

DM autonome - Mécanismes - 2019

Devoir 1 - Système de propulsion à pas variable

extrait de Esim 2003

Corrigé page 16

L'image de la figure 1 montre un remorqueur équipé d'un système de propulsion VSP (« Voith Schneider Propeller »), système d'hélices à pales oscillantes.

1. propulseur Voith-Schneider
2. plaque de protection du propulseur
3. coupleur hydrodynamique Voith
4. aileron
5. défense
6. treuil de remorque
7. chaumard de remorque
8. seconde position de remorque
9. timonerie

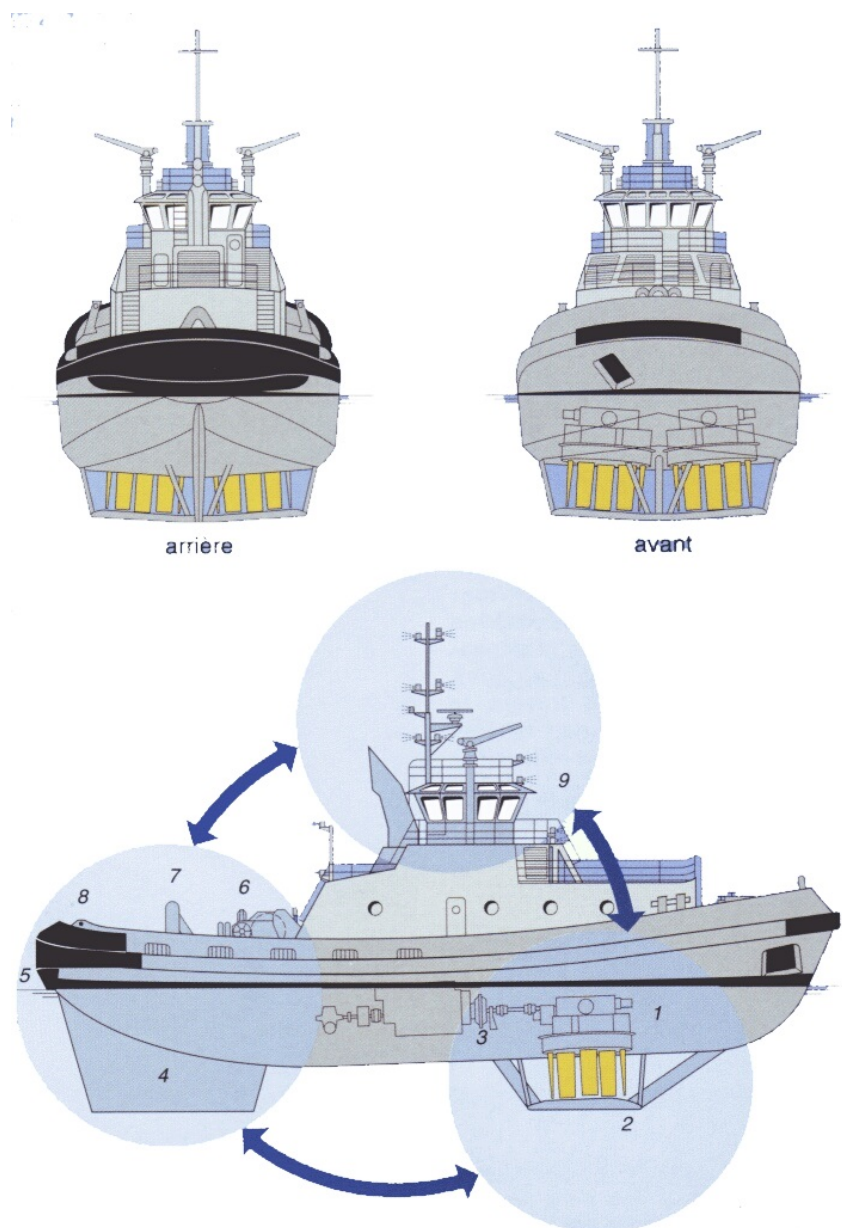


FIGURE 1 – Système VSP

Ce système est une alternative à la propulsion classique par hélice en bout d'arbre et il offre de

nombreux avantages en terme de manœuvre (réactivité, sécurité et poussée omnidirectionnelle). En particulier, il permet de faire varier rapidement avec précision et en continu la force de poussée d'un propulseur en direction et intensité, élément déterminant pour les navires devant être manœuvrés avec précision dans un rayon limité.

