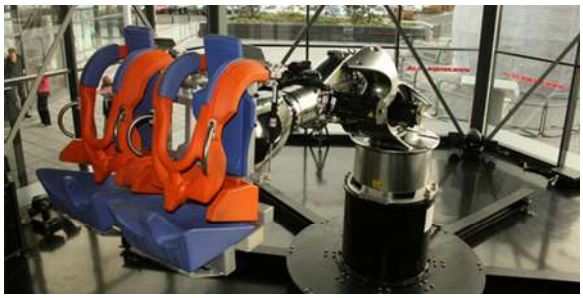
Etude des performances cinématiques du Robocoaster

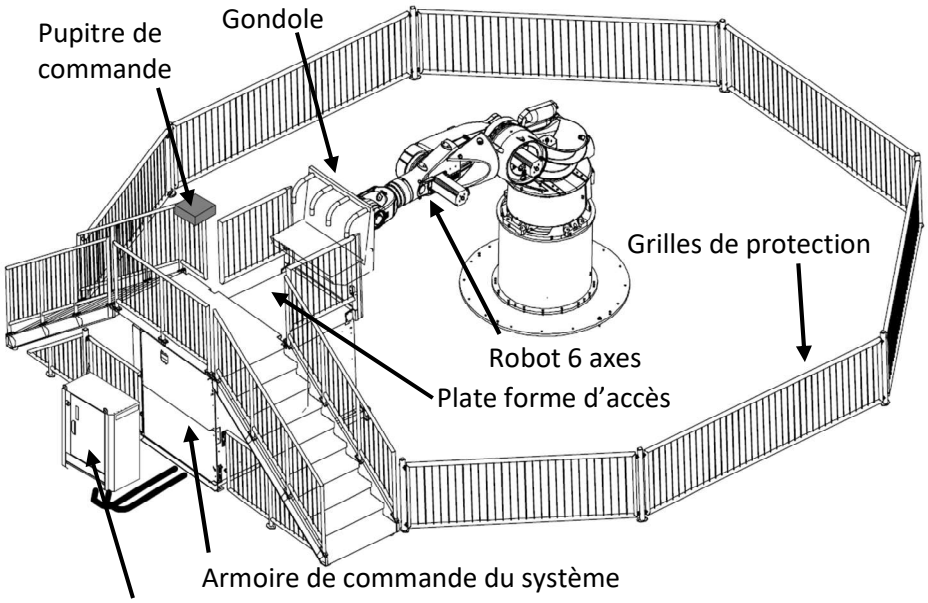
(D'après concours ICNA)

On s'intéresse au Robocoaster conçu par la société KUKA. Le système, utilisé notamment au Futuroscope de Poitier, est une attraction qui permet de procurer des sensations fortes aux passagers embarqués dans une gondole. La gondole est mise en mouvement par l'intermédiaire d'un bras de robot détourné de l'industrie automobile qui suit des lois de mouvement préprogrammées.



Le système est principalement constitué d'un robot 6 axes, d'une armoire de gestion permettant le pilotage du robot, d'une plate forme d'accès mobile permettant l'embarquement ou le débarquement des passagers, d'une grille de protection accompagnée de nombreux dispositifs de sécurité et d'une armoire de commande générale de l'installation.

Par ailleurs le système nécessite la présence d'un opérateur sur la plate forme d'accès pour assurer le bon déroulement des opérations d'embarquement ainsi que la mise en route du système.

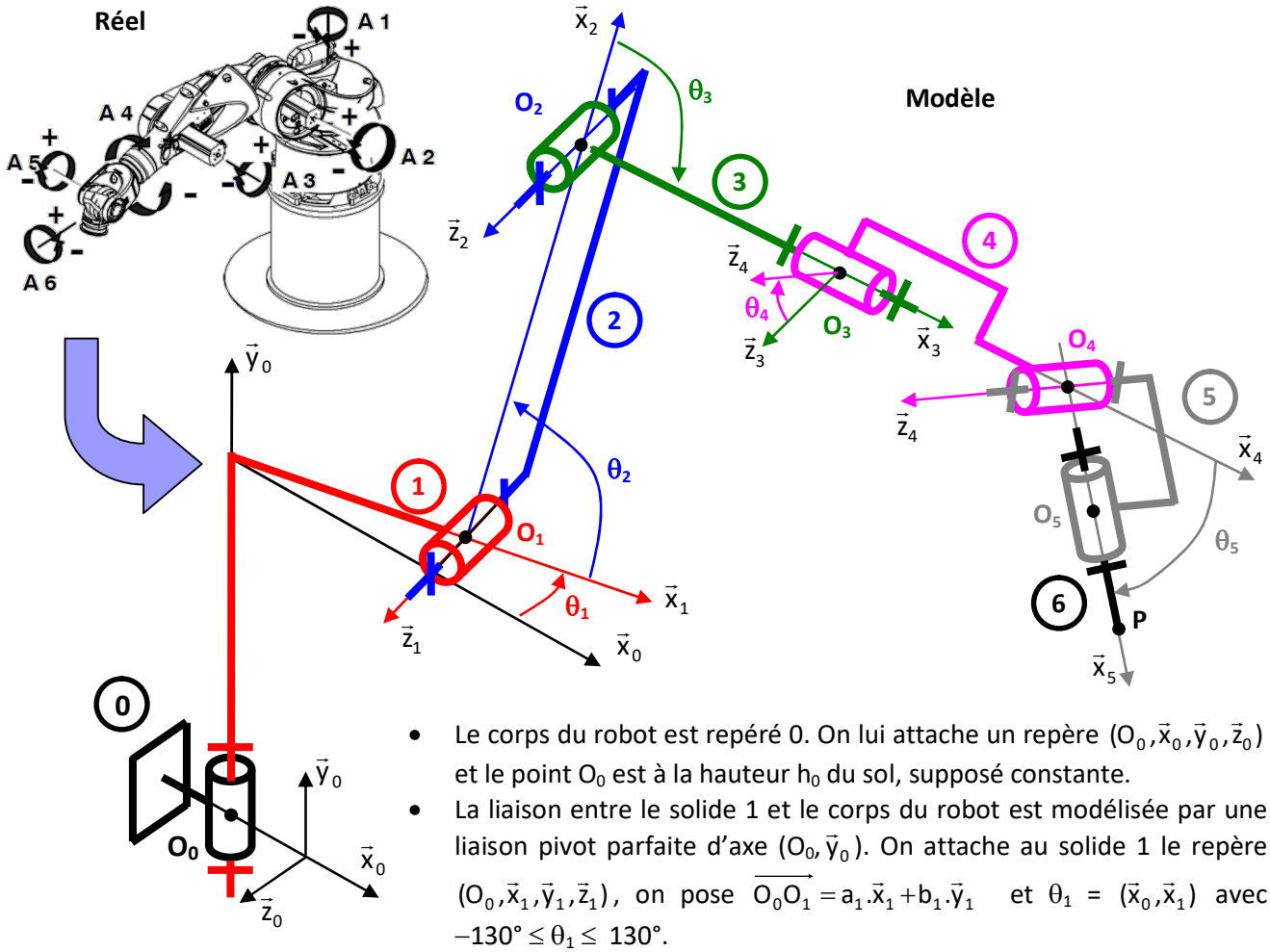


On s'intéresse dans ce sujet au robot 6 axes dont on donne les descriptions structurelles, les modèles ainsi qu'un extrait de cahier des charges fonctionnel.

