

SESSION DE 2003

**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés**

section : mécanique

Epreuve de conception des systèmes

Durée : 8 heures

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

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits.

Ce sujet est la propriété du candidat et ne doit pas lui être repris, même partiellement, au cours de l'épreuve. Il fournit toutes les informations nécessaires au travail demandé.

Le candidat est invité à formuler toutes les hypothèses et à choisir les données qui lui seraient nécessaires et qui ne seraient pas fournies dans le sujet.

Composition du sujet :

Ce sujet est constitué de :

- cette feuille de présentation

- 12 pages d'énoncé numérotées de 2 à 13

- un dossier technique comprenant :
 - document 1 : fonctions de service et cahier des charges,
 - document 2 : diagrammes fonctionnels partiels,
 - document 3 : modélisation 3D partielle de la transmission de puissance principale,
 - document 4 : repère appareil et points caractéristiques de la transmission principale,
 - document 5 : spectre de puissance et chargements statiques limites,
 - document 6 : dessin d'ensemble de la boîte de transmission principale (BTP),
 - document 7 : dessin d'ensemble de la liaison sortie BTP/mât rotor,
 - document 8 : dessin d'ensemble de la platine de suspension pour la BTP,
 - document 9 : dessin d'ensemble de la liaison BTP / Groupe Transmission Moteur,
 - document 10 : modélisation 3D de la transmission roue libre,
 - document 11 : estimation du gonflement du moyeu roue libre,
 - document 12 : dessins de définition des composants (rouleau, moyeu) de la roue libre,
 - document 13 : modélisation 3D de l'ensemble BTA + rotor arrière type fenestron,
 - document 14 : dessin d'ensemble de la boîte de transmission arrière (BTA) et du rotor arrière,
 - document 15 : nomenclature relative au plan d'ensemble BTA-rotor arrière.

- un dossier rassemblant deux documents-réponses :
 - document DR01 : spécifications géométriques de l'arbre 8 de la roue libre,
 - document DR02 : étude constructive de la commande du système d'orientation des pales.

Après la distribution du sujet, le candidat dispose de 8 heures pour prendre connaissance du sujet et répondre aux questions des quatre parties.

Les auteurs du sujet recommandent au candidat de répartir le temps de travail de la façon suivante :

- Lecture du sujet et compréhension du système : 45 minutes
- Partie 1 (étude de la boîte de transmission principale) : 1 heure
- Partie 2 (étude de la suspension de l'ensemble {BTP + Moteur + Rotor principal}) : 2 heures
- Partie 3 (étude de la transmission « roue libre ») : 2 heures
- Partie 4 (étude de la boîte de transmission arrière et du rotor arrière) : 2 heures 15 minutes

Les parties 1, 2, 3 et 4 seront rédigées sur des copies séparées dans lesquelles on insérera les documents-réponses correspondants.

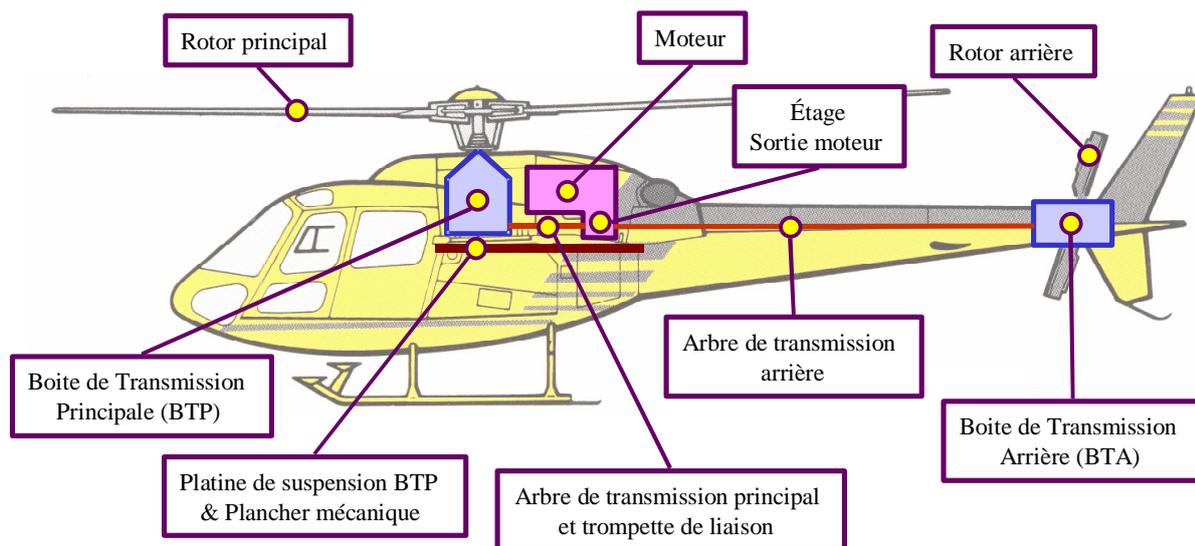
Transmission de puissance d'hélicoptère

0 – Introduction

0.1 - Préambule

La transmission de puissance, objet de l'étude proposée, est proche de celle d'un hélicoptère modèle Ecureuil développé par la société Eurocopter. Toutefois, pour des raisons de confidentialité ou de propriété industrielle, certains aspects ont été adaptés à partir de composants montés sur d'autres appareils, mais l'architecture générale de la transmission a été conservée.

