

Epreuve de Sciences Industrielles B

Durée 06 h

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de calculatrices est interdit

035

Aucun document n'est autorisé

Composition du sujet :

- 1 cahier de 22 pages de texte numérotées de T1 à T22
- 1 cahier de 11 pages de documents ressources numérotés de D1 à D11
- 1 calque format A3 **à rendre à la fin de l'épreuve**
- 1 cahier réponse de 7 pages numérotées de R1 à R7 **à rendre à la fin de l'épreuve**

Gestion du temps :

En admettant une durée d'une demi-heure pour la lecture et l'assimilation du sujet, il est vivement conseillé de consacrer entre 2h30 et 3h00 au maximum à la réponse aux questions de la notice et 2h30 à 3h00 au tracé des dessins.

Il est demandé au candidat de formuler toutes les hypothèses qu'il jugera nécessaires pour répondre aux questions posées.

La présentation, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des raisonnements entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte.

L'ensemble des réponses sera rédigé sur les documents réponses dans les espaces libres proposés pour chaque question.

ETUDE DU ROTOR ARRIERE D'UN HELICOPTERE DAUPHIN



Figure 1 – Photo Eurocopter

A - Cahier des Charges Fonctionnel (Extraits)

A.1 - Présentation du problème

A.1.1 - Le contexte

Parmi les appareils que conçoit et commercialise le groupe Eurocopter, le Dauphin 365 est un des produits phares intervenant à la fois dans le domaine civil et militaire. Equipé de deux moteurs de type TURBOMECA ARRIEL 2C développant une puissance maximale de 717 kW chacun, cet appareil peut atteindre la vitesse maximale de 287 km/h et emporter jusqu'à 4300 kg de chargement, pour des missions très variées en conditions climatiques parfois sévères.

Le fonctionnement de l'appareil s'appuie sur un rotor principal quadri-pale et un rotor de queue caréné de type FENESTRON® présentant 10 pales. L'ensemble est alimenté par le bloc moteur par l'intermédiaire d'un étage sortie-moteur et d'arbres de transmission, qui transmettent la puissance à la boîte de transmission principale (BTP) et à la boîte de transmission arrière (BTA), comme indiqué sur la **Figure 2**.

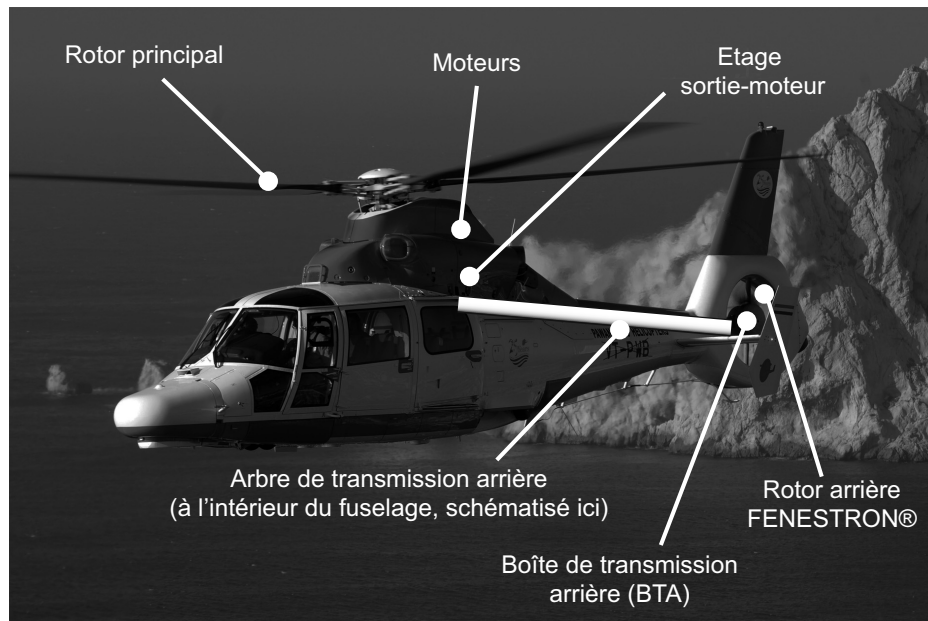


Figure 2 – Eléments de la transmission de puissance dans l'hélicoptère

A.1.2 - Le produit à concevoir

Le support de l'étude est constitué de la boîte de transmission arrière (BTA) et du rotor arrière. En vol stationnaire, la fonction du rotor arrière est de créer un effort latéral en bout de queue permettant de compenser le moment dû aux forces de traînée dans le rotor principal.

Pour simplifier l'explication, on ne s'intéresse qu'au cas d'un vol stationnaire de l'appareil, sans vent extérieur, représenté sur la Figure 3. Dans ce cas, la résultante de ces efforts de portance \vec{F}_{pi} sur les pales du rotor principal est une force de sustentation s'opposant au poids de l'appareil. Les forces de traînée \vec{F}_{ti} sont de résultante nulle, mais créent un moment autour de l'axe vertical de l'appareil. Afin d'éviter que ce moment n'entraîne l'appareil en rotation, le rotor de queue crée, du fait des forces de portance sur ses propres pales, un effort \vec{F}_{ra} contrant le moment du rotor principal.

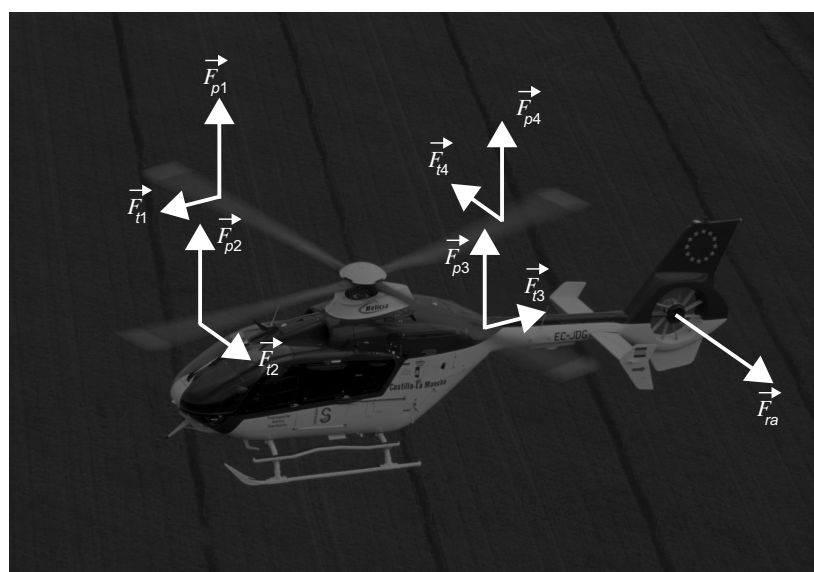


Figure 3 – Forces aérodynamiques sur le rotor principal et rôle du rotor de queue

L'allure de la répartition entre portance et traînée dépend principalement du « profil » de la section de la pale (voir la Figure 4).