Extrait de cahier des charges fonctionnel

Exigences techniques	Critères	Niveaux
Le système doit respecter les exigences techniques suivantes	… Course du vérin de harnais Vitesse maxi passager Accélération maxi passager …	… Course < 0,4 m V_{max} < 10m/s A_{max} < 2g …

Florestan MATHURIN



- Le corps du robot est repéré 0. On lui attache un repère $(O_0,\vec{x}_0,\vec{y}_0,\vec{z}_0)$ et le point O_0 est à la hauteur h_0 du sol, supposé constante.
- La liaison entre le solide 1 et le corps du robot est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe $(O_0,\vec{y}_0)$. On attache au solide 1 le repère $(O_0,\vec{x}_1,\vec{y}_1,\vec{z}_1)$, on pose $\overrightarrow{O_0O_1}=a_1.\vec{x}_1+b_1.\vec{y}_1$ et $\theta_1 = (\vec{x}_0,\vec{x}_1)$ avec $-130° \leq \theta_1 \leq 130°$.
- La liaison entre le bras 2 et le solide 1 est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe $(O_1,\vec{z}_1)$. On attache au solide 2 le repère $(O_1,\vec{x}_2,\vec{y}_2,\vec{z}_2)$, on pose $\overrightarrow{O_1O_2}=a_2.\vec{x}_2$ et $\theta_2 = (\vec{x}_1,\vec{x}_2)$ avec $-10° \leq \theta_2 \leq 100°$.
- La liaison entre l'avant bras 3 et le bras 2 est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe $(O_2,\vec{z}_2)$. On attache au solide 3 le repère $(O_2,\vec{x}_3,\vec{y}_3,\vec{z}_3)$, on pose $\overrightarrow{O_2O_3}=a_3.\vec{x}_3$ et $\theta_3 = (\vec{x}_2,\vec{x}_3)$ avec $-30° \leq \theta_3 \leq 15°$.
- La liaison entre le solide 4 et l'avant bras 3 est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe $(O_3,\vec{x}_3)$. On attache au solide 4 le repère $(O_3,\vec{x}_4,\vec{y}_4,\vec{z}_4)$, on pose $\overrightarrow{O_3O_4}=a_4.\vec{x}_4$ et $\theta_4 = (\vec{z}_3,\vec{z}_4)$ avec $-350° \leq \theta_4 \leq 350°$.
- La liaison entre le solide 5 et le solide 4 est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe $(O_4,\vec{z}_4)$. On attache au solide 5 le repère $(O_4,\vec{x}_5,\vec{y}_5,\vec{z}_5)$, on pose $\overrightarrow{O_4O_5}=a_5.\vec{x}_5$ et $\theta_5 = (\vec{x}_4,\vec{x}_5)$ avec $-58° \leq \theta_5 \leq 58°$.
- La liaison entre le solide 6 (sur lequel se trouve la nacelle et les 2 passagers) et le solide 5 est modélisée par une liaison pivot parfaite d'axe $(O_5,\vec{x}_5)$. On attache au solide 6 le repère $(O_5,\vec{x}_6,\vec{y}_6,\vec{z}_6)$, on pose $\overrightarrow{O_5P}=a_6.\vec{x}_5$ et $\theta_6 = (\vec{y}_5,\vec{y}_6)$ avec $-350° \leq \theta_6 \leq 350°$.

Données : $h_0 = 1$ m ; $a_1 = 0{,}5$ m ; $b_1 = 1$ m ; $a_2 = 1{,}25$ m ; $a_3 = 0{,}25$ m ; $a_4 = 0{,}5$ m ; $a_5 = 0{,}25$ m ; $a_6 = 0{,}25$ m.

Q.1. Effectuer le graphe des liaisons du bras articulé du robot et poser toutes les figures géométrales.

Q.2. Compléter sur le document réponse le schéma cinématique en couleur permettant de visualiser dans le plan $(O_0,\vec{x}_0,\vec{y}_0)$ les solides 1 à 6 dans la position robot en attente de chargement ($\theta_1 = 0°$, $\theta_2 = 12°$, $\theta_3 = -26°$, $\theta_4 = 0°$, $\theta_5 = 19°$, $\theta_6 = 0°$).

Q.3. Déterminer le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_{P\in 6/5}}$.

Q.4. Déterminer le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_{P\in 6/4}}$.

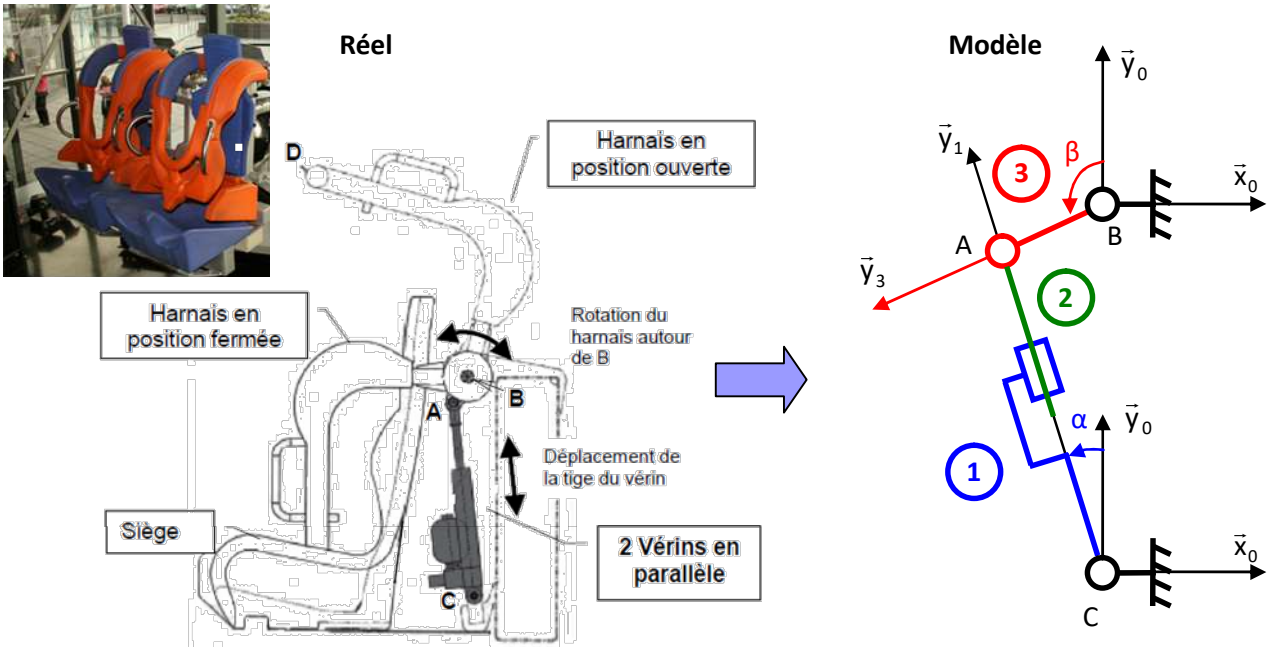
Q.5. Déterminer le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_{P\in 6/3}}$.