0.2 Description générale et fonctionnement



La fonction principale de la transmission de puissance d'un hélicoptère est d'assurer le passage de la puissance du *moteur* (390 kW maxi) au *rotor principal*, au *rotor arrière* et aux divers *équipements* (pompes hydrauliques, compresseurs de climatisation, etc..).

Dans cette transmission de puissance deux composants principaux interviennent :

- la *Boîte de Transmission Principale (BTP)* située sous le rotor principal et proche du moteur, elle doit transmettre la puissance moteur au rotor principal et aux divers équipements,
- la *Boîte de Transmission Arrière (BTA)* située à l'extrémité de la queue de l'appareil, elle fournit la puissance moteur au rotor arrière.

La puissance du moteur est transmise à ces deux composants par l'intermédiaire de deux arbres de transmission :

- l'*arbre de transmission principal* entre le moteur et la BTP,
- l'*arbre de transmission arrière* entre le moteur et la BTA.

Ces deux arbres sont mécaniquement liés afin d'assurer une liaison cinématique permanente entre les deux rotors. Ils reçoivent la puissance du moteur par l'intermédiaire d'une transmission spécifique située à la sortie du moteur. Cette transmission comporte une *roue libre* afin d'autoriser l'auto rotation des rotors en cas de blocage moteur.

La BTP et le moteur 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 imposées par le rotor principal. La BTA est fixée directement au fuselage par des liaisons rigides.

0.3 – description des fournitures

Le dossier technique fourni comprend :

- les différents éléments d'analyse fonctionnelle,
- la description de l'architecture générale et des données utiles à l'étude,
- les différents plans, nomenclatures et modèles volumiques utiles à la lecture.

Compte tenu du nombre très important de composants, les différentes nomenclatures sont limitées aux ensembles fonctionnels ou aux parties utiles à l'étude.

Certains plans présentés dans le dossier technique ne sont pas à l'échelle, car leur dimension originale était totalement incompatible avec le format adopté pour le sujet.

0.4 – Etude proposée

Dans le cadre précédemment défini, ce sujet comporte quatre parties :

- étude de la boîte de transmission principale,
- étude de la suspension de l'ensemble { BTP + Moteur + Rotor principal },
- étude de la transmission « roue libre »,
- étude de la boîte de transmission arrière et du rotor arrière.

Première partie - Etude de la boîte de transmission principale :

L'objectif de cette partie est l'analyse de la chaîne cinématique permettant la mise en rotation du rotor principal de l'hélicoptère et l'étude géométrique et cinématique du train épicycloïdal utilisé dans la BTP (boîte de transmission principale) afin de déterminer le nombre de satellites à implanter.

Analyse cinématique :

Question 1 : A partir des documents 3, 6, 7, 9 et 10 fournis dans le dossier technique, établir le schéma cinématique des éléments suivants : étage Sortie moteur et BTP.

Etude géométrique du train épicycloïdal simple :

Afin d'optimiser l'encombrement radial du train épicycloïdal et de garantir pour la BTP une forme générale cylindrique, le constructeur préconise de maximiser le nombre de satellites.

Données :

Le train planétaire simple est défini par la couronne extérieure **0** (nombre de dents Z_0) liée au carter BTP, **n** satellites coplanaires (nombre de dents pour chaque satellite Z_2), le planétaire intérieur **1** (nombre de dents Z_1) et le porte-satellite **3**.

Question 2 : A partir d'une étude géométrique et en se plaçant dans le cas extrême où tous les satellites sont tangents les uns aux autres (roues supposées sans saillie), établir la relation littérale entre Z_1 , Z_0 et **n**.

Question 3 : Etablir la relation entre le rapport de transmission défini par $\dots = \check{S}_{1/0} / \check{S}_{3/0}$ et le nombre de satellites **n**. Tracer la « courbe » $\rho = f(n)$ et commenter en précisant les valeurs limites.

Question 4 : Préciser la tendance de l'évolution de cette courbe lorsque l'on gère la géométrie réelle des engrenages (saillies non nulles).

Etude géométrique et cinématique de la BTP :

Données :

L'architecture étant donnée, le constructeur veut équilibrer les rapports de réduction de l'engrenage spiro-conique et du train épicycloïdal de la BTP.

Le nombre de dents du pignon spiro-conique d'entrée de la BTP a été optimisé à 17.

Le constructeur impose le nombre de dents du pignon du planétaire intérieur de la BTP à 30.

Question 5 : A partir des données définies ci-dessus et des éléments du cahier des charges, déterminer le nombre de satellites utilisé pour cette transmission.

Question 6 : Déterminer le nombre de dents des différentes roues de l'engrenage spiro-conique et du train épicycloïdal. Commenter les différentes possibilités.

Question 7 : Pour la configuration choisie, déterminer la valeur de la vitesse de rotation du rotor principal par rapport au fuselage de l'hélicoptère. Conclure quant au respect du cahier des charges.