Figure 4 - Profil d'aile symétrique (gauche) et non symétrique (droite)

En effet si l'on s'intéresse aux efforts aérodynamiques sur un profil de section de pale (voir la **Figure 5**), on peut les décomposer en une composante de portance $\vec{F}_{portance}$ et une composante de traînée $\vec{F}_{traînée}$, qui s'exercent au centre de poussée P de la section. Ces forces dépendent de la surface projetée de la section, de la masse volumique de l'air, de la vitesse de l'air, et des coefficients de portance et de traînée, lesquels varient fortement avec l'angle d'incidence α (voir la Figure 6). En adaptant l'angle de pas des pales – ou angle d'attaque – le pilote peut ainsi adapter la portance sur chacune des pales du rotor arrière, ce qui permet de faire varier l'effort \vec{F}_{ra} et ainsi de commander le mouvement de lacet de l'hélicoptère (rotation de l'hélicoptère autour de l'axe vertical).

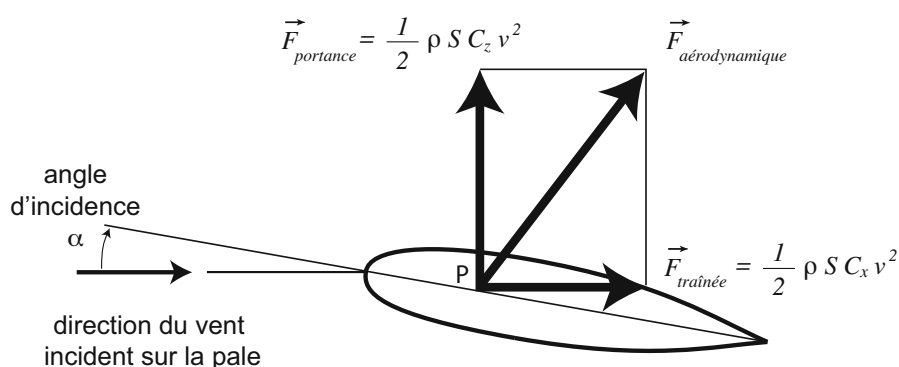


Figure 5 - Efforts aérodynamiques sur une section de pale

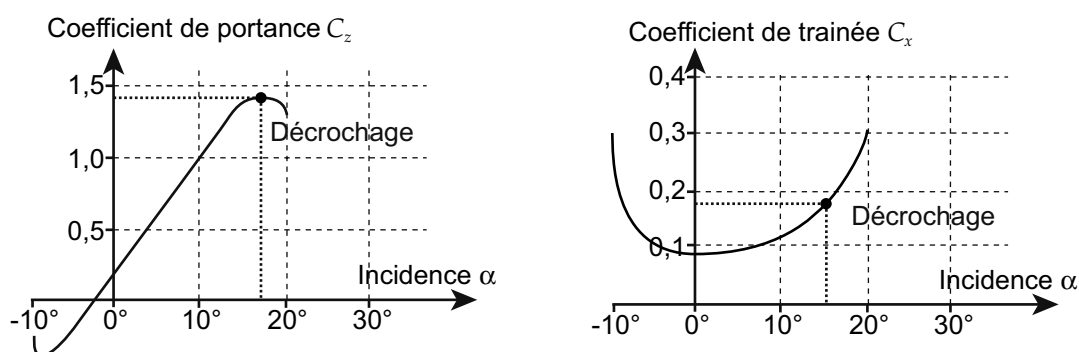


Figure 6 - Coefficients de portance et de traînée en fonction de l'angle d'incidence

Le fonctionnement de la commande proprement dite du rotor arrière est détaillé à la section B.2.

A.1.3 - Remarques

Pour des raisons de confidentialité et de simplicité des calculs, certaines données du présent sujet ont pu être modifiées ou empruntées à des systèmes comparables.

Pour des raisons pratiques, le **Tableau 2** page D 9/11 regroupe les notations et les valeurs numériques utilisées dans le présent sujet.

A.2 - Analyse fonctionnelle du besoin de la BTA (extraits)

L'analyse fonctionnelle présentée ici concerne la BTA seule.

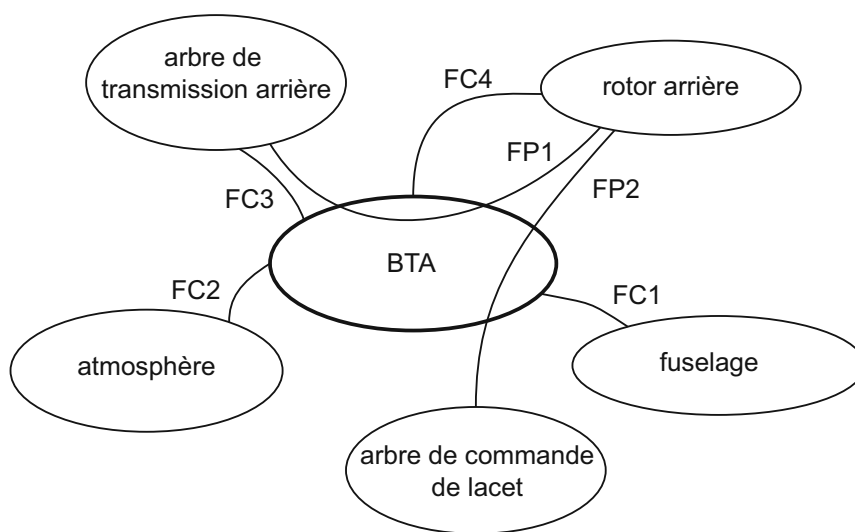


Figure 7 – Diagramme des interacteurs du système BTA

Enoncés des fonctions de service

Fonctions principales :