Q.6. En considérant que $\theta_4 = \dot{\theta}_4 = 0$, déterminer le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_{P\in 6/1}}$.

Q.7. Pour $\theta_i = \dot{\theta}_i = 0$ avec i = 2 à 6, déterminer le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_{P\in 6/0}}$.

Q.8. Pour $\theta_i = \dot{\theta}_i = 0$ avec i = 2 à 6, déterminer $\left\|\overrightarrow{V_{P\in 6/0}}\right\|$. On donne $\dot{\theta}_1 = 1 \text{rad/s}$, conclure quand au respect du cahier des charges pour cette configuration de fonctionnement.

On s'intéresse maintenant au dispositif de sécurité équipant les sièges du Robotcoaster. Chaque passager du robot est maintenu en position dans son siège à l'aide d'un harnais dont on donne une description structurelle ainsi qu'une modélisation cinématique.



Données : $\overrightarrow{CA} = \lambda(t).\vec{y}_1$; $\overrightarrow{CB} = H.\vec{y}_0$; $\overrightarrow{BA} = L.\vec{y}_3$; $\alpha = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$; $\beta = (\vec{y}_0, \vec{y}_3)$; H = 0,8 m ; L = 0,2 m.

Q.9. Ecrire l'équation vectorielle correspondant à la fermeture géométrique (ABC) puis donner les 2 équations scalaires correspondant à la projection dans le repère 0 de l'équation vectorielle.

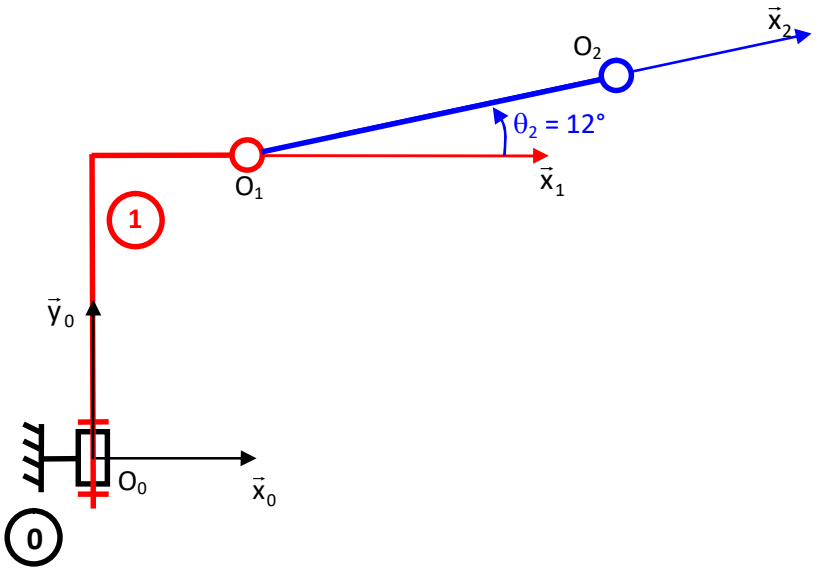
Q.10. Déterminer la loi entrée sortie du système de la forme λ(t) = f(β).

Q.11. Déterminer la longueur initiale du vérin lorsque le harnais est en position fermée (β_i = -150°). Déterminer la longueur finale du vérin lorsque celui-ci est en position harnais ouvert (β_f = -40°). En déduire l'amplitude de déplacement du vérin $\Delta\lambda$. Conclure quant au cahier des charges.

Florestan MATHURIN

Document réponse 1 :

Echelle : 1 cm = 0,25 m



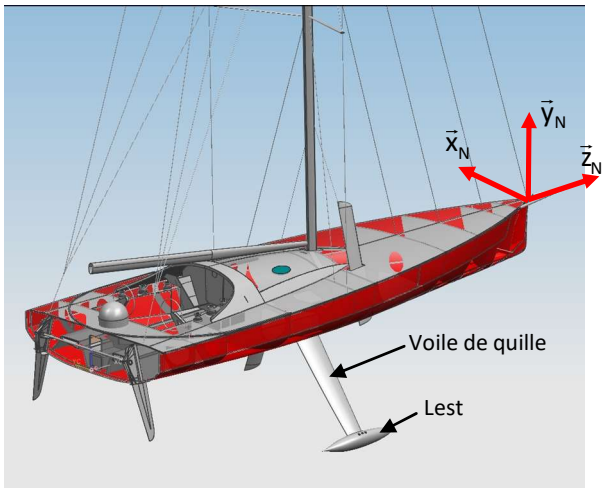
Sol

Quille pendulaire d'un voilier de course océanique

(D'après Mines Ponts MP)

Le comportement dynamique d'un Imoca 60 (bateau du Vendée globe) est conditionné par ses interactions avec les deux fluides avec lesquels il est en contact : l'air et l'eau. Il flotte sur l'eau grâce à la poussée d'Archimède qui agit sur la coque et il avance grâce à l'action aérodynamiques de l'air sur les voiles. Ces actions aérodynamiques provoquent aussi son inclinaison autour de son axe longitudinal (axe de direction $\vec{z}_N$ sur la figure 1), c'est le phénomène de gîte.

Pour contrebalancer ce mouvement et éviter que le voilier ne se couche sur l'eau, on utilise une quille qui joue le rôle de contrepoids. Cette quille est généralement constituée d'un voile en acier ou titane immergé dans l'eau à l'extrémité duquel se trouve un lest profilé. Son efficacité dépend de la masse du lest et de la longueur du voile de quille. Ces deux paramètres présentent cependant des limitations : le lest ne peut être trop important sous peine de solliciter dangereusement le voile de quille et la longueur de quille est limitée par le tirant d'eau maximal admissible. Michel Desjoyaux a imaginé dans les années 90 une quille pendulaire qui permet à la quille de s'orienter latéralement jusqu'à environ 45°. Cette quille est en liaison pivot d'axe $(O ; \vec{z}_N)$ avec la coque du navire peut ainsi être orientée d'un côté ou de l'autre du navire. Une fois l'orientation désirée obtenue, tout mouvement dans la liaison pivot est supprimé par le blocage en rotation de celle-ci.



Voilier avec sa quille pendulaire écartée au maximum sur « bâbord »

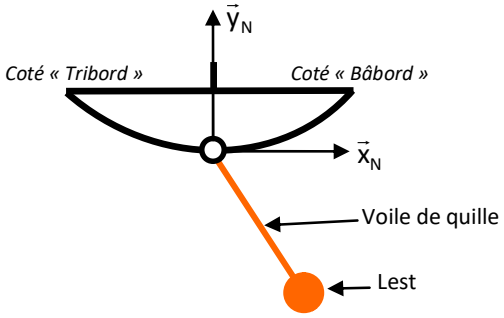


Figure 1 - Quille pendulaire sur Imoca 60.

L'objectif de ce sujet est de valider les performances cinématiques de ce système de quille pendulaire dont on donne une description structurelle ainsi qu'un extrait de cahier des charges.