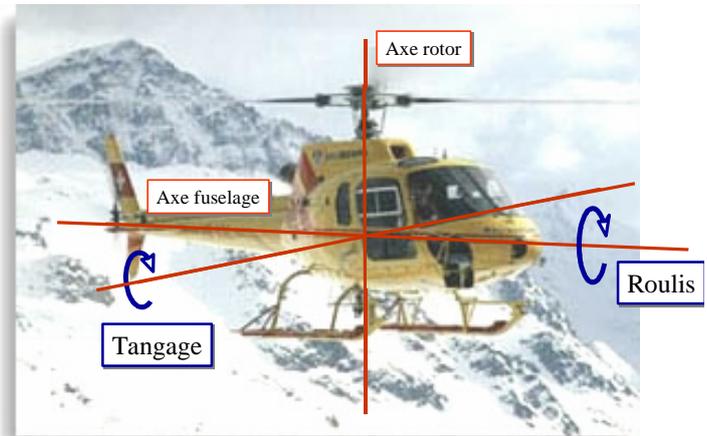
Deuxième partie – Etude de la suspension de l'ensemble { BTP + moteur + Rotor principal } :

La suspension de la boîte de transmission principale a pour but de filtrer les « vibrations rotor », afin de limiter au maximum leur transmission vers le fuselage.

Pour cela la BTP est soutenue par 4 barres articulées dont le point de concours détermine le centre d'une liaison rotule équivalente (point B sur le document 4). Une platine de suspension autorise le balancement de la BTP et reprend le couple moteur (voir documents 3 et 8).

L'amortissement est réalisé par quatre plots spécifiques dont les caractéristiques de raideur sont données dans la nomenclature associée au plan d'ensemble (document 8).

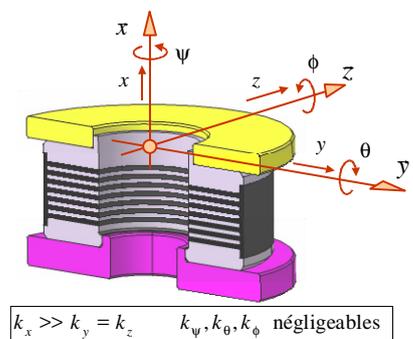
Les sollicitations rotor (harmoniques à la fréquence de défilement des pales) induisent des mouvements de roulis et de tangage de l'appareil. Le roulis se produit autour d'un axe parallèle à l'axe du fuselage et le tangage autour d'un axe perpendiculaire au plan médian de l'hélicoptère (axe fuselage, axe rotor). Ces mouvements sont de nature très similaire et peuvent être étudiés indépendamment à partir de modèles élémentaires de type masse ressort.



Etude du comportement individuel d'un plot :

Le schéma ci-contre précise les valeurs relatives des rigidités associées aux différents degrés de liberté autorisés par la liaison réalisée par un plot.

Question 8 : Préciser le mode de sollicitation pour lequel le plot amortisseur doit être considéré comme déformable.



Etude de l'architecture de la platine de suspension :

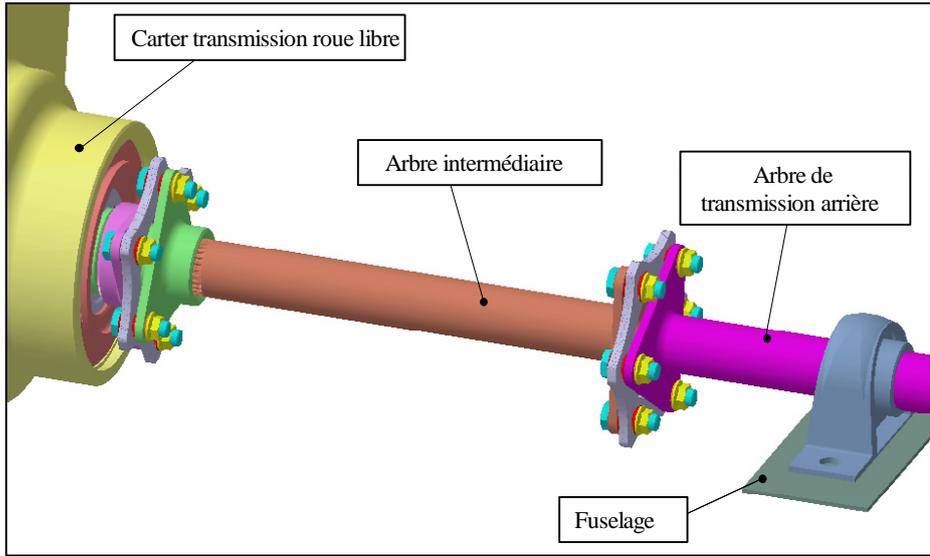
Question 9 : A partir des conclusions de la question précédente préciser les plots, de la platine de suspension, qui sont actifs lors d'un mouvement de roulis et d'un mouvement de tangage.