- FP1** Transmettre la puissance de l'arbre de transmission arrière au rotor arrière
- FP2** Permettre à l'arbre de commande de modifier l'angle de pas des pales

Fonctions contraintes :

- FC1** S'adapter au fuselage
- FC2** Résister aux conditions climatiques usuelles
- FC3** S'adapter à l'arbre de transmission arrière
- FC4** S'adapter au rotor arrière

Caractérisation des fonctions

	Critères	Niveaux	Flexibilité
FP1	Couple sur l'arbre de transmission arrière	20 N.m	Maximum
	Vitesse nominale de rotation de l'arbre de transmission arrière	4000 tr.min ⁻¹	
	Vitesse nominale de rotation du rotor arrière	3660 tr.min ⁻¹	
FP2	Angle de pas des pales	De -30° à +48°	Impératif
	Course de l'arbre de commande	40 mm	Maximum
	Effort maximum sur l'arbre de commande	600 daN	Maximum
	Transformation de la translation de l'arbre de commande en rotation des pales	Sans jeu	
FC1	Masse de l'ensemble	Minimale	
	Fixation au fuselage		
FC2	Résistance à la corrosion		
	Étanchéité avec le milieu extérieur		
FC3	Fixation entre l'arbre de transmission arrière et l'arbre d'entrée	Rigidité : Non fournie Désalignement admissible : Non fourni	
FC4	Efforts imposés par les pales	Non fourni	

B - Etude et éléments de solutions proposés

B.1 - Principe de fonctionnement de la BTA

Le principe de fonctionnement de la BTA est expliqué à l'aide du **plan 1** page D 11/11, de la nomenclature du **Tableau 3** page D 10/11 et du **Document 1** page D2/11.

La puissance apportée par l'arbre de transmission arrière est transmise à l'arbre d'entrée **7** par l'accouplement **16** (non représenté sur le **plan 1**). Un engrenage conique transmet cette puissance à l'arbre de sortie **5**, avec un nombre de dents $Z_7=32$ en entrée, et $Z_5=35$ en sortie. Compte tenu des puissances et des vitesses de rotation qui interviennent, l'arbre d'entrée et l'arbre de sortie sont guidés en rotation par rapport au carter **1** par des roulements. Les montages choisis sont constitués de roulements à rouleaux coniques montés « en O » pour l'arbre d'entrée (non représentés), et de l'association du roulement à rouleaux cylindriques **10** et du roulement à deux rangées de billes à contact oblique **12** pour l'arbre de sortie. L'arbre de sortie entraîne le rotor **21** par l'intermédiaire de la pièce de liaison **24**.

Afin de permettre la variation de l'inclinaison des pales, la BTA intègre également le guidage du levier de commande de pas **4**. La translation du levier est transmise à l'axe de commande de pas **6** et au plateau de commande **27**.

B.2 - Principe de fonctionnement du rotor arrière

Le principe de fonctionnement du rotor arrière est expliqué à l'aide du schéma cinématique du **Document 1** page D 2/11.

Le rotor transmet son mouvement de rotation autour de l'axe (M, \vec{y}_0) aux pales **20** par l'intermédiaire d'une liaison pivot glissant dont l'axe (O, \vec{x}_5) est également appelé *axe de pale*, ou *axe de pas*. Cette liaison permet également de modifier l'inclinaison des pales autour de l'axe (O, \vec{x}_5) afin de modifier l'angle de pas des pales – noté α .

Le levier de commande **4** est en liaison sphère-cylindre (linéaire annulaire) d'axe (M, \vec{y}_0) par rapport au bâti et en liaison pivot de même axe avec l'axe de commande **6**. Ce dernier, solidaire du plateau de commande **27** est en liaison pivot glissant d'axe (M, \vec{y}_0) par rapport à l'arbre de sortie **5**. Enfin **27** est également en liaison sphère-cylindre (linéaire annulaire) d'axe (D, \vec{x}_5) avec la pale **20**. Le centre de liaison D est disposé de manière excentrée par rapport à l'axe de pas ; on note e l'excentration correspondante (voir le **Document 1** page D 2/11). L'ensemble de la chaîne cinématique de commande permet ainsi de transformer la translation d'axe (M, \vec{y}_0) du levier de commande **4** en rotation de la pale **20** autour de son axe de pas (O, \vec{x}_5) .

Entre le rotor et les pales se trouve également un *faisceau déformable* **29** qui fait l'objet d'une partie de l'étude proposée.

C - Etude de conception en construction mécanique

C.1 - Présentation du travail à rendre

Comme indiqué plus haut en page T1/22, en admettant une durée d'une demi-heure pour la lecture et l'assimilation du sujet, il est vivement conseillé de consacrer entre 2h30 et 3h00 au maximum à la réponse aux questions de la notice et 2h30 à 3h00 au tracé des dessins.

Les réponses seront fournies uniquement sur les deux documents présentés ci-dessous.

1 – Notice justificative (50 % de la note globale)

Fournir les réponses sur **le cahier réponse**, de format A3 horizontal, plié, pré-imprimé recto verso.

Les réponses sur feuilles de copies additionnelles ou sur papier de brouillon ne seront pas acceptées.

2 – Dessin d'étude de construction mécanique (50 % de la note globale)

Il est à tracer sur **le calque pré-imprimé de format A3 horizontal**, joint au sujet, **et qui sera à rendre non plié**.

C.2 - Notice justificative

Consignes spécifiques

Sur le cahier réponse, les réponses seront fournies dans les limites des cadres prévus pour chaque question.

Compte tenu de l'interdiction d'utiliser toute calculatrice, les calculs seront réalisés de manière approchée.

Il sera tenu compte, dans la notation, de la clarté et de la concision des réponses. Les schémas doivent être lisibles, précis, et respecter la normalisation en vigueur.

Les écritures au crayon ne seront pas acceptées. La qualité de l'écriture, de l'orthographe et de la syntaxe sera prise en compte dans l'évaluation.

C.2.1 - Etude de la fonction « Permettre au levier de commande de contrôler l'angle de pas »

Objectif de l'étude

L'objectif de cette partie est de déterminer la course du levier de commande nécessaire pour que l'angle de pas de la pale couvre la plage précisée par le cahier des charges. La BTA est modélisée par le schéma cinématique présenté sur le **Document 1** page D 2/11. Les repères utilisés sont présentés sur le **Document 2** page D 3/11.

