

Epreuve de Sciences Industrielles B

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.

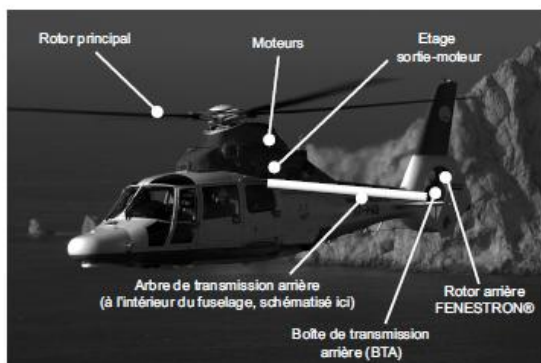


Figure 2 – Eléments de la transmission de puissance dans l'hélicoptère

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}_d 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.

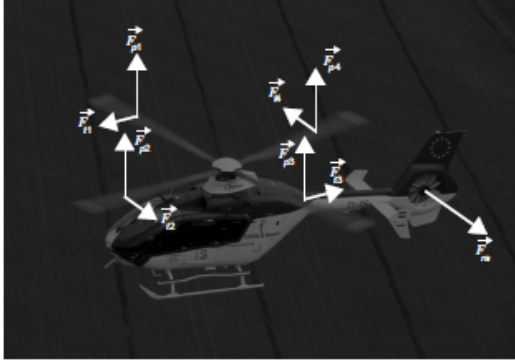


Figure 3 – Forces aérodynamiques sur le rotor principal et rôle du rotor de queue

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).

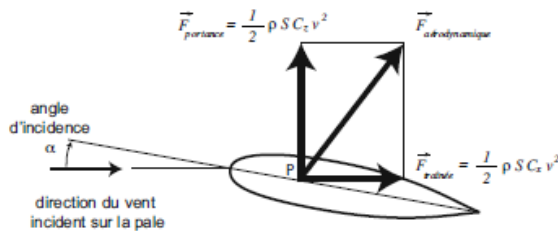


Figure 5 - Efforts aérodynamiques sur une section de pale

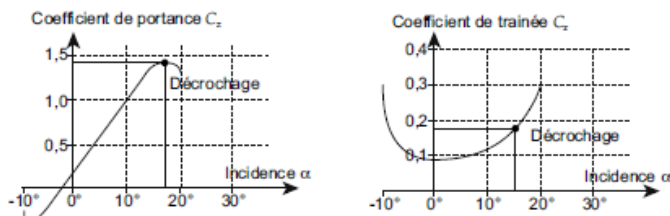


Figure 6 - Coefficients de portance et de traînée en fonction de l'angle d'incidence

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

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}_2) 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}_2) 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}_2) avec la pale 20. Le centre de liaison D est disposé de manière excentrée par rapport à l'axe de pas ; on note c 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}_2) .

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

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 :

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

- 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 Inscrivez 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, précisez quel(s) théorème(s) peut(peuvent) être utilisé(s) pour déterminer les sollicitations exercées sur la poutre-faisceau.

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

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

Donner la forme (composantes non nulles) du torseur de cohésion $\left\{ T_{coh}(x) \right\}$ 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 Inscrivez 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 Inscrivez votre réponse dans le cadre R20 de la notice R 4/7.

Écrire 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 Inscrivez 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 - Étude 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 :

$$\gamma(x = 0) = 0 \quad \text{et} \quad \gamma(x = L_f) = \alpha - \alpha_0$$

- 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 Inscire votre réponse dans le cadre R22 de la notice R 4/7.

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

On note $\{T_{coh2}(x)\}$ le torseur de cohésion dans la poutre à la distance x .

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

Donner la forme (composantes non nulles) du torseur de cohésion $\{T_{coh2}(x)\}$ dans la poutre 29 au point $H(x)$ dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$.

Q24 Inscire 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 Inscire votre réponse dans le cadre R25 de la notice R 5/7.

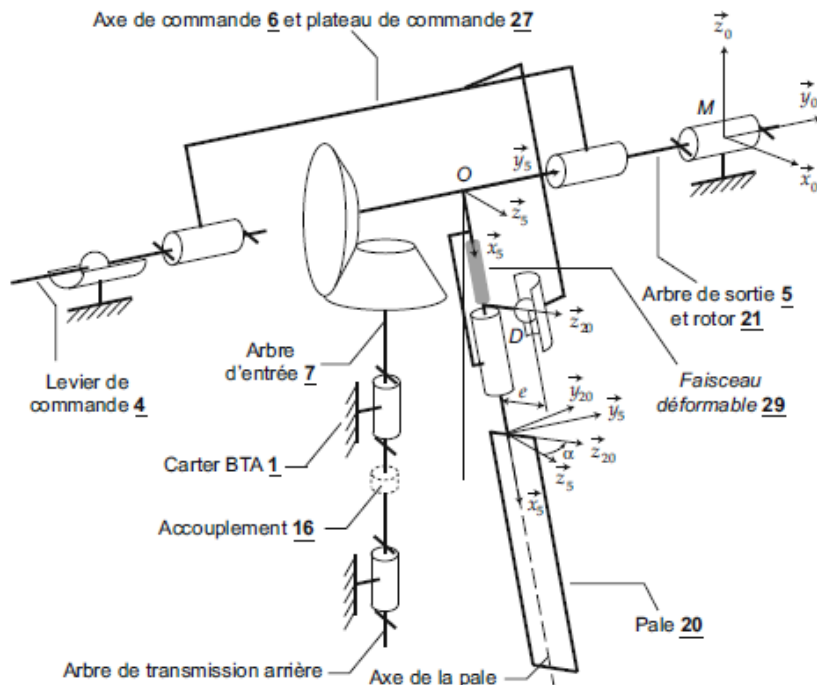
Donner l'expression du moment maximal M_{max} en fonction du module de cisaillement G_{eq} de la poutre 29, du moment quadratique polaire I_p , des dimensions du faisceau 29, des valeurs de l'angle de pas α_0, α_{min} et α_{max} .