Question 10 : En considérant les éléments {BTP}, {Traverse de suspension} et {Fuselage} comme des solides rigides et en modélisant les liaisons élastiques par des ressorts dans la direction de déformation prépondérante, proposer un schéma technologique de la platine de suspension et justifier l'architecture choisie afin de satisfaire les conditions énoncées par le cahier des charges.

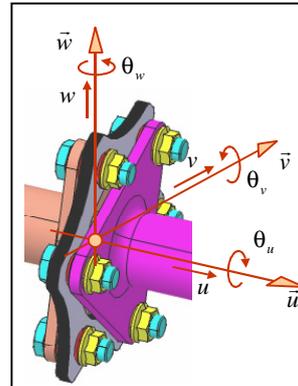
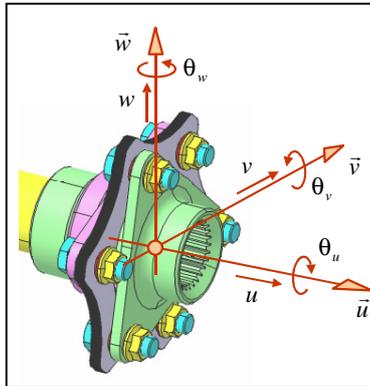
Question 11 : En négligeant les déplacements orthogonaux au plan médian de la platine, définir les rigidités équivalentes en roulis et en tangage au point de rotulage B de la BTP.

Etude de la liaison déformable entre l'étage de sortie moteur et l'arbre de transmission arrière :

La figure ci-dessous présente une représentation 3D simplifiée de la liaison entre l'étage de sortie moteur et l'arbre de transmission arrière. Cette liaison est réalisée par un arbre intermédiaire et deux flectors à lames inox.



Les deux schémas ci-dessous définissent les différents degrés de liberté autorisés par les liaisons flector entre l'arbre de roue libre et l'arbre intermédiaire d'une part et entre l'arbre intermédiaire et l'arbre de transmission arrière d'autre part.



Question 12 : Préciser, pour chaque liaison flector, les directions pour lesquelles la rigidité de la liaison peut être négligée et proposer une schématisation équivalente à chaque liaison à partir des liaisons normalisées.

Question 13 : Conclure quant à l'influence de la transmission arrière sur le comportement dynamique, en roulis et en tangage, de l'ensemble {BTP} + {Moteur}.

Etude de la liaison entre la trompette de liaison et le fuselage :

Question 14 : La trompette de liaison est liée au fuselage au point P par deux jeux de plots amortisseurs. Etablir un dessin à main levée de l'architecture de l'un de ces supports en utilisant des composants amortisseurs similaires à ceux de la platine BTP.

Etude spécifique des mouvements de tangage :

Question 15 : En considérant les ensembles {BTP + rotor}, {Moteur} et {Fuselage} comme des solides rigides et en modélisant les liaisons élastiques par des ressorts dans la direction de déformation prépondérante, proposer un schéma technologique plan permettant de définir les mouvements relatifs de ces trois ensembles.

Question 16 : Analyse des déplacements statiques maximaux.

En négligeant le poids des composants devant les efforts transmis, déterminer de manière quantitative l'orientation de la BTP et du moteur sous chargement statique maximal (document 5) et conclure quant au choix effectués par le constructeur pour satisfaire les conditions imposées par le cahier des charges.

Modification de l'architecture de la platine de suspension BTP :

Question 17 : Dans le double objectif de réduire l'encombrement et le nombre de composants, la platine de suspension peut être réalisée à l'aide d'un ensemble monobloc déformable. Etablir le dessin à main levée et en perspective d'un ensemble adapté au filtrage des vibrations dans une direction (roulis ou tangage).

Question 18 : Proposer un procédé d'obtention pour cet ensemble.

Troisième partie - Etude de la transmission « roue libre » :

La fonction principale de la roue libre est d'autoriser la rotation des rotors en cas de blocage moteur. En fonctionnement normal la totalité de la puissance du moteur transite donc par ce composant.

Analyse des sollicitations mécaniques :

Question 19 : Proposer un schéma technologique de la roue libre faisant apparaître les paramètres essentiels qui déterminent son comportement.

Question 20 : Déterminer les actions mécaniques appliquées sur un galet de la roue libre et associées à la transmission du couple maxi.

Respect du cahier des charges :

Question 21 : Indiquer le phénomène physique qui est à l'origine de l'accrochage de la roue libre et conclure quant à la nécessité d'imposer un angle de coincement maximal.

Question 22 : Caractériser l'influence du gonflement du moyeu sur le comportement de la roue libre et conclure quant au respect des performances exigées par le cahier des charges. Cette analyse sera effectuée en s'appuyant sur les résultats présentés dans le document 11 et le choix du modèle retenu pour caractériser le gonflement du moyeu sera soigneusement justifié.

Question 23 : Sachant que la pression de Hertz maximale au contact moyeu / galet est de 3150 Mpa et que la profondeur de cisaillement maximale est de 2,6 E-01 mm, conclure quant à la tenue des surfaces de contact et proposer, le cas échéant, les traitements thermiques (nature et profondeur) à appliquer pour garantir les performances exigées par le cahier des charges.