Hypothèses :

- Les liaisons sont sans jeu.
- Les pièces sont indéformables, à l'exception du faisceau **29**.

On note y la translation du levier de commande **6** permettant au pilote d'adapter l'angle de pas des pales. L'origine est choisie telle que $y = 0$ lorsque l'angle de pas des pales vaut $\alpha_0 = 9^\circ$. Cette configuration correspond à la position où le faisceau n'est pas sollicité par la rotation de la pale (configuration « au repos »).

L'analyse du schéma cinématique donné sur le **Document 1** page D 2/11 montre que la loi cinématique de commande peut être étudiée par une analyse plane dans le plan (\vec{y}_5, \vec{z}_5) , orthogonal à l'axe de la pale. Dans les questions **Q1** à **Q3** on considère le schéma cinématique donnée dans le cadre **R1** du document réponse, dans lequel, par souci de lisibilité, la rotation de l'arbre d'entrée est supposée nulle. L'arbre de sortie **5** et le rotor **21** sont donc considérés comme fixes par rapport au bâti dans le cadre des questions **Q1** à **Q3**.

Q1 Inscrire votre réponse dans le cadre **R1** de la notice **R 1/7**.

*Sur le schéma cinématique partiel en deux dimensions du cadre **R1** ne représentant que le rotor (**5+21**) , le plateau de commande (**6+27**), et la pale **20**, faire apparaître les points **D** et **O**, l'angle de pas α et l'angle de pas au repos α_0 , la dimension e et le paramètre de translation y .*

Q2 Inscrire votre réponse dans le cadre **R2** de la notice **R 1/7**.

En déduire la relation entre la translation de la commande y , l'angle de pas α et l'angle de pas au repos α_0 .

Q3 Inscrire votre réponse dans le cadre **R3** de la notice **R 1/7**.

Exprimer la course c du levier de commande en fonction de e , α_{\min} et α_{\max} .

En vous aidant du Document 3 page D 3/11, déterminer par l'application numérique la valeur de la course c du levier de commande nécessaire pour contrôler l'angle de pas sur la plage souhaitée par le cahier des charges.

Conclure sur la valeur de la course du levier de commande donnée dans le cahier des charges.

C.2.2 - Etude de la fonction « S'adapter au rotor arrière »

Objectif de l'étude

L'objectif de cette partie est de déterminer les actions mécaniques subies par les pales (C.2.2.1). Ces actions mécaniques vont permettre d'en déduire des critères de dimensionnement pour le faisceau (C.2.2.2 et C.2.2.3). Ces sous-parties sont indépendantes.

C.2.2.1 - Etude des efforts subis par les pales

L'étude est menée avec le schéma d'architecture présenté sur le **Document 4** page D 4/11. Un bilan des actions mécaniques montre que la pale **20** est soumise à :

- des efforts aérodynamiques qui sont modélisés par un glisseur s'exerçant au point P . La résultante se décompose en une composante de portance $F_{portance}$ selon \vec{y}_5 et une composante de traînée $F_{traînée}$ selon \vec{z}_5 . Le torseur résultant des actions aérodynamiques est noté $\{T_{aéro}\}$;
- des actions de liaisons en A et B dont les torseurs sont notés $\{T_A\}$ et $\{T_B\}$;
- l'action du faisceau **29**, modélisée par le torseur $\{T_{29 \rightarrow 20}\}$. Le faisceau est une pièce déformable, et peut *a priori* encaisser toutes les composantes d'actions mécaniques ;
- l'action du plateau de commande **27**, exercée en D , dont le torseur est noté $\{T_{27 \rightarrow 20}\}$.

Hypothèses :

- Les liaisons en A et B sont modélisées par deux liaisons sphère-cylindre (linéaires annulaires) parfaites.
- L'angle de pas α est indépendant du temps.
- La vitesse de rotation Ω du rotor est constante.
- Le poids des pièces est négligé devant les autres efforts.
- Le profil de la pale est symétrique.
- Les effets dynamiques sur la pale dus au mouvement de l'hélicoptère par rapport au sol sont négligeables devant ceux liés à la rotation du rotor par rapport à l'hélicoptère. En d'autres termes, on raisonne comme si l'hélicoptère restait en vol stationnaire par rapport au référentiel terrestre, le fuselage constituant ainsi le bâti lors de l'étude à mener.
- La force exercée par le plateau de commande **27** sur la pale **20** est supposée être un glisseur d'axe (D, \vec{y}_5) .

Q4 Inscrire votre réponse dans le cadre R4 de la notice R 1/7.

Commentez l'hypothèse sur les liaisons en A et B (premier alinéa des hypothèses) au regard de la solution technique apparaissant sur le Plan 1 page D 11/11.

Q5 Inscrire votre réponse dans le cadre R5 de la notice R 1/7.

Donner la forme de chacun des torseurs des actions mécaniques exercés sur la pale 20 dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5) : \{T_{aéro}\}, \{T_A\}, \{T_B\}, \{T_{29 \rightarrow 20}\}$ et $\{T_{27 \rightarrow 20}\}$.

Q6 Inscrire votre réponse dans le cadre R6 de la notice R 2/7.

Exprimer le torseur cinématique $\{V_{pale / bâti}\}$ en G et dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$ de la pale dans son mouvement par rapport au bâti.

Notations :

On note m_p la masse de la pale. On suppose que la matrice d'inertie de la pale écrite

au point G dans la base $(\vec{x}_{20}, \vec{y}_{20}, \vec{z}_{20})$ est donné par : $I_{pale}(G) = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix}_{(\vec{x}_{20}, \vec{y}_{20}, \vec{z}_{20})}$

Q7 Inscrire votre réponse dans le cadre R7 de la notice R 2/7.

Justifier la forme de l'opérateur d'inertie donnée ci-dessus.

Notations :

On note $\{C_{20/1}\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{p}_{20/1} \\ \vec{\sigma}_{20/1} \end{matrix} \right\}_G$ le torseur cinétique de la pale dans son mouvement par rapport au bâti, exprimé en G. Lorsque $\vec{\sigma}_{20/1}(G)$ est exprimé dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$, les composantes de ce moment sont notées $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$. On a ainsi $\vec{\sigma}_{20/1}(G) = \sigma_x \vec{x}_5 + \sigma_y \vec{y}_5 + \sigma_z \vec{z}_5$.