Exigences	Critères	Niveaux
Le système doit respecter les exigences techniques suivantes	Angle d'inclinaison maximal de la quille/coque Course maximale des vérins Accélération maximale du centre de gravité du lest …	$\theta_{1,max} = \pm 45°$ < 1,6 m $< 5.10^{-3}$ m/s^2

Mise en évidence de l'intérêt d'une quille pendulaire

On considère le navire à l'arrêt et en équilibre sur un plan d'eau au repos (figure 2a). Il est soumis :

- à l'action mécanique de pesanteur modélisée ici par le poids P appliqué en G, centre de gravité du navire,
- à l'action mécanique de l'eau sur la coque modélisée par la force appelée « Poussée d'Archimède » appliquée en C, centre de carène du navire.

Une cause extérieure représentée comme l'effet du vent sur les voiles ou des vagues sur la coque, provoque la gîte du navire caractérisée par l'angle de gîte α (figure 2b).

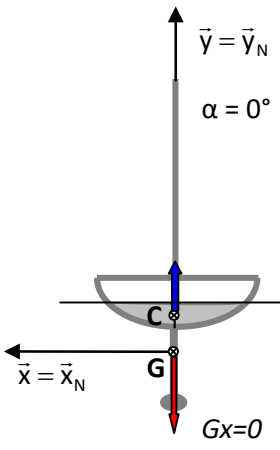


Figure 2a

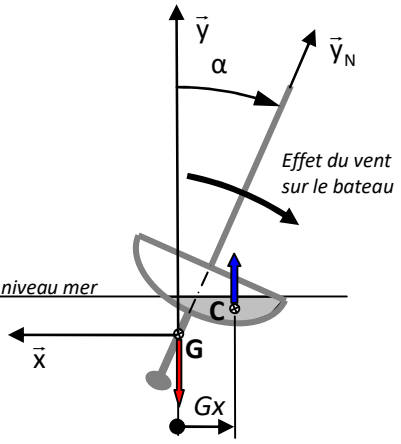


Figure 2b

Un nouvel équilibre est alors obtenu sous l'effet des deux actions mécaniques précédentes, le poids et la poussée d'Archimède, ainsi que l'action mécanique extérieure cause de gîte.

Q.1. La figure document réponse DR1 donne la courbe de stabilité théorique du voilier à quille non pendulaire (quille fixe par rapport à la coque). Pour chaque point d'équilibre repéré sur la courbe par A, B, C, D, E et F, donner dans la case prévue sur la copie le numéro de la figure représentant la position d'équilibre correspondant.

La réglementation impose à l'architecte naval de créer des formes de coque pour lesquelles :

- L'angle de gîte provoquant la mise en situation de chavirage du voilier (changement de signe de Gx) soit au minimum de 120°, ce qui permet au navire un angle de gîte le plus grand possible sans chavirage (on remarquera qu'à 120° le navire à le mât dans l'eau).
- Le rapport des « aires » sur la courbe de stabilité théorique soit tel que : $\frac{S_{01}}{S_{12}} = 5$, ce qui signifie que le travail du poids est 5 fois plus grand dans la zone de redressement que dans la zone de chavirage. Le bateau est "5 fois plus difficile" à faire chavirer qu'à redresser.

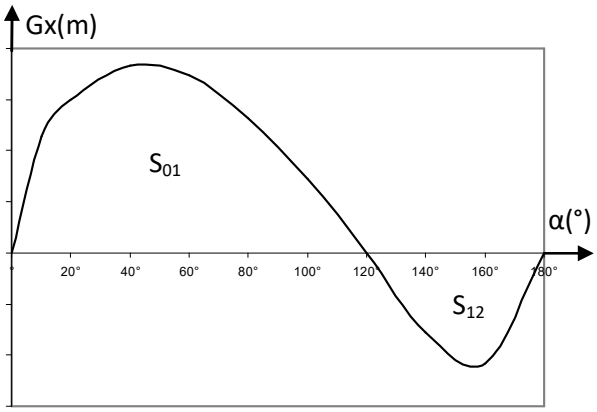


Figure 3 - Courbe de stabilité théorique : définition des « aires » S_{01} et S_{12}

La figure document réponse DR2 donne les courbes de stabilité théorique d'un voilier dont la quille pendulaire est inclinée au maximum sur « tribord» (courbe 1) et du même voilier avec la quille non inclinée (courbe 2).

Q.2. Au vu de ces 2 courbes, quels sont les 2 avantages principaux que procure la quille pendulaire au comportement du navire lorsqu'il gîte avec un angle α positif.

Q.3. Dans la situation de navigation où le vent vient de tribord et où la gîte ne doit pas être trop importante malgré la grande surface de voile déployée, quelle doit être la configuration de navigation à adopter ? Répondre en s'aidant d'un schéma comme celui de la figure 1 pour justifier votre choix.

Validation des performances cinématiques du mécanisme de quille pendulaire

Modélisation et hypothèses

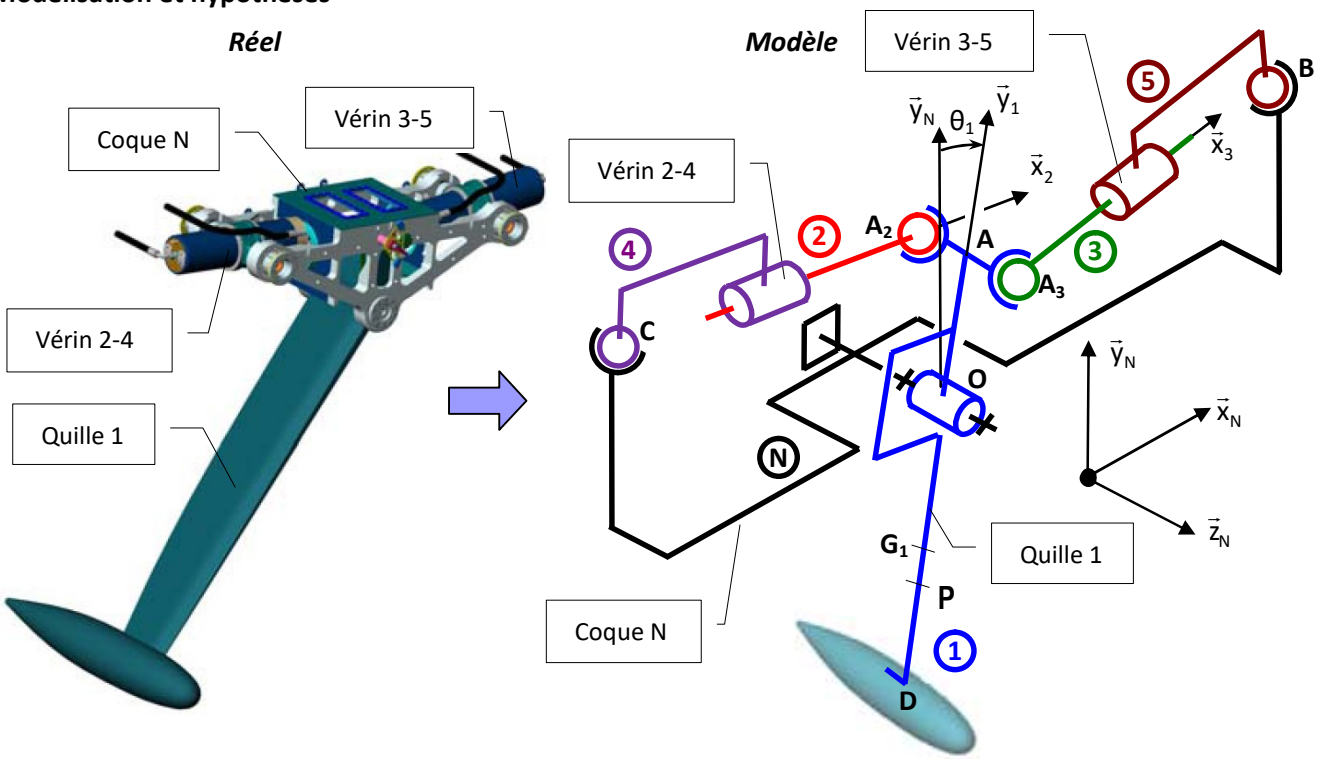


Figure 4 - Schéma cinématique du système de quille pendulaire.