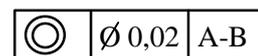
Spécifications géométriques :

La géométrie des différentes pièces constituant la roue libre a une importance considérable sur la qualité de son fonctionnement et le respect du cahier des charges.

Nous allons nous attacher à l'analyse et la mise en place de certaines des spécifications géométriques.

Dans la suite de cette partie, on supposera les pièces indéformables.

Question 24 : Donner un décodage de la spécification géométrique suivante :
portée sur le moyeu 2 de la roue libre (voir document 12).



Question 25 : En reproduisant rapidement sur votre copie les surfaces du moyeu roue libre 2 intervenant dans la spécification définie à la question précédente, proposer une autre écriture de spécifications géométriques qui prendrait en compte la totalité des deux surfaces nominalement cylindriques en contact avec les roulements 12 et 5 et qui limiterait leur position relative.

Afin de ne pas perturber le fonctionnement de la roue libre, le constructeur précise que le guidage de l'arbre roue libre 8 par rapport au moyeu roue libre 2 doit être flottant radialement, mais il impose une limite au jeu fonctionnel radial.

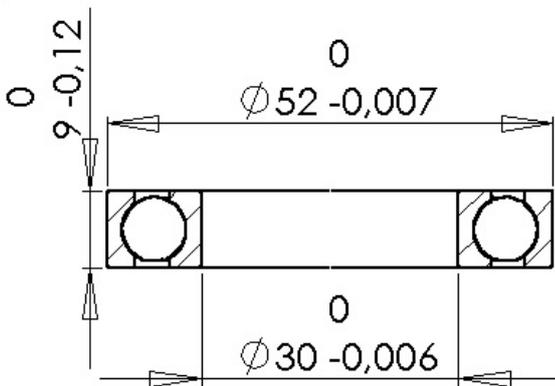
Pour cela il définit un axe théorique de l'arbre roue libre 8 par le bipoint O_2O_3 (voir figure 1) et précise que ce bipoint O_2O_3 ne doit pas sortir du cylindre de diamètre 0,1 mm et d'axe (O_1, \vec{x}) . Cet axe (O_1, \vec{x}) appartient au repère nominal associé au moyeu roue libre 2.

Question 26 : Préciser en quelques mots le risque pour la transmission de puissance de l'hélicoptère d'avoir un jeu fonctionnel radial trop important dans le guidage de l'arbre roue libre 8 par rapport au moyeu roue libre 2.

Données relatives aux roulements 5 et 12 :

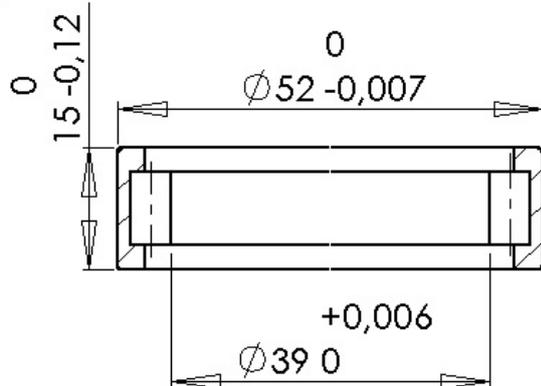
Roulement 5 :

Roulement à billes à gorges profondes



Roulement 12 :

Roulement à rouleaux cylindriques



Modèle utilisé :

Pour simplifier l'étude, on se limitera à l'étude dans le plan (O_1, \bar{x}, \bar{z}) , on néglige les défauts de forme et on ne tient pas compte de la position axiale de l'arbre.