Q8 Inscrire votre réponse dans le cadre R8 de la notice R 2/7.

Donner l'expression de la résultante $\vec{p}_{20/1}$ du torseur cinétique de la pale dans son mouvement par rapport au bâti dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$.

Donner l'expression du moment en G du torseur cinétique $\vec{\sigma}_{20/1}(G)$ de la pale dans son mouvement par rapport au bâti dans la base $(\vec{x}_{20}, \vec{y}_{20}, \vec{z}_{20})$.

Exprimer le torseur cinétique de la pale dans son mouvement par rapport au bâti dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$ au point G.

Notations :

On note $\{D_{20/1}\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{d}_{20/1} \\ \vec{\delta}_{20/1} \end{matrix} \right\}_G$ le torseur dynamique de la pale dans son mouvement par rapport au bâti, exprimé en G .

Q9 Inscrire votre réponse dans le cadre R9 de la notice R 2/7.

Exprimer la résultante $\vec{d}_{20/1}$ du torseur dynamique de la pale dans son mouvement par rapport au bâti dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$.

On note $\vec{F}_C = -\vec{d}_{20/1}$ la force « équivalente » due à la résultante dynamique et exercée sur la pale et $F_C = \|\vec{F}_C\|$ sa norme. (Cette force est parfois appelée force centrifuge).

Q10 Inscrire votre réponse dans le cadre R10 de la notice R 2/7.

Application numérique : donner la valeur approchée de la force F_C .

Q11 Inscrire votre réponse dans le cadre R11 de la notice R 2/7.

Exprimer le moment $\vec{\delta}_{20/1}(G)$ du torseur dynamique en G et dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$ de la pale dans son mouvement par rapport au bâti.

Donner les conditions possibles pour que ce moment soit nul au point G .

Q12 Inscrire votre réponse dans le cadre R12 de la notice R 3/7.

Donner les trois équations obtenues en appliquant le théorème de la résultante dynamique à la pale projeté dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$.

On se place désormais dans les conditions exprimées à la question **Q11** : le moment dynamique de la pale est supposé nul en G .

Q13 Inscrire votre réponse dans le cadre R13 de la notice R 3/7.

Donner les trois équations obtenues en appliquant le théorème du moment dynamique au point G à la pale projeté dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$.

Q14 Inscrire votre réponse dans le cadre R14 de la notice R 3/7.

Compte tenu des équations obtenues aux questions Q12 et Q13, préciser parmi les composantes du torseur $\{T_{29 \rightarrow 20}\}$ celles qui sont essentielles au fonctionnement du rotor.

Q15 Inscrire votre réponse dans le cadre R15 de la notice R 3/7.

On applique les conditions trouvées à la question précédente : toutes les composantes non essentielles du torseur $\{T_{29 \rightarrow 20}\}$ sont supposées nulles. Dans ce cas, résoudre et exprimer les torseurs d'actions mécaniques dans la liaison A $\{T_A\}$ et la liaison B $\{T_B\}$ ainsi que dans la liaison avec le faisceau déformable $\{T_{29 \rightarrow 20}\}$ dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$ en fonction des efforts aérodynamiques et de l'effort de commande en D.

Q16 Inscrire votre réponse dans le cadre R16 de la notice R 3/7.

En supposant que le faisceau est une poutre cylindrique d'axe \vec{x}_1 , encastrée au rotor en C' et à la pale en C, déduire de la question Q14 le type de sollicitations prépondérantes subies par la poutre.

Dans la suite, on étudiera séparément deux types de sollicitations subies par le faisceau dans les parties C.2.2.2 et C.2.2.3.

C.2.2.2 - Résistance du faisceau aux efforts exercés par la pale

Dans cette partie, on s'intéresse au dimensionnement du faisceau vis à vis des efforts dus à la résultante dynamique de la pale uniquement. On adopte la modélisation présentée sur le **Document 5** page D 4/11.

Hypothèses :

- L'action mécanique exercée par la pale sur le faisceau est essentiellement due à la résultante dynamique vue par la pale. Son torseur s'écrit donc :

$$\{T_{20 \rightarrow 29}\} = \left\{ \begin{array}{c} F_c \vec{x}_5 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_C \text{ avec } F_c > 0.$$

- La masse du faisceau est négligée.
- Le faisceau **29** est étudié dans sa position « de repos », pour laquelle l'angle de pas α_0 est égal à 9° .
- Le faisceau **29** est modélisé par une poutre cylindrique de révolution de longueur L_f et de section circulaire S_f , de diamètre D_f . Une section de la poutre est repérée par l'abscisse x le long de \vec{x}_5 dont l'origine $x = 0$ est prise au point C'. Le moment quadratique polaire est notée I_f . La résistance élastique du matériau est notée R_e .

Q17 Inscrire votre réponse dans le cadre R17 de la notice R 4/7.

En supposant que tous les efforts extérieurs exercés sur la pale sont connus, préciser quel(s) théorème(s) peut(peuvent) être utilisé(s) pour déterminer les sollicitations exercées sur la poutre-faisceau.

On note $\{T_{coh1}(x)\}$ le torseur de cohésion dans la poutre à l'abscisse x .

Q18 Inscrire votre réponse dans le **cadre R18 de la notice R 4/7**.

Donner la forme (composantes non nulles) du torseur de cohésion $\{T_{coh1}(x)\}$ dans la poutre au point $H(x)$ dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$.

Quel(s) type(s) de sollicitation(s) subit la poutre ?

Q19 Inscrire votre réponse dans le **cadre R19 de la notice R 4/7**.

Déduire des questions précédentes l'expression théorique de la contrainte normale dans la poutre, notée σ , en fonction de F_C .

On adopte pour le critère suivant un coefficient de sécurité noté s .

Q20 Inscrire votre réponse dans le **cadre R20 de la notice R 4/7**.

Ecrire le critère de résistance élastique de la poutre en fonction de F_C en faisant intervenir la résistance élastique R_e et le coefficient de sécurité s .

Pour l'application numérique, on prendra les valeurs suivantes : $F_C = 13\,000\text{ N}$ et $s = 1,2$.

Q21 Inscrire votre réponse dans le **cadre R21 de la notice R 4/7**.

Application numérique. Calculez la résistance élastique nécessaire à la tenue du faisceau à l'effort F_C .