On considère sur ce modèle que la quille 1 est en liaison pivot d'axe $(O, \vec{z}_N)$ par rapport à la coque N du bateau. Cette quille est mise en mouvement par l'intermédiaire de 2 vérins notés 2-4 et 3-5. Le vérin 2-4 est constitué d'un corps de vérin 4 en liaison rotule avec la coque N au point C et d'une tige 2 en liaison rotule avec la quille 1 en A_2. La tige 2 est en liaison pivot glissant d'axe $(C, \vec{x}_2)$ par rapport au corps de vérin 4. Le vérin 3-5 est constitué d'un corps de vérin 5 en liaison rotule avec la coque N au point B et d'une tige 3 en liaison rotule avec la quille 1 en A_3. La tige 3 est en liaison pivot glissant d'axe $(B, \vec{x}_3)$ par rapport au corps de vérin 5.

On considèrera que les vitesses angulaires de rotation des mouvements de 2/4 et de 3/5 sont nulles.

$R_N = (O, \vec{x}_N, \vec{y}_N, \vec{z}_N)$ repère lié à la coque du bateau considérée comme un bâti et supposée galiléen ;
$R_1 = (O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1 = \vec{z}_N)$ repère lié à la quille tel que $\theta_1 = (\vec{x}_N, \vec{x}_1) = (\vec{y}_N, \vec{y}_1)$;
$R_2 = (C, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2 = \vec{z}_N)$ repère lié au vérin 2-4 et tel que $\theta_2 = (\vec{x}_N, \vec{x}_2 = \vec{x}_4) = (\vec{y}_N, \vec{y}_2 = \vec{y}_4)$;
$R_3 = (C, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3 = \vec{z}_N)$ repère lié au vérin 3-5 et tel que $\theta_3 = (\vec{x}_N, \vec{x}_3 = \vec{x}_5) = (\vec{y}_N, \vec{y}_3 = \vec{y}_5)$;

$\overrightarrow{OA} = R.\vec{y}_1$	$\overrightarrow{AA_2} = -d.\vec{z}_N$	$\overrightarrow{AA_3} = d.\vec{z}_N$	$\overrightarrow{OC} = -a.\vec{x}_N + b.\vec{y}_N - d.\vec{z}_N$
$\overrightarrow{DO} = L_{t1}.\vec{y}_1$	$\overrightarrow{OG_1} = -L_1.\vec{y}_1$	$\overrightarrow{CA_2} = x_{24}(t).\vec{x}_2$	$\overrightarrow{OB} = a.\vec{x}_N + b.\vec{y}_N + d.\vec{z}_N$
$\overrightarrow{A_3B} = x_{35}(t).\vec{x}_3$	***Avec R, d, a, b, L_{t1}, L_1 longueurs constantes et $x_{24}(t)$ et $x_{35}(t)$ longueurs variables***		
Données : L_{t1} = 4,5 m ; a = 1,5 m ; b = 1m ; R = 1 m ; L_1 = 3,5 m			

Q.4. Donner le(les) paramètre(s) géométrique(s) d'entrée qui permet(tent) de piloter le mouvement de la quille et celui de sortie.

Q.5. Réaliser le graphe des liaisons correspondant à la modélisation représentée par le schéma cinématique de la figure 3.

Q.6. Etablir la(les) figure(s) géométrale(s) utile(s) représentant le paramétrage angulaire défini dans la partie modélisation et hypothèses.

Q.7. Réaliser le schéma cinématique plan à l'échelle et en **couleur** de la quille sur le document réponse DR3 pour la position correspondant à l'angle d'inclinaison maximal positif de la quille imposé par le cahier des charges. Devront apparaître sur cette construction les solides N, 1, 2, 3, 4 et 5 ainsi que les points 0, A, B et C.

Q.8. Sur la construction graphique réalisée question précédente, mesurer en mm la longueur du vérin bâbord puis en déduire la longueur réelle du vérin en position sortie.

Q.9. Sur la construction graphique réalisée document réponse DR3 mesurer en mm la longueur du vérin tribord puis en déduire la longueur réelle du vérin en position rentrée. En exploitant la symétrie présente sur le système, déterminer la course totale des vérins permettant d'assurer l'inclinaison maximale de la quille puis conclure vis à vis du cahier des charges.

Q.10. Ecrire l'équation vectorielle correspondant à la fermeture de chaîne (OCA_2AO). La projeter ensuite dans la base B_N.

Q.11. A partir des résultats de la question précédente, déterminer la relation entre x_{24} et θ_1. Faire l'application numérique pour la configuration inclinaison maximale ($\theta_1 = 45°$) afin de vérifier le résultat de la question 9.

Q.12. A partir d'une fermeture géométrique de votre choix, déterminer la relation entre x_{35} et θ_1. Faire l'application numérique pour la configuration inclinaison maximale ($\theta_1 = 45°$) afin de vérifier le résultat de la question 8.

Florestan MATHURIN

Q.13. Ecrire les vecteurs de rotation instantanés $\overrightarrow{\Omega_{1/N}}$, $\overrightarrow{\Omega_{2/N}}$, $\overrightarrow{\Omega_{3/N}}$.

Q.14. Calculer, par calcul direct, le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_{D,1/N}}$.

Q.15. Retrouver, par champ des vitesses, le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_{D,1/N}}$.

Q.16. Calculer les vecteurs vitesse $\overrightarrow{V_{A_2,2/4}}$, $\overrightarrow{V_{A_2,4/N}}$ puis en déduire $\overrightarrow{V_{A_2,2/N}}$ à l'aide de la composition de mouvement. Retrouver $\overrightarrow{V_{A_2,2/N}}$ par le calcul direct.

Q.17. Montrer que $\overrightarrow{V_{A_3,N/1}}+\overrightarrow{V_{A_3,1/3}}+\overrightarrow{V_{A_3,3/5}}+\overrightarrow{V_{A_3,5/N}}$ correspond à la dérivée de l'équation vectorielle de la fermeture géométrique (OBA_3AO)

Q.18. Calculer $\overrightarrow{\Gamma_{D,1/N}}$. Donner ensuite l'expression de $\overrightarrow{\Gamma_{D,1/N}}$ projetée dans la base B_N.