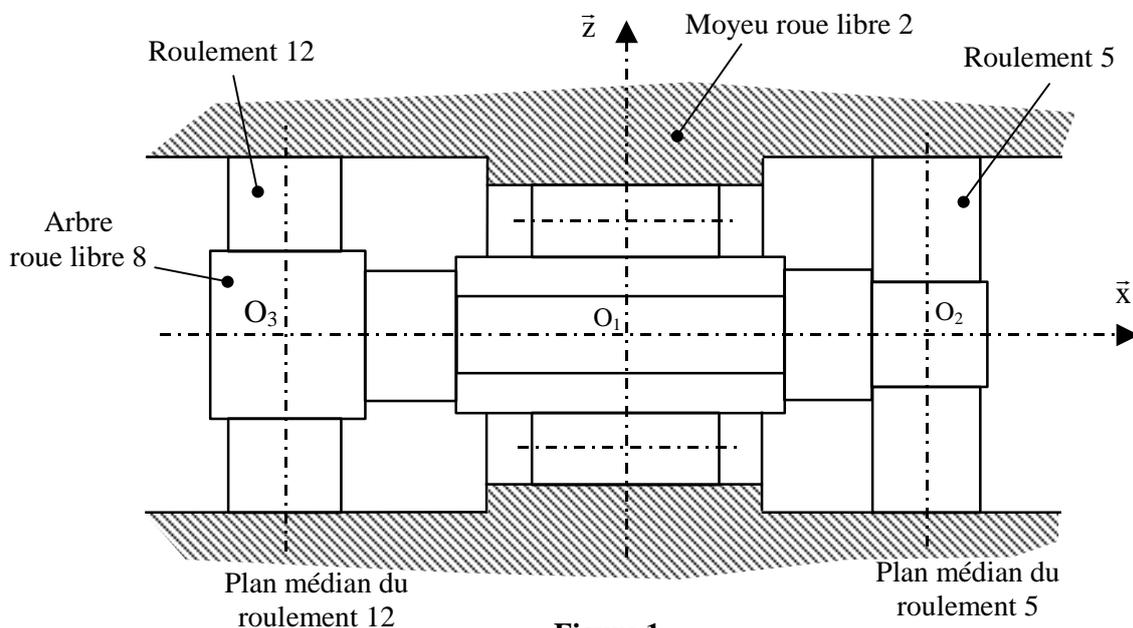


Figure 1

Question 27 : A partir du modèle défini ci-dessus, déterminer le jeu interne maxi (jeu radial défini dans le plan médian de chaque roulement) des deux roulements 12 et 5.

Question 28 : Sur le dessin de définition de l'arbre roue libre 8 donné sur le document réponse DR01 traduire qualitativement, par des spécifications géométriques respectant la norme ISO, les contraintes géométriques suivantes :

- maîtriser la position des différents pans les uns par rapport aux autres,
- limiter la position relative des portées cylindriques utilisées pour le guidage de l'arbre 8,
- garantir la position relative de l'ensemble des pans par rapport aux portées cylindriques utilisées pour le guidage de l'arbre roue libre,
- limiter les défauts de forme.

Quatrième partie - Etude de la boîte de transmission arrière et du rotor arrière :

La réponse en lacet de l'hélicoptère est obtenue par variation de l'incidence (angle de pas) des pales du rotor arrière. La mise en rotation de ce rotor est assurée par la boîte de transmission arrière (BTA).

Le rotor arrière utilisé sur l'hélicoptère Ecureuil est de type bipale et la commande d'angle de pas est réalisée par un mécanisme externe au fuselage utilisant un ensemble de tiges de commande.

Evolution :

Comme le montre les figures ci-dessous, la société Eurocopter développe une version de l'hélicoptère Ecureuil équipé d'un autre rotor arrière : le rotor de type fenestron.

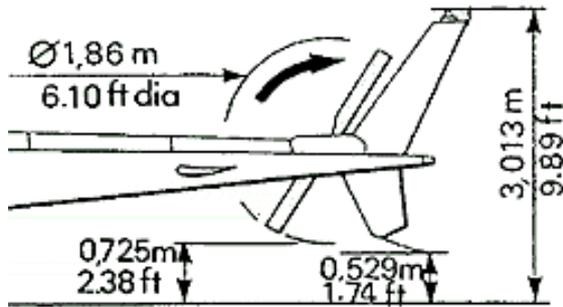


Figure 2 : rotor bipale

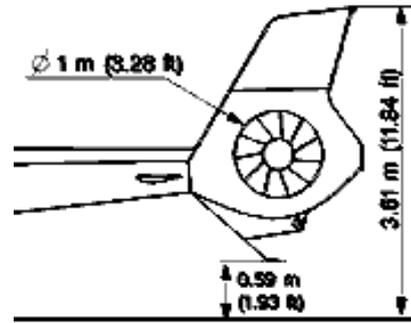


Figure 3 : rotor type fenestron

L'utilisation du rotor arrière de type fenestron permet :

- de diminuer la consommation de carburant en diminuant la traînée et d'utiliser au maximum les effets de la dérive,
- d'augmenter la sécurité au sol (rotor caréné),
- d'augmenter l'efficacité de la commande de lacet,
- d'obtenir un niveau de vibration et de bruit plus faible.

Attention :

Pour cet appareil, l'architecture de la transmission de puissance a également été modifiée et la vitesse de rotation de l'arbre de transmission arrière est égale à 4000 tr/min. C'est cette valeur qui sera utilisée dans la suite de l'étude. Le document 14 présente le plan d'ensemble de la BTA et du rotor arrière associés à cet appareil.

Données relatives au rotor arrière (extrait du cahier des charges du rotor arrière) :

L'angle de pas des pales doit varier de -25° à $+43^\circ$. Il est mesuré par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe de rotation du rotor.

Le document 14 représente le rotor dans la position où le faisceau déformable (repéré 61) n'est pas contraint, ce qui correspond à un angle de pas de $+9^\circ$. Cette position sera considérée comme la position de référence.

Le déplacement axial de l'axe de commande (repéré 30) par rapport à l'arbre de sortie (repéré 10) de la BTA permet de modifier simultanément l'angle de pas des 10 pales.

Le rotor arrière étant caréné, en fonctionnement le diamètre extérieur des pales ne doit pas augmenter de plus de 3%.

Analyse de l'ensemble BTA et rotor arrière type fenestron :

Question 29 : A partir du document 14, analyser les solutions constructives adoptées pour l'orientation des pales et réaliser un schéma cinématique en perspective de l'ensemble BTA-rotor arrière, faisant apparaître le système d'orientation des pales.