C.2.2.3 - Etude des sollicitations liées à la commande de pas des pales

Dans cette sous-étude, on ne s'intéresse qu'aux sollicitations créées du fait de la commande d'orientation des pales. La commande crée une rotation de la pale d'un angle α compris entre $\alpha_{\min} = -30^\circ$ et $\alpha_{\max} = +48^\circ$. On adopte la modélisation présentée sur le **Document 6** page D 5/11.

Hypothèses :

- Le faisceau **29** est modélisé par une poutre de section circulaire S_f , de diamètre D_f et de longueur L_f . La première extrémité $S_f(x=0)$ est fixée au rotor, et la seconde extrémité $S_f(x=L_f)$ est parfaitement solidaire de la pale. On note $\gamma(x)$ l'angle de torsion de la section $S_f(x)$ repéré par rapport à la position au repos $\alpha_0 = 9^\circ$. On a donc :

$$\gamma(x=0) = 0$$

et

$$\gamma(x=L_f) = \alpha - \alpha_0$$

- Le matériau constituant le faisceau **29** est assimilé à un matériau homogène isotrope dont le module de cisaillement équivalent est noté $G_{eq} = 70000\text{ MPa}$.

- La configuration de repos du faisceau **29** (faisceau non contraint) correspond à l'angle $\alpha_0 = 9^\circ$ pour lequel l'angle de torsion est nul en tout point de la poutre : $\gamma(x) = 0, \forall x$.

Q22 Inscrire votre réponse dans le **cadre R22 de la notice R 4/7**.

Donner l'expression du moment quadratique polaire I_f en fonction des dimensions du faisceau 29.

On note $\{T_{coh\ 2}(x)\}$ le torseur de cohésion dans la poutre à la distance x .

Q23 Inscrire votre réponse dans le **cadre R23 de la notice R 4/7**.

Donner la forme (composantes non nulles) du torseur de cohésion $\{T_{coh\ 2}(x)\}$ dans la poutre 29 au point $H(x)$ dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$.

Q24 Inscrire votre réponse dans le **cadre R24 de la notice R 5/7**.

Donner la relation entre le moment $\vec{M}(x)$ du torseur de cohésion dans le faisceau 29 et l'angle de rotation de la section $\gamma(x)$.

Q25 Inscrire votre réponse dans le **cadre R25 de la notice R 5/7**.

Donner l'expression du moment maximal M_{max} en fonction du module de cisaillement G_{eq} de la poutre 29, du moment quadratique polaire I_f , des dimensions du faisceau 29, des valeurs de l'angle de pas α_0, α_{min} et α_{max} .

Q26 Inscrire votre réponse dans le **cadre R26 de la notice R 5/7**.

En déduire l'expression de la contrainte de cisaillement maximale τ_{max} dans la poutre-faisceau 29.

Q27 Inscrire votre réponse dans le **cadre R27 de la notice R 5/7**.

Application numérique : calculer la contrainte de cisaillement maximale τ_{max} dans la poutre 29.

C.2.3 - Etude de la fonction « Transmettre la puissance du moteur au rotor arrière » et de la sous-fonction FP1.2 « Permettre la rotation des arbres ».

Objectif de l'étude

L'objectif de cette partie est de déterminer les actions mécaniques supportées par la liaison pivot entre le carter **1** et l'arbre d'entrée **7** de la BTA (C.2.3.1) (les références des pièces sont celles du **Document 1** page D 2/11). Ces actions mécaniques vont permettre de vérifier que la durée de vie des roulements qui

réalisent cette liaison est conforme au cahier des charges (C.2.3.2). Enfin, on s'intéressera plus particulièrement au couvercle **3** du carter, à sa cotation et à sa fabrication (C.2.3.3). Ces trois sous-parties sont indépendantes.

C.2.3.1 - Etude des efforts dans la liaison pivot

L'étude est menée à partir du schéma d'architecture présenté sur le **Document 7** page D 6/11. Le guidage en rotation de l'arbre **7** dans le boîtier **2**, réalisé par deux roulements à rouleaux coniques montés en « O », est modélisé par deux liaisons sphériques parfaites de centres respectifs E et F .

Un bilan des actions mécaniques montre que l'arbre d'entrée **7** de la BTA est soumis :

- au couple d'entrée de la BTA, $\vec{C}_{e \rightarrow 7} = C_e \cdot \vec{z}_0$,
- aux actions de liaisons en E et F ,
- à l'action mécanique de l'arbre de sortie **5** via le pignon conique à dentures droites. Cette action est modélisée par un glisseur noté \vec{F}_S appliqué au point S (voir **Document 8** page D 6/11) : $\vec{F}_S = F_T \cdot \vec{x}_0 - F_R \cdot \vec{y}_0 + F_A \cdot \vec{z}_0$

Hypothèses :

- Les frottements sont négligés : les liaisons rotules en E et F sont supposées parfaites et le glisseur \vec{F}_S est normal aux dentures du pignon. Ses composantes sont données au **Document 8** page D 6/11.
- L'arbre d'entrée est supposé indéformable.
- Le poids des pièces est négligé devant les autres efforts.
- L'arbre d'entrée tourne autour de l'axe \vec{z}_0 à vitesse constante.

Q28 Inscrire votre réponse dans le cadre R28 de la notice R 5/7.

*En isolant l'arbre d'entrée **7** de la BTA et en projetant le théorème du moment statique sur l'axe \vec{z}_0 , déduire la relation entre le couple d'entrée C_e , la composante F_T du glisseur \vec{F}_S et le rayon primitif R_p du pignon conique définis au Document 8 page D 6/11.*

Q29 Inscrire votre réponse dans le cadre R29 de la notice R 5/7.

A partir des données géométriques du Document 8 page D 6/11, écrire l'effort radial F_R , composante de \vec{F}_S suivant \vec{y}_0 , en fonction de l'effort tangentiel F_T et des angles ϕ et δ .

Q30 Inscrire votre réponse dans le cadre R30 de la notice R 6/7.

A partir des données géométriques du Document 8 page D 6/11, écrire l'effort axial F_A , composante de \vec{F}_S suivant \vec{z}_0 , en fonction de l'effort tangentiel F_T et des angles ϕ et δ .

Q31 Inscrire votre réponse dans le cadre R31 de la notice R 6/7.

Application numérique : calculer les valeurs algébriques maximales de F_T , F_R , F_A . On pourra s'aider du document 3 page D 3/11.

