le maximum des points).

Dans toutes les parties du sujet, des connaissances de base sont évaluées. Bon nombre de candidats ne les maîtrisent pas.

Une grande majorité des candidats a traité ou entamé chaque partie, avec une préférence pour les parties calculatoires (résistance des matériaux en traction, statique dans la liaison pivot). Les candidats ont fréquemment abandonné la notice justificative pour se consacrer au dessin : ils obtiennent en moyenne 45 % de leurs points sur la notice et 55 % sur le dessin d'étude de construction mécanique.

## **ANALYSE PAR PARTIE**

### **Remarques sur la partie notice justificative**

#### **Remarque générale**

Les candidats ont su profiter des parties indépendantes. Certaines parties sont intégralement non traitées par certains candidats.

#### **Étude de la commande de l'angle de pas**

Cette partie, portant sur la cinématique de la commande de pas, a été abordée par 93% des candidats. Un quart de ceux-ci n'obtient aucun point et moins de la moitié obtiennent le maximum de points.

La première question permet de paramétrer dans le plan pertinent la cinématique de la commande de pas, le schéma cinématique étant donné. Seuls 55 % des candidats placent correctement les angles et les distances demandés. Par la suite, la moitié des candidats parviennent à établir la loi entrée-sortie du mécanisme et moins de 40% à en déduire la course du levier de commande. Pour l'application numérique on demandait de lire les valeurs des fonctions trigonométriques sur une courbe dont la légende pouvait, suite à une coquille, être ambiguë. Le jury a considéré que les candidats devaient être capables de distinguer les fonctions usuelles cosinus et tangente l'une de l'autre.

#### **Étude des efforts subis par les pales**

La première question demandait de commenter les hypothèses faites sur la modélisation de deux liaisons et a été traitée par 92% des candidats. De très rares candidats font une réponse complète c'est-à-dire justifient le choix des liaisons retenues à partir des surfaces de contact entre pièces et l'hypothèse d'absence de frottement et de jeu (liaison parfaites) par la présence de bagues de guidage. Certains candidats ne font pas le lien avec la technologie réelle et pensent que les liaisons sphère-cylindre sont obligatoirement réalisées par des roulements. Était ensuite demandée la forme des torseurs des différentes actions mécaniques appliquées à la pale, les modèles étant fournis dans l'énoncé ; moins de la moitié des candidats obtiennent le maximum des points à cette question. Afin de préparer l'étude dynamique, la question suivante demandait le torseur cinématique de la pale par rapport au bâti en son centre de gravité ; cette question de base n'a été correctement traitée que par un candidat sur cinq. Les questions suivantes conduisaient à calculer successivement les torseurs cinétique puis dynamique de la pale dans son mouvement par rapport au bâti puis d'appliquer le principe fondamental de la dynamique à la pale pour en déduire les actions mécaniques dans les différentes liaisons : la moitié des candidats seulement traitent cette partie, et moins de 10% d'entre eux la résolvent avec succès.

#### **Étude de la résistance du faisceau en traction**

88% des candidats abordent cette partie. A la première question, portant sur les théorèmes à utiliser pour déterminer les sollicitations dans la poutre, moins de 2% des candidats pensent au théorème des actions réciproques, beaucoup se contentant de répondre « le principe fondamental de la dynamique » sans plus de précision sur les projections utiles pour résoudre la question.

Les questions suivantes sont globalement bien traitées par les trois quarts des candidats, excepté pour l'application numérique, résolue correctement par seulement 30% des candidats.

### **Étude de la résistance du faisceau en torsion**

La torsion semble bien moins connue des candidats que la traction. 70% des candidats abordent cette partie. Si le moment quadratique et le torseur de cohésion sont bien connus des candidats (environ trois quarts des candidats répondent correctement) il n'en est pas de même des relations entre moment de torsion et angle et moment de torsion et contrainte, résolues dans seulement moins d'un cinquième des copies. Au final, l'application numérique n'aboutit que dans 3% des copies.

### **Étude des efforts dans la liaison pivot**

Cette partie a été globalement bien traitée, 80% des candidats l'ont abordée. Il s'agissait de trouver les relations entre le couple sur l'arbre d'entrée et les efforts sur le pignon conique, compte tenu de la géométrie de ce dernier. Deux tiers des candidats obtiennent le maximum de points tant qu'il s'agit de donner les relations sous forme analytique. Par contre, l'application numérique n'est juste que pour 6% d'entre eux, souvent pour des erreurs de signe, les candidats n'ayant manifestement pas pris garde au fait que les valeurs algébriques (et non absolues) étaient demandées. Peu de candidats ont pris garde que des valeurs approchées (et arrondies par commodité) étaient données dans la suite et vérifié ainsi la cohérence de leurs résultats.