Q.19. Pour une vitesse angulaire constante $\dot{\theta}_1 = 0{,}025$ rad/s, calculer $\left\|\overrightarrow{\Gamma_{D,1/N}}\right\|$. Conclure vis-à-vis de l'exigence du cahier des charges.

Document réponse DR 1 :

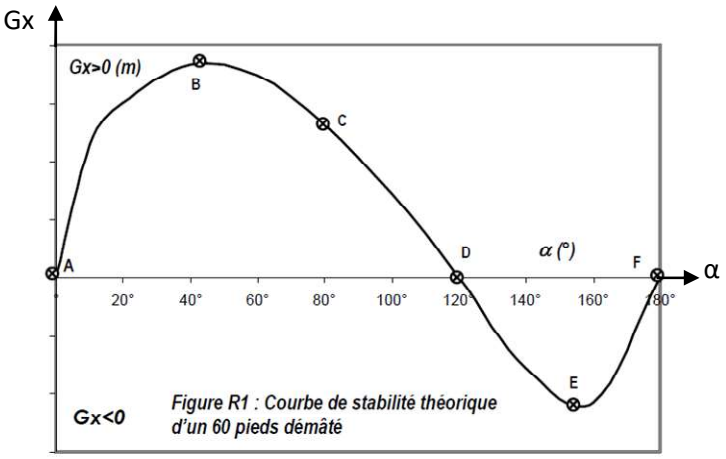
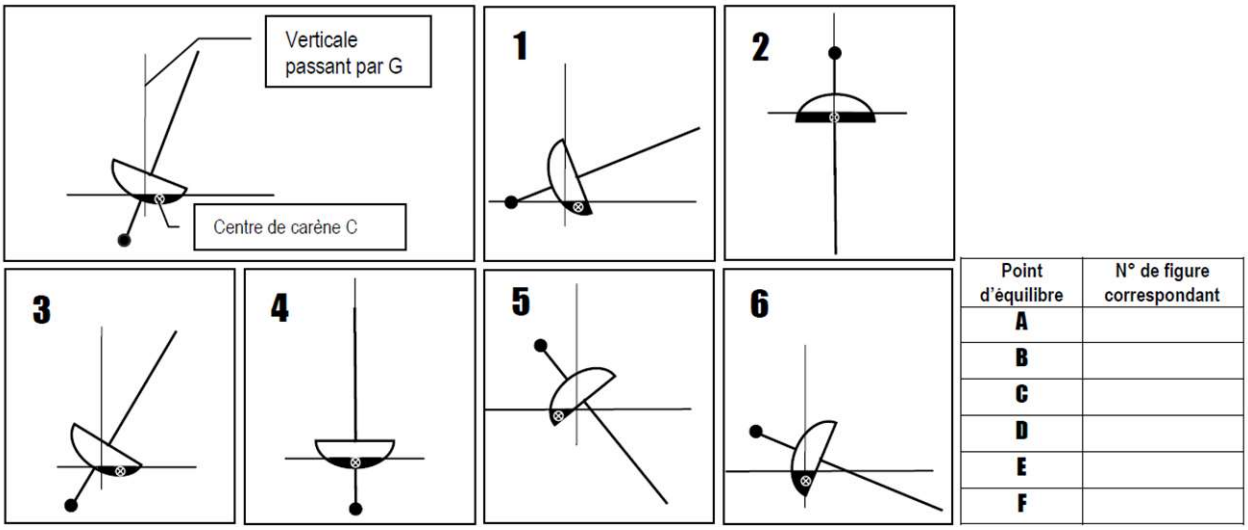
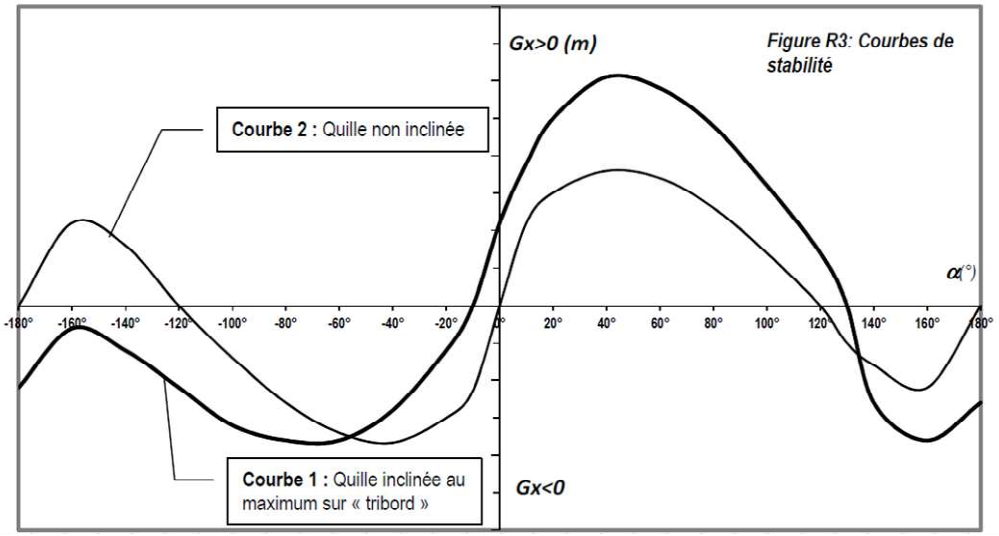


Figure R1 : Courbe de stabilité théorique d'un 60 pieds démâté

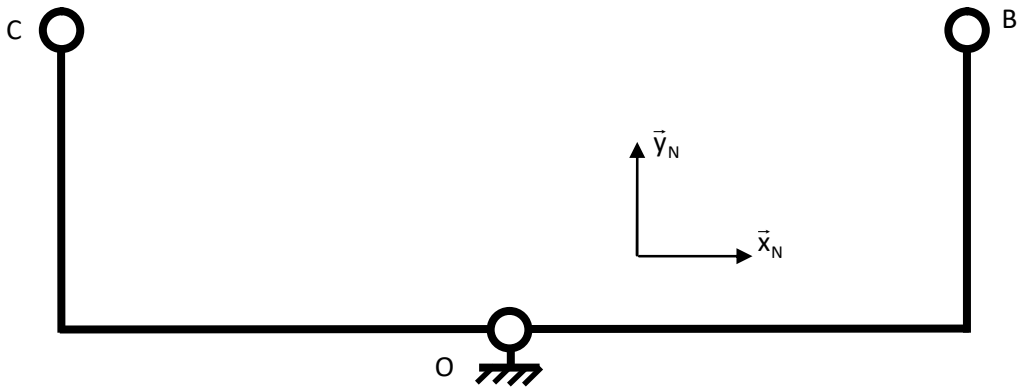


Point d'équilibre	N° de figure correspondant
A	
B	
C	
D	
E	
F	

Document réponse DR 2 :