Pour traiter la suite, on suppose qu'une étude statique de l'arbre 7 a été menée dont on admettra les résultats. En particulier l'écriture de l'équilibre de l'arbre 7, soumis aux actions mécaniques dans les liaisons sphériques de centres respectifs E et F , au glisseur \vec{F}_S de 5 sur 7 appliqué au point S et au couple d'entrée de la BTA $\vec{C}_{e \rightarrow 7} = C_e \cdot \vec{z}_0$, a permis de déterminer une partie des inconnues de liaison en E et F . On a alors les résultats suivants :

- Torseur d'efforts dans la liaison sphérique en E (valeurs en Newton) :

$$\{F^E_{bati \rightarrow 7}\} = \begin{Bmatrix} -80 & 0 \\ -80 & 0 \\ -F_z^E & 0 \end{Bmatrix}_{(E, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)}$$

- Torseur d'efforts dans la liaison sphérique en F (valeurs en Newton) :

$$\{F^F_{bati \rightarrow 7}\} = \begin{Bmatrix} 480 & 0 \\ -20 & 0 \\ F_z^F & 0 \end{Bmatrix}_{(F, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)}$$

- Le montage étant hyperstatique, on ne peut déterminer complètement les composantes $F_z^E > 0$ et $F_z^F > 0$ qui vérifient cependant le théorème de la résultante statique en projection sur \vec{z}_0 : $-F_z^E + F_z^F - 100 = 0$.

Remarque : quelles que soient les valeurs obtenues en question **Q31** on prendra pour la suite les valeurs approchées, $F_A = -100N$, $F_R = -100N$ et $F_T = -400N$ qui sont aussi celles utilisées dans l'étude statique fournie ci-dessus.

C.2.3.2 - Calcul de durée de vie des roulements

On souhaite vérifier que les roulements à rouleaux coniques choisis sont compatibles en termes de durée de vie avec le cahier des charges. Leurs caractéristiques respectives sont données par le constructeur dans le **Tableau 1** page D 8/11.

On appelle dans la suite « roulement E », le roulement qui a été modélisé dans la partie précédente par une rotule de centre E et « roulement F », le roulement qui a été modélisé dans la partie précédente par une rotule de centre F .

Hypothèses :

- Les roulements seront supposés fonctionner sans précharge.

Q32 Incrire votre réponse dans le cadre R32 de la notice R 6/7.

Pour le roulement E, calculez numériquement en suivant la démarche constructeur donnée au Document 9 page D 7/11 les efforts radial F_R^E et axial F_z^E . En déduire la charge équivalente P^E sur le roulement E.

Q33 Incrire votre réponse dans le cadre R33 de la notice R 6/7.

En déduire l'expression de la durée de vie du roulement E en millions de tours.

Faites l'application numérique approchée en années en supposant un fonctionnement de 12 heures par jour et commenter.

Q34 Incrire votre réponse dans le cadre R34 de la notice R 6/7.

Quelle serait l'influence d'une précharge axiale du montage de roulements sur la durée de vie des roulements ?

C.2.3.3 - Etude de la cotation et de la fabrication du couvercle 3

Les études précédentes, combinées à d'autres calculs par modèles éléments finis ont permis de conclure que la contrainte équivalente maximale qui s'exerce sur le couvercle 3 de la BTA est de près de 80 MPa.

Q35 Incrire votre réponse dans le cadre R35 de la notice R 6/7.

Après avoir rappelé la signification de la désignation normalisée EN AC-AISI12, conclure sur la possibilité d'utiliser ce matériau.

Proposer un autre matériau, et préciser la signification de la désignation normalisée employée.

Le couvercle 3 étant produit en petites séries et le prix matière de l'alliage employé étant élevé, la pièce brute est d'abord obtenue par moulage au sable qui est ensuite reprise en usinage.

Q36 Incrire votre réponse dans le cadre R36 de la notice R 7/7.

Sur le dessin de définition du couvercle 3 du cadre R36, ajouter les surépaisseurs nécessaires pour l'obtention du brut par moulage au sable. On placera également le plan de joint en traits pointillés.

Parmi les contraintes géométriques dues à la liaison encastrement avec le carter 1 qui doivent être maîtrisées, il faut entre autres imposer :

- une contrainte de planéité de la surface en appui plan avec le carter 1,
- une contrainte de perpendicularité du cylindre réalisant le centrage par rapport à la surface en appui plan avec le carter 1.

Q37 Inscrire votre réponse dans le cadre R37 de la notice R 8/8.

Compléter le dessin de définition partiel du couvercle 3 du cadre R37 en faisant apparaître ces deux tolérances géométriques. Il ne s'agit pas ici de quantifier l'étendue de la zone de tolérance ; elle sera notée « t ».