Question 30 : Déterminer les valeurs du déplacement axial de l'axe de commande (repéré 30) par rapport à la position de référence de manière à satisfaire les conditions imposées par le cahier des charges sur la plage de variation de l'angle de pas. A partir d'une analyse des différents déplacements relatifs, justifier la forme du plateau de commande (repéré 54) définie sur la vue de détail F du document 14.

Relation Produit – Procédé - Matériau :

Il existe deux versions (voir figures 4 et 5) du faisceau déformable (repéré 61). Ce faisceau qui intervient dans l'orientation des pales peut être monobloc (première version représentée sur la figure 4) ou en plusieurs pièces identiques (dernière évolution représentée sur le document 14 et sur la figure 5).

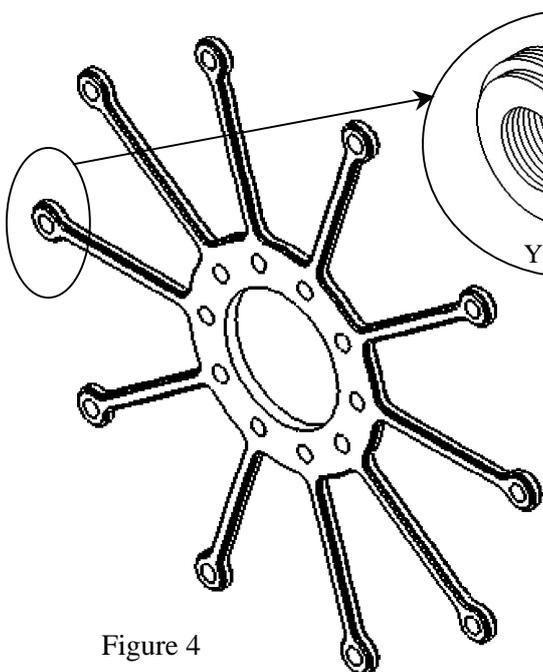


Figure 4

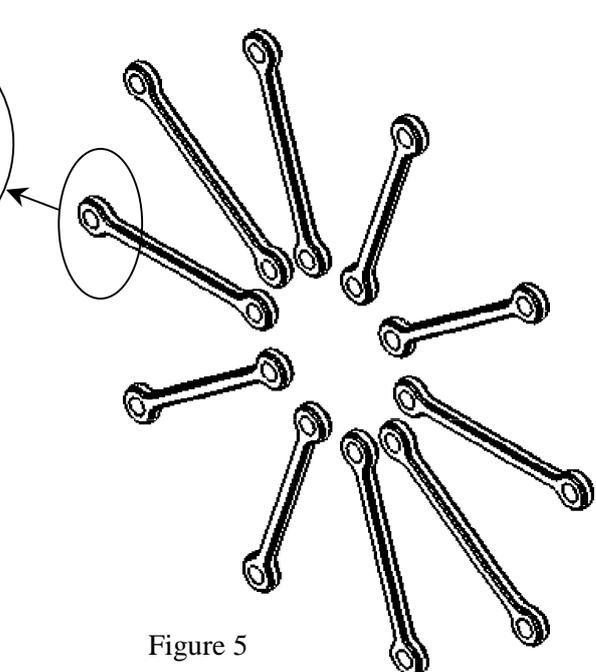
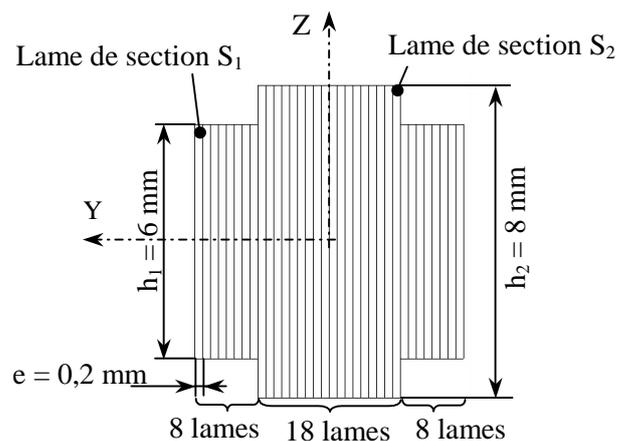


Figure 5

Pour les deux solutions le constructeur a utilisé un ensemble feuilleté dont la section est définie ci-contre. Il est constitué 34 lames de même épaisseur.

Constante de torsion de Saint-Venant pour la section S_1 (0,2 mm x 6 mm) : $J_1 = 1,57 \text{ E-}06 \text{ cm}^4$

Constante de torsion de Saint-Venant pour la section S_2 (0,2 mm x 8 mm) : $J_2 = 2,10 \text{ E-}06 \text{ cm}^4$



Question 31 : Après une analyse des sollicitations mécaniques du faisceau, justifier le choix du constructeur d'utiliser un faisceau feuilleté.

Question 32 : Proposer un matériau possible pour le faisceau et donner sa désignation. Pour chaque solution (figures 4 et 5) proposer un mode d'obtention ainsi que la gamme succincte de fabrication.

Question 33 : En prenant en compte tous les critères associés aux matériaux, aux procédés de mise en œuvre et à l'intégration du composant dans le mécanisme, effectuer une analyse comparative des deux solutions.