A. Actions mécaniques de portance

Compléments en annexe page 12

L'hélice d'un propulseur VSP est constituée de pales métalliques (à profil symétrique) orientables verticalement, ce qui permet de modifier leur incidence relative vis-à-vis de l'écoulement. L'écoulement résulte de la mise en rotation du disque qui porte les pales (4 à 5 pales suivant le modèle). Les pales, plongées dans l'eau et se déplaçant avec un angle d'incidence α , sont ainsi soumises à un champ de pression hydrodynamique (figure 2 page 4).

Dans le cas particulier du propulseur VSMP, l'écoulement relatif est tel que les lignes de courant sont circulaires et non pas parallèles. La cinématique est astucieusement conçue pour que les pales changent continûment d'incidence lors de la rotation du disque, de manière à ce que les portances s'orientent globalement dans la même direction.

En position neutre, les pales sont orientées dans le « lit » de l'écoulement, leur incidence relative est donc toujours nulle, les poussées se limitent à une composante de traînée. Le torseur résultant des actions hydrodynamiques sur le rotor (noté h/r) est alors assimilable à un couple résistant : $\vec{C}_{h/r}$.

En position dite « propulsive », les pales prennent une incidence qui varie au fur et à mesure de la rotation du disque, cette incidence génère une composante de portance sur chaque pale et le torseur résultant comporte alors également une résultante de portance utile à la propulsion du remorqueur.