Document réponse DR 3 : Echelle 4 cm → 1 m

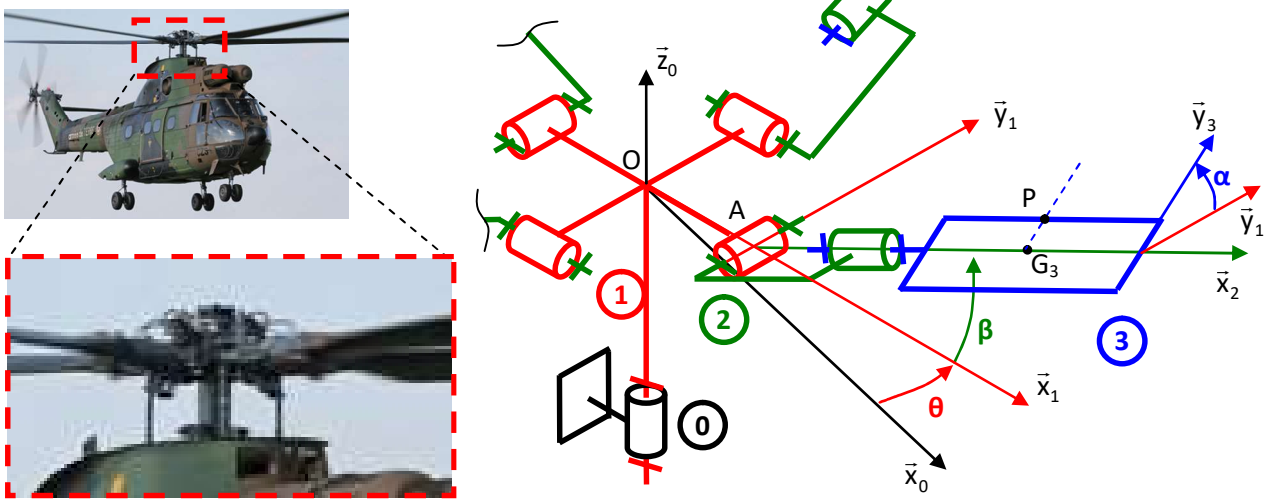


Etude Cinématique d'un Rotor Principal d'Hélicoptère

(D'après Concours Ecole de l'air PSI 2005)

La sustentation d'un hélicoptère est assurée par un rotor ou ensemble de pales tournant autour d'un axe vertical. Ce rotor, entraîné par un moteur, assure à la fois la sustentation et la propulsion de l'hélicoptère. Ce dernier est donc capable de vol stationnaire, de décollage et d'atterrissage vertical et de déplacement dans toutes les directions. Un rotor nécessaire à la stabilisation de l'appareil est placé à l'extrémité du fuselage.

Réel ***Modèle***



Le schéma cinématique ci-dessus représente un modèle simplifié du rotor principal de l'hélicoptère. Il comprend :

- Le fuselage 0 auquel est lié le repère $R_0(O,\vec{x}_0,\vec{y}_0,\vec{z}_0)$.
- Le moyeu central 1 qui est en liaison pivot d'axe $(O,\vec{z}_0)$ avec le fuselage 0. Le repère $R_1(O,\vec{x}_1,\vec{y}_1,\vec{z}_1)$ est lié au moyeu central 1. L'angle $\theta=(\vec{x}_0,\vec{x}_1)=(\vec{y}_0,\vec{y}_1)$ paramètre la rotation du moyeu.
- Le pied de pale 2 qui est en liaison pivot d'axe $(A,\vec{y}_1)$ avec le moyeu 1 avec $\overrightarrow{OA}=r.\vec{x}_1$ (r constant). Le repère $R_2(A,\vec{x}_2,\vec{y}_2,\vec{z}_2)$ est lié au pied de pale 2. L'angle $\beta=(\vec{z}_1,\vec{z}_2)=(\vec{x}_1,\vec{x}_2)$ est appelé l'angle de battement.
- La pale 3 qui est en liaison pivot d'axe $(A,\vec{x}_2)$ avec le pied de pale 2. Le repère $R_3(A,\vec{x}_3,\vec{y}_3,\vec{z}_3)$ est lié à la pale 3. L'angle $\alpha=(\vec{y}_2,\vec{y}_3)=(\vec{z}_2,\vec{z}_3)$ est appelé l'angle de pas.

Dans le cadre d'une étude dynamique, on cherche à obtenir l'accélération du centre d'inertie de la pale 3, G_3 tel que $\overrightarrow{AG_3}=x_{G3}\,\vec{x}_2$, dans son mouvement par rapport à 0.

Q.1. Déterminer l'expression littérale du vecteur vitesse du point G_3 lié à 3 par rapport à 0.

Q.2. Déterminer l'expression du torseur cinématique $\{C_{3/0}\}$ au point G_3 puis le donner au point P ($\overrightarrow{G_3P}=b.\vec{y}_3$).

Q.3. Déterminer l'expression littérale du vecteur accélération du point G_3 lié à 3 par rapport à 0.

On considère une situation de vol stationnaire (situation où l'hélicoptère reste en l'air, à la verticale d'un point et à altitude constante) pour laquelle la vitesse angulaire de rotation du rotor $\dot{\theta}$ est constante et l'angle de battement β est constant et identique pour toutes les pales : $\beta = \beta_0$.

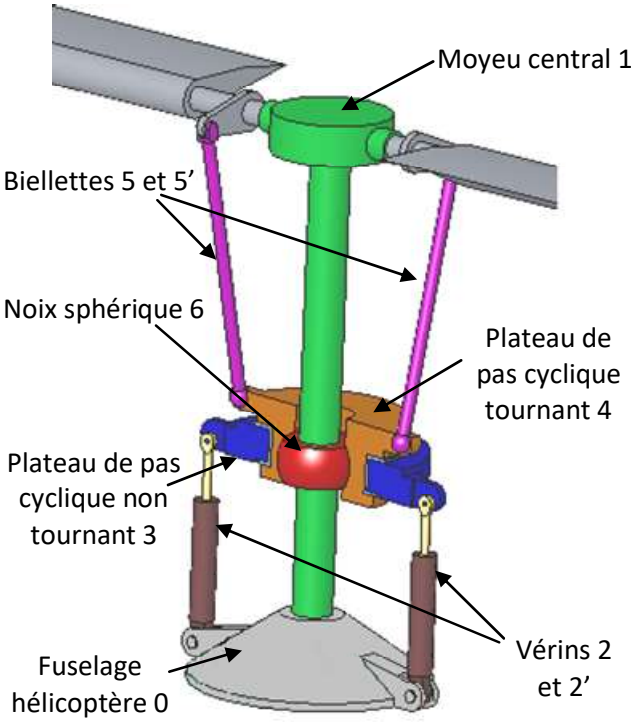
Q.4. Donner les expressions de $\overrightarrow{V_{G,3/0}}$ et $\overrightarrow{a_{G,3/0}}$ dans le cas particulier du vol stationnaire.

On s'intéresse maintenant au dispositif mécanique permettant de modifier l'angle de pas α à partir des consignes du pilote. Une partie de ce dispositif mécanique est présenté sur la figure ci-dessous (seulement une partie du système et 2 pâles sont représentées pour ne pas surcharger la figure).

La commande exercée par le pilote permet d'orienter angulairement le plateau de pas cyclique non tournant 3 par l'intermédiaire de plusieurs vérins hydrauliques (seuls les vérins 2 et 2' sont représentés sur la figure). La disposition constructive du système est telle que l'on considèrera que le plateau de pas cyclique non tournant 3 est en liaison rotule avec la noix sphérique 6.