C.3 - Dessin d'étude de construction mécanique

C.3.1 - Présentation du support de travail

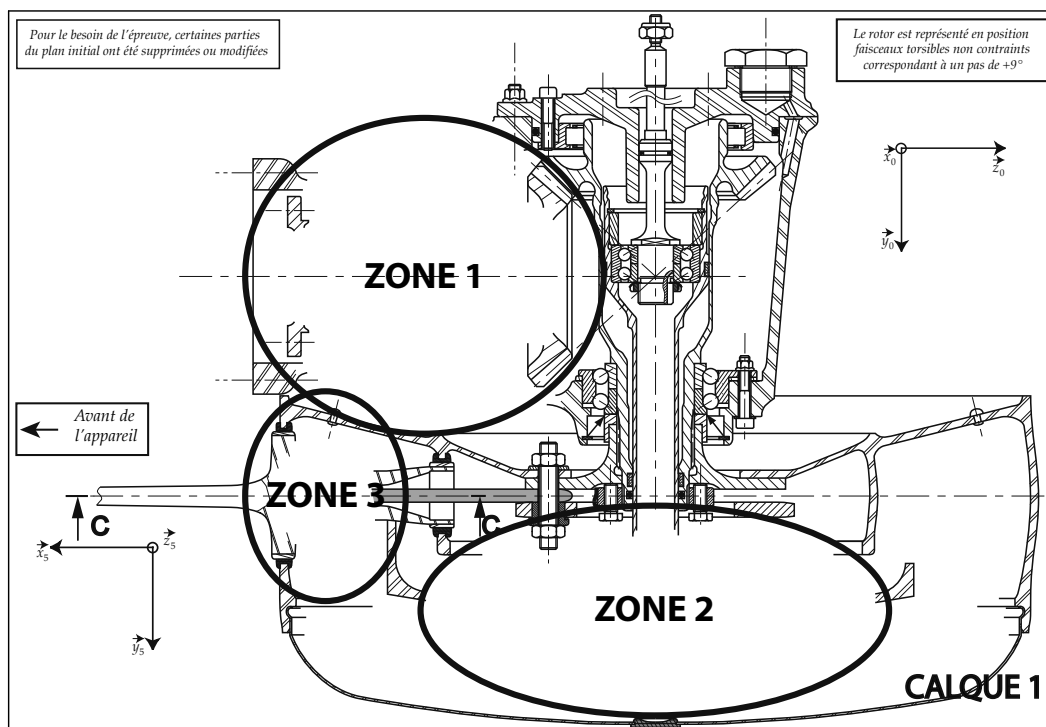
Consignes spécifiques

Pour cette partie de l'étude, il est demandé de compléter le **calque 1** fourni avec le sujet.

La **zone 1** du **calque 1** est destinée à la conception du guidage en rotation de l'arbre d'entrée 7 de la BTA par rapport au carter 1 (C.3.3) Echelle 3:4.

La **zone 2** du **calque 1** est destinée à la conception de l'encastrement entre l'axe de commande 6 et le plateau de commande de pas 27 (C.3.4) Echelle 3:4.

La **zone 3** du **calque 1** est destinée à la conception de la liaison entre le pied de la pale 20 et le faisceau 29 (C.3.5) Echelle 3:4.



C.3.2 - Consignes spécifiques aux travaux graphiques

Les dessins sont à exécuter aux instruments, avec pour l'essentiel mise au net au crayon respectant les épaisseurs de traits normalisées et les exigences d'une bonne lisibilité ; seuls les axes et les écritures seront tracés à l'encre noire. Les tracés de couleur ne sont pas admis. Les normes AFNOR seront respectées.

Les principales conditions fonctionnelles relatives aux liaisons représentées seront clairement indiquées en respectant les règles normalisées AFNOR.

Les éléments normalisés dessinés par le candidat autres que ceux fournis dans le sujet, seront dessinés approximativement en respectant au mieux leurs proportions.

C.3.3 - Conception du guidage en rotation de l'arbre d'entrée

Il s'agit ici de concevoir le guidage en rotation de l'arbre d'entrée **7** de la BTA par rapport au bâti **1**. On envisage une solution de type guidage par roulements à rouleaux coniques montés en « O ». Les caractéristiques des roulements sont celles rappelées au **Tableau 1** page D 8/11. En particulier le **Document 10** page D 8/11 donne une représentation de ces roulements à l'échelle du **calque 1** (3:4).

Données :

Toutes les pièces ou parties de pièces déjà représentées ne doivent pas être modifiées. L'accouplement avec l'arbre d'entraînement en amont de l'arbre d'entrée **7** ne sera pas traité.

Position de représentation :

Le mécanisme sera dessiné dans la position suivante : vue en coupe de la BTA passant par le plan contenant les axes des deux pignons coniques **7** et **5** définie **zone 1** du **calque 1**.

Q38 *Inscrire votre réponse dans la zone 1 du calque 1 de format A3.*

Dessiner aux instruments, sur la vue prédéfinie, vos propositions de solutions pour répondre aux spécifications demandées par le constructeur :

- **Guidage en rotation de l'arbre d'entrée 7 par rapport au bâti 1 à l'aide des deux roulements dont les caractéristiques sont données dans le tableau 1 page D 8/11.**
- **Réglage (au montage) de la position axiale du pignon conique : pour cela le carter sera réalisé en deux parties encastrées l'une à l'autre.**
- **Lubrification des éléments roulants et étanchéité vis-à-vis du milieu extérieur.**
- **Réduction de la masse embarquée.**

C.3.4 - Conception de l'encastrement entre l'axe de commande 6 et le plateau de commande de pas 27

Il s'agit ici de concevoir la liaison encastrement entre l'axe de commande 6 et le plateau de commande de pas 27. Compte tenu des efforts transmis, une étude préalable a permis de retenir le principe d'une solution par emmanchement conique.

Données :

Toutes les pièces ou parties de pièces déjà représentées ne doivent pas être modifiées. Le plateau de commande est moulé en alliage d'aluminium, l'axe de commande est en acier.

Position de représentation :

Le mécanisme sera dessiné dans la position suivante : vue en coupe du rotor de queue dans le plan horizontal de l'hélicoptère définie **zone 2** du **calque 1**.

Q39 *Inscrire votre réponse dans la zone 2 du calque 1 de format A3.*

Dessiner aux instruments, sur la vue prédéfinie, vos propositions de solutions pour répondre aux spécifications demandées par le constructeur:

- Solution par emmanchement conique pour transmettre les efforts entre l'axe de commande 6 et le plateau de commande 27.***
- Possibilité de réglage (au montage) de la position axiale du plateau de commande 27 par rapport à l'axe de commande 6.***
- Réduction de la masse embarquée.***

C.3.5 - Conception de la liaison entre le pied de la pale 20 et le faisceau 29

Il s'agit ici de concevoir la liaison entre le pied de la pale 20 et le faisceau flexible 29. Compte tenu des matériaux de la pale et du faisceau (composite), ceux-ci ne peuvent pas être filetés. Seuls des perçages peuvent être réalisés. Le principe retenu pour la liaison est celui d'un entraînement par adhérence, assuré par boulons, à l'image de celui proposé pour la liaison entre le faisceau et l'axe rotor.

Données :

Toutes les pièces ou parties de pièces déjà représentées ne doivent pas être modifiées. Le faisceau et la pale sont en matériau composite stratifié.

Positions de représentation :

Le mécanisme sera dessiné dans les positions suivantes : vue en coupe du rotor arrière dans le plan horizontal de l'hélicoptère définie **zone 3** du **calque 1**.

Q40 *Inscrire votre réponse dans la zones 3 du calque 1 de format A3.*

Dessiner aux instruments, sur les deux vues prédéfinies, vos propositions de solutions pour répondre aux spécifications demandées par le constructeur :

- Liaison entre le pied de la pale et le faisceau***
- Réduction de la masse embarquée.***