Question 34 : En tenant compte des différentes sollicitations mécaniques appliquées sur l'une des pièces du faisceau 61 (figure 5) proposer, à l'aide d'un dessin à main levée, la forme d'une pièce non feuilletée susceptible de la remplacer et justifier vos choix.

Avant projet de conception :

Pour ce type de rotor, les efforts nécessaires à la commande de l'orientation des pales sont très importants et ils nécessitent l'utilisation d'une servocommande.

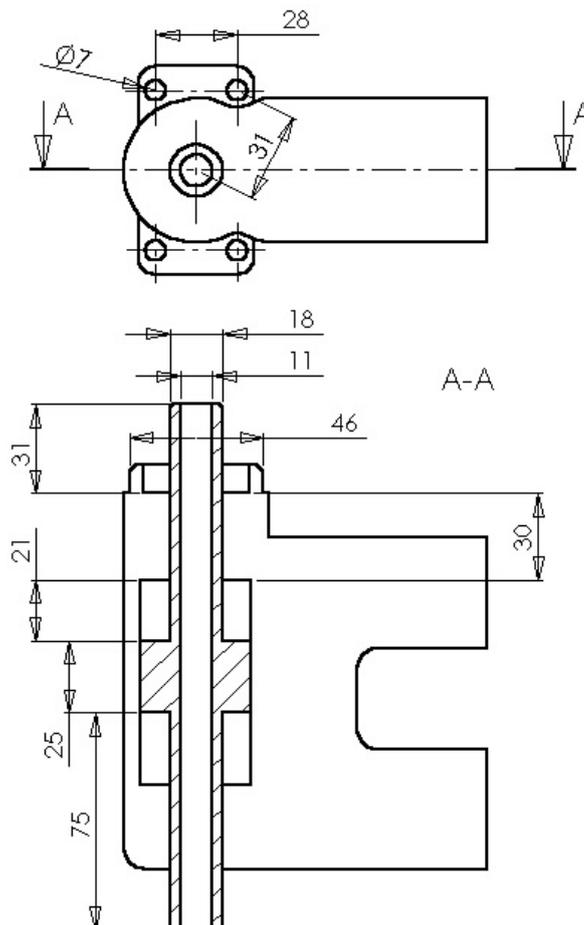
Afin de minimiser l'encombrement et de protéger la commande d'orientation des pales, la liaison entre l'axe de commande 30 et l'axe de la servocommande se fera à l'intérieur de l'arbre de sortie de la BTA.

Données : La servocommande utilisée permet une course de 40 mm et un effort axial maxi de 600 daN.
Le piston de la servocommande ne doit pas :

- supporter d'effort radial,
- avoir de mouvement de rotation par rapport au corps de la servocommande.

Le corps de la servocommande est fixé sur la pièce 3 de la BTA par 4 vis M6.

La figure ci-dessous représente de façon simplifiée la servocommande.



Question 35 : Après l'analyse des différentes contraintes associées à la commande du plateau 54 par l'intermédiaire de la servocommande, déterminer sous forme de graphes fonctionnels, schémas d'architecture et (ou) de schémas technologiques les différentes solutions que vous envisagez.

Question 36 : Sur le document DR02, établir le dessin d'ensemble à l'échelle 1 :1 de la solution que vous avez retenue. La position géométrique des différents composants correspondra à la position pour laquelle le faisceau déformable n'est pas contraint. Des vues ou coupes complémentaires, en plan ou perspective, doivent être utilisées si elles facilitent la compréhension. Les composants normalisés seront dessinés de façon aussi vraisemblable que possible.

Question 37 : Repérer les pièces et les sous-ensembles fonctionnels et décrire la structure du montage sous la forme d'un graphe d'assemblage hiérarchisé dans lequel on précisera les différentes contraintes d'assemblage.

Dossier technique

Ce dossier technique contient :

- document 1 : format A4
fonctions de service et cahier des charges
- document 2 : format A3
diagrammes fonctionnels partiels
- document 3 : format A4
modélisation 3D partielle de la transmission de puissance principale
- document 4 : format A4
repère appareil et points caractéristiques de la transmission principale
- document 5 : format A4
spectre de puissance et chargements statiques limites
- document 6 : format A3
dessin d'ensemble de la boîte de transmission principale (BTP)
- document 7 : format A4
dessin d'ensemble de la liaison sortie BTP/mât rotor
- document 8 : format A4
dessin d'ensemble de la platine de suspension pour la BTP
- document 9 : format A4
dessin d'ensemble de la liaison BTP / Groupe Transmission Moteur
- document 10 : format A4
modélisation 3D de la transmission roue libre
- document 11 : format A4
estimation du gonflement du moyeu roue libre
- document 12 : format A4
dessins de définition des composants (rouleau, moyeu) de la roue libre
- document 13 : format A4
modélisation 3D de l'ensemble BTA + rotor arrière type fenestron
- document 14 : format A2
dessin d'ensemble de la boîte de transmission arrière (BTA) et du rotor arrière
- document 15 : format A4
nomenclature relative au plan d'ensemble BTA-rotor arrière