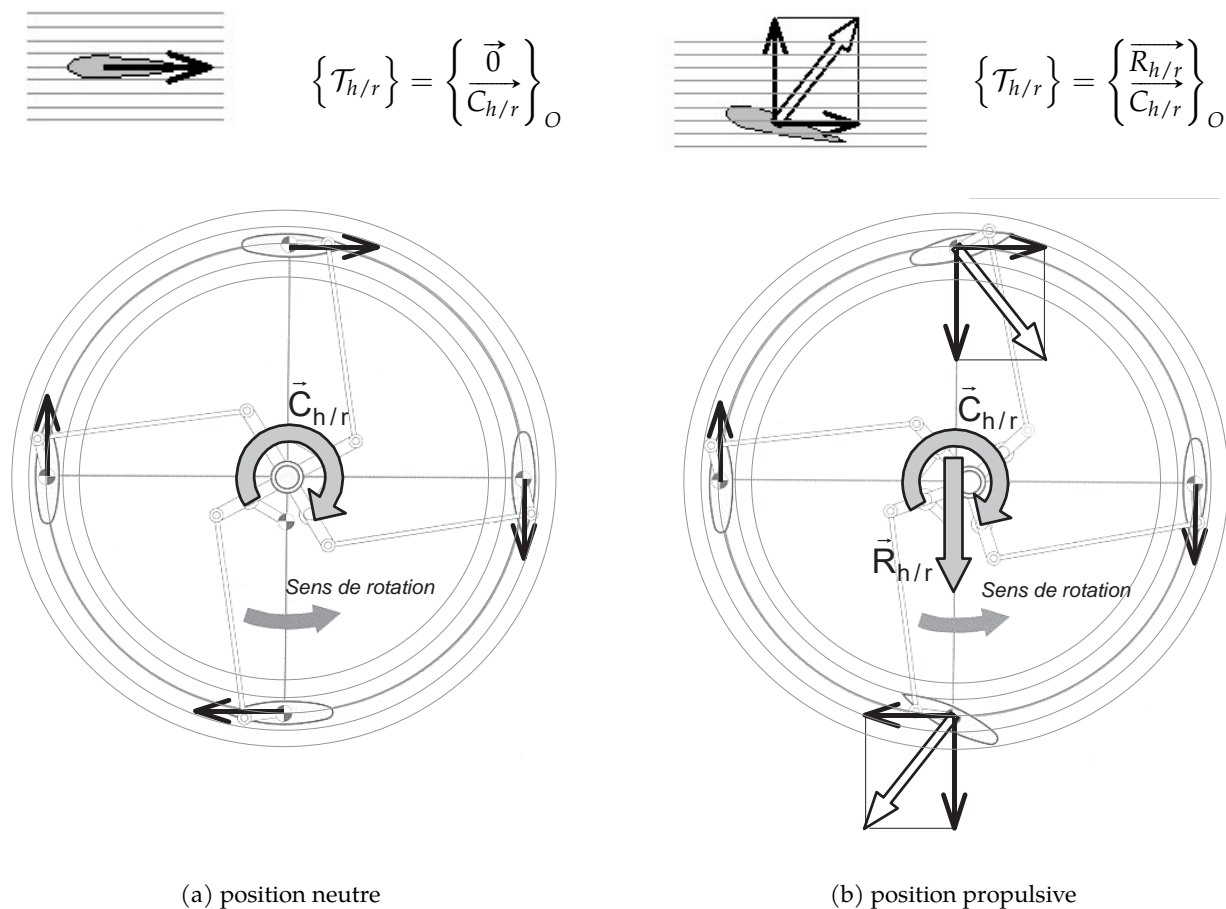


FIGURE 2 – Mise en évidence des actions hydrodynamiques (traînée et portance) sur chaque pale

A.1. Originalité de la cinématique

Les pales sont disposées à la périphérie du disque (3) en rotation continue au cours du fonctionnement. Chacune d'elle peut pivoter autour de son axe (figure 5 page 6 et schéma cinématique complet en figure 4.

Les vérins (1) et (2) impose une position au centre C de la rotule supérieure de la jambe (7). Cette jambe est articulée en O – par liaison sphérique entre (7) et (0)– et place le centre E de la linéaire annulaire inférieure dans une position opposée à celle de C.

La tringlerie (2-4-5) impose alors une orientation donnée (et donc une incidence donnée) de la pale en fonction de la position du point E et de la position angulaire du disque (3).

Au cours du fonctionnement, si le point E reste fixe, les pales changent continûment d'orientation, et donc d'incidence de manière à provoquer une poussée hydrodynamique toujours orientée dans le même sens.