### **Calcul de la durée de vie des roulements**

Afin de rendre cette partie indépendante de la précédente, le résultat de l'étude statique de l'arbre d'entrée était fournie aux candidats sous la forme des torseurs d'actions mécaniques au centre des liaisons sphériques modélisant les roulements. Dans la première question il s'agissait de déterminer les efforts radial et axial dans l'un des deux roulements en appliquant la démarche constructeur pour un montage en « O » hyperstatique et d'en déduire la charge équivalente sur ce même roulement. Seuls 3% des candidats ont traité correctement cette question alors que près de 71% ont abordé la partie, beaucoup ayant fait des erreurs dans les applications numériques. La seconde question demandait de calculer la durée de vie en millions de tours puis en années et de commenter. Il reste alors 2% de bonnes réponses. Compte tenu, d'une part de la difficulté de l'application numérique (exposant 10/3) et d'autre part, d'une confusion de notation dans le document ressource entre charge statique de base et charge dynamique de base, une grande tolérance a été appliquée par les correcteurs au niveau des valeurs numériques admissibles. Par ailleurs, l'effet d'une précontrainte axiale sur la durée de vie de ce type de montage est connu et bien justifié par 30% des candidats seulement.

### **Étude de la cotation et de la fabrication du couvercle**

Dans cette partie, complètement indépendante du reste du sujet, des éléments concernant la désignation et le choix des matériaux, la fabrication par moulage au sable puis usinage et enfin la cotation pour un couvercle de carter étaient demandés. Elle a été abordée par près de 80% des candidats, tant pour les aspects matériaux et fabrication que pour les aspects cotation. Dans la première question sur les matériaux, on demandait de lire une désignation normalisée d'alliage d'aluminium et de conclure sur la possibilité de choisir ce matériau pour le couvercle, puis de choisir un autre matériau possible en donnant sa désignation normalisée. Environ 10% des candidats obtiennent le maximum de points à cette question. Beaucoup d'erreurs sont dues à une confusion entre un alliage d'aluminium et une fonte, et beaucoup de candidats ne s'étonnent pas de parler d'un alliage d'aluminium avec 12% d'aluminium. La seconde question portait sur le moulage au sable d'une pièce. Il était demandé d'ajouter sur le dessin de définition du couvercle la position du plan de joint ainsi que les surépaisseurs d'usinage et les dépouilles éventuelles. 15% des candidats répondent correctement à la question. Enfin, dans la dernière question, il s'agissait d'assurer une contrainte de planéité et une contrainte de perpendicularité (l'étendue de la zone de tolérance n'étant pas demandée. Seulement un tiers des candidats écrivent correctement la planéité, et un dixième la perpendicularité. La syntaxe de cotation est globalement bien maîtrisée,

par contre l'élément tolérancé ou l'élément de référence ne sont souvent pas bien reconnus sur le dessin de définition, on trouve parfois des cotations de planéité sur un cylindre !

## **Remarques sur la partie « dessin d'étude de construction mécanique »**

### **Remarques générales**

Le dessin était constitué de trois zones, dans lesquelles devaient être représentées :

- Une liaison pivot utilisant des roulements à rouleaux coniques montés en « O » ;
- Une liaison encastrement par emmanchement conique ;
- Une liaison complète entre le pied de la pale et le faisceau.

Les candidats semblent ne pas avoir eu de difficulté à appréhender l'environnement.

Les solutions utilisées sur le système commercialisé sont d'une très grande simplicité et comportent peu de pièces : les solutions proposées par les candidats relèvent trop souvent de « l'usine à gaz ».

Les dessins sont globalement d'une qualité satisfaisante, laissant peu d'ambiguïté sur les solutions techniques proposées par les candidats.