Q26 Inscire 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.

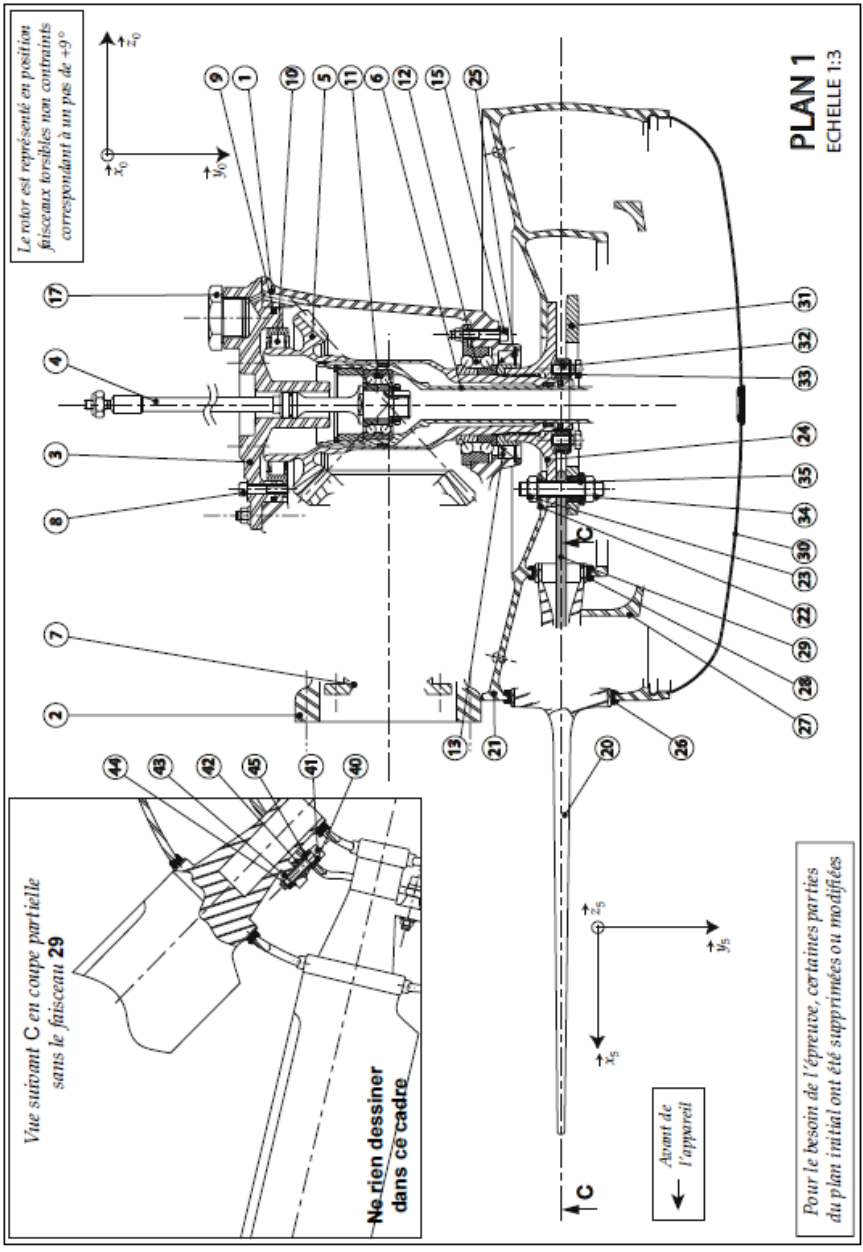
Q27 Inscire votre réponse dans le cadre R27 de la notice R 5/7.

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

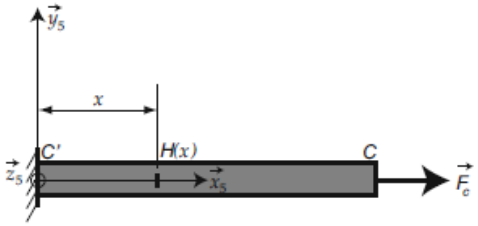


Ce schéma cinématique comprend une pièce déformable, le faisceau 29, et présente les bases associées aux pièces. La base $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ est liée au fuselage-bâti, la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$ est liée à l'axe rotor, la base $(\vec{x}_{20}, \vec{y}_{20}, \vec{z}_{20})$ est liée à la pale.

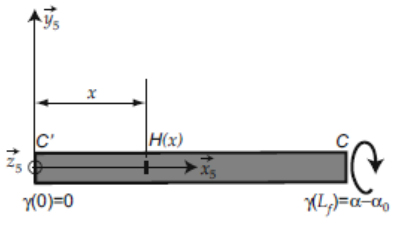
Document 1 – Modélisation simplifiée de la BTA.



D 11/11



Document 5 – Modélisation de la transmission des efforts de la pale sur le faisceau.



Document 6 – Modélisation de la torsion du faisceau 29 générée par la commande de pas.