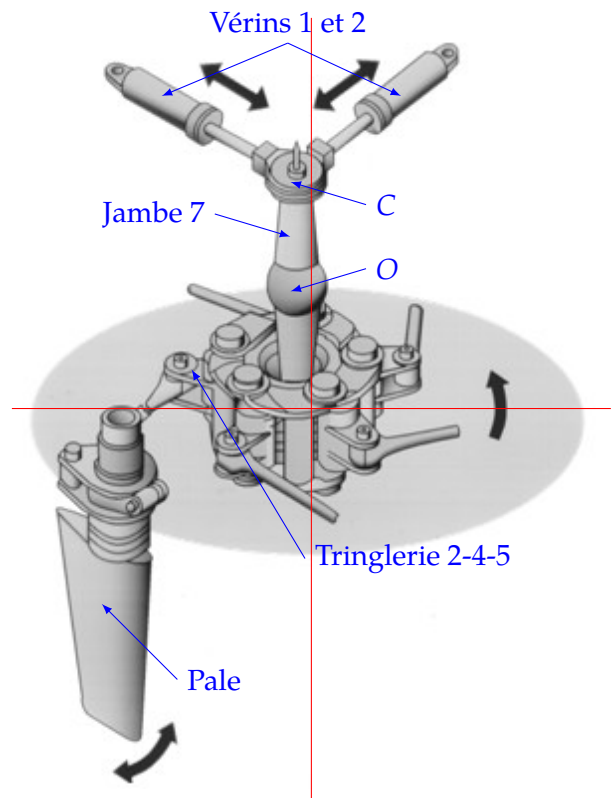


FIGURE 3 – Principe cinématique du VSP

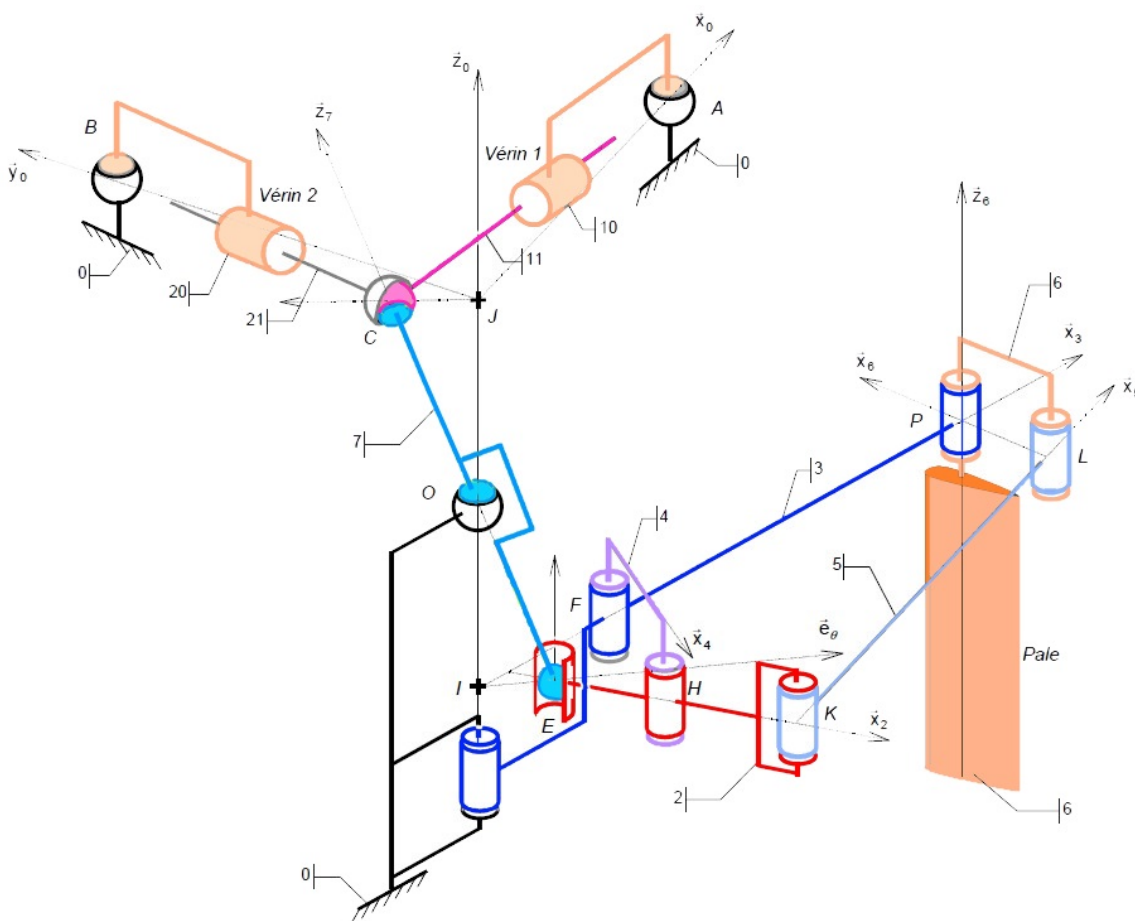


FIGURE 4 – Schéma cinématique spatial du mécanisme VSP complet