### **Zone 1 : montage de roulements à rouleaux coniques en « O »**

Presque tous les candidats (93%) donnent des éléments de solution pour ce montage de roulement. Quelques rares candidats (13%) ne réalisent pas un montage en « O » mais un montage en « X », ou même un montage avec deux roulements montés dans le même sens. D'autres n'utilisent pas les géométries des roulements fournies, qu'il suffit pourtant de décalquer puisqu'elles sont dessinées à l'échelle du calque dans les documents ressources ! Les arrêts axiaux ainsi que les ajustements doivent être compatibles avec le type de montage et permettre de régler la précharge du montage : si les arrêts axiaux sont le plus souvent justes (deux candidats sur trois obtiennent le maximum de points), les ajustements sont plus fantaisistes et ne sont pas compatibles avec le réglage du jeu envisagé (moins de 10% des candidats obtiennent le maximum de points). La montabilité est assurée par moins d'un candidat sur deux. Environ un candidat sur quatre propose une solution valable pour le réglage de la position axiale du pignon conique bien que celle-ci soit explicitement demandée. Par ailleurs, seulement un candidat sur dix est capable de proposer des solutions valides pour l'étanchéité statique et dynamique. L'encastrement entre la bride ébauchée et l'arbre d'entrée est correctement réalisée dans moins d'un tiers des copie, quelques candidats la relie malheureusement au carter. Le critère de minimisation de la masse, tant pour le carter que pour l'arbre a été très peu pris en compte dans les tracés.

Pour gagner du temps, quelques candidats ne représentent que la moitié de la solution, avec un symbole pour indiquer la symétrie du tracé. Or bien souvent, et c'était le cas ici, le bâti n'est pas symétrique ce qui fait que toutes les informations ne peuvent pas être représentées et évaluées. Nous incitons donc les candidats à éviter cette technique.

### **Zone 2 : liaison encastrement par emmanchement conique**

Cette partie a été globalement moins traitée que la précédente (85% des candidats). La solution par emmanchement conique semble méconnue (environ un candidat sur trois), avec parfois des conicités importantes voire carrément inversées donc non montables. Quelques candidats proposent d'autres types d'encastrement, parfois justes mais qui ne correspondent pas à ce qui était spécifiquement demandé. D'autres candidats, plus rarement, voyant le mot conique, représentent une liaison pivot à rouleaux coniques ou des pignons coniques... Le réglage de la position axiale ne pouvait se faire qu'en ajoutant un dispositif de réglage autre que le cône et a été bien traité par seulement un candidat sur dix, les autres ne proposant le plus souvent aucune solution ou des solutions fantaisistes. Par contre, presque un candidat sur deux propose une solution tenant compte de l'exigence de minimisation de la masse embarquée.

### **Zone 3 : liaison complète entre le pied de la pale et le faisceau**

Il s'agissait ici de s'inspirer fortement de la liaison entre le faisceau et l'axe rotor ; 88% des candidats traitent cette dernière question. Dans beaucoup de solutions proposées, l'assemblage boulonné ne permet pas de garantir un effort presseur entre le pied de la pale et le faisceau (un tiers de réponses correctes). Par ailleurs, les représentations des filetages et écrous sont parfois assez loin des normes et les contraintes imposées (pas de filetages dans le matériau composite) non respectées. Au final, un tiers des candidats obtiennent le maximum de point sur ces critères.

Pour résumer, quelques candidats proposent des solutions globalement satisfaisantes fonctionnellement, mais aussi du point de vue des formes des pièces. Pour la majorité, ils ont oublié qu'une conception est d'autant meilleure qu'elle est simple, et que cela va également dans le sens de la diminution des coûts.

### **CONSEILS AUX FUTURS CANDIDATS**

Regarder l'ensemble du sujet afin d'aller chercher les parties dans lesquelles ils se sentent le plus à l'aise.

Dans la partie « dessin d'étude de construction mécanique », privilégier les solutions qui soient les plus simples possibles. Penser à indiquer les jeux fonctionnels ainsi que les ajustements.

Ne pas appliquer systématiquement des solutions types (par exemple lorsqu'un encastrement par emmanchement conique est demandé, ne pas réaliser une solution par clavette+vis) mais prendre le temps d'analyser les spécificités du système étudié.

Connaître et maîtriser les connaissances de base : torseur de cohésion, formules de résistance de matériaux, application du PFS, du PFD, du théorème de l'énergie cinétique, écriture de tolérances au sens de la norme, désignation des matériaux, réalisation des liaisons élémentaires (encastrement, pivot, méthode pour la réalisation d'un montage de roulements)...

Effectuer les applications numériques en dépit de l'interdiction des calculatrices et prendre du recul sur les résultats numériques obtenus en se posant la question élémentaire : le résultat est-il plausible vis-à-vis du produit étudié ?

Développer leur culture technologique afin de proposer des solutions réalistes, par exemple en multipliant les activités d'analyse sur des systèmes réels.