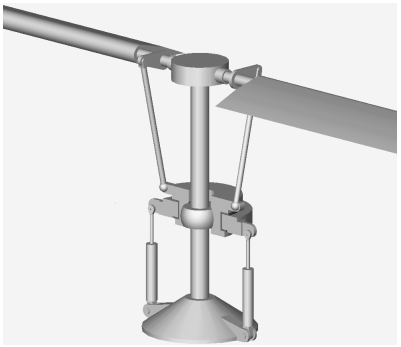
L'orientation du plateau de pas cyclique non tournant 3 permet d'incliner du même angle le plateau de pas cyclique tournant 4. La variation angulaire de ce plateau de pas cyclique tournant 4 entraine le changement d'angle de pas des pales grâce aux biellettes 5 et 5'.

Un dispositif d'entrainement positionné entre le plateau de pas cyclique tournant 4 et la noix sphérique 6 (non représenté sur la figure) permet d'entrainer en rotation le plateau de pas cyclique tournant 4 à la même vitesse que le moyeu central 1.



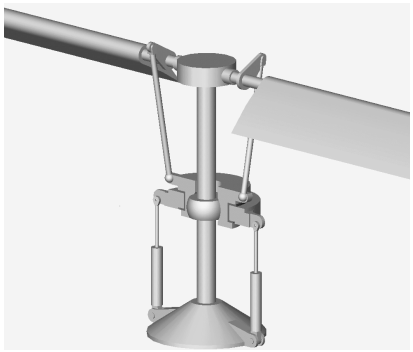
Enfin l'existence d'une liaison pivot glissant d'axe vertical entre le moyeu central 1 et la noix sphérique 6 permet de translater le plateau de pas cyclique non tournant lorsque l'on souhaite que toutes les pâles aient le même angle de pas.

Les trois figures ci-dessous présentent trois configurations du dispositif de réglage de l'incidence des pales :



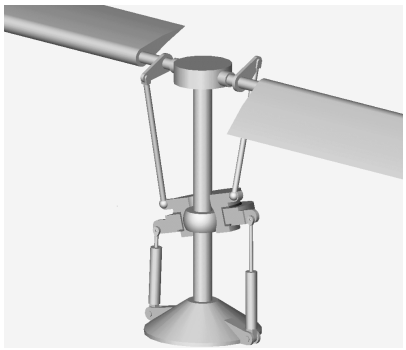
Hélicoptère à l'arrêt
Les pales sont en position horizontale (angle de pas nul)

Plateau cyclique en position neutre



Hélicoptère en vol stationnaire
Les pales présentent le même angle de pas

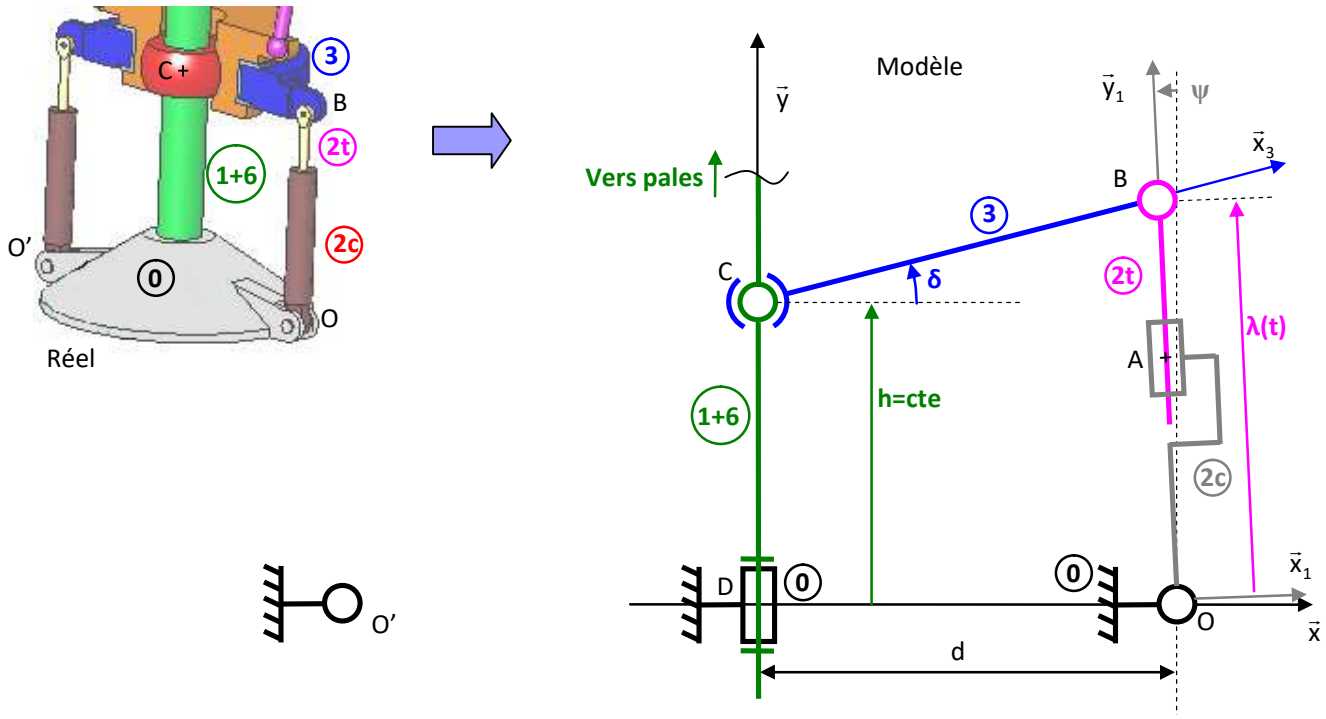
Noix + plateau cyclique translaté



Hélicoptère en déplacement
Les pales ne présentent pas le même angle de pas.

Plateau cyclique incliné

On s'intéresse au mécanisme d'orientation du plateau cyclique non tournant 3 lors d'une phase de déplacement de l'hélicoptère dont on donne une modélisation plane simplifiée. **On considère dans ce modèle que la noix sphérique 6 est solidaire et encastrée au moyeu central 1.**



Données : $\overrightarrow{DO} = d.\vec{x}$ $\overrightarrow{DC} = h(t).\vec{y}$ $\overrightarrow{OB} = \lambda(t).\vec{y}_1$ $\overrightarrow{CB} = d.\vec{x}_3$ $\psi = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$ $\delta = (\vec{x}_0, \vec{x}_3)$

Q.5. Donner le torseur cinématique de la liaison 2t/2c.

Q.6. Réaliser le graphe des liaisons associé au schéma cinématique proposé ci dessus.

Q.7. A partir de la description structurelle du système, compléter le schéma cinématique ci-dessus en ajoutant le 2ème vérin permettant de manipuler le plateau non tournant 3.

Q.8. Déterminer la loi entrée sortie du système donnant l'élongation du vérin λ(t) et l'inclinaison du plateau δ(t) sous la forme λ(t) = f(δ(t)).

Q.9. Dans la position particulière caractérisée par δ=0° et pour une vitesse de sortie de la tige du vérin 2c par rapport au corps du vérin 2t notée $\dot{\lambda}$, déterminer l'expression de la vitesse de rotation angulaire du plateau non tournant 3 par rapport à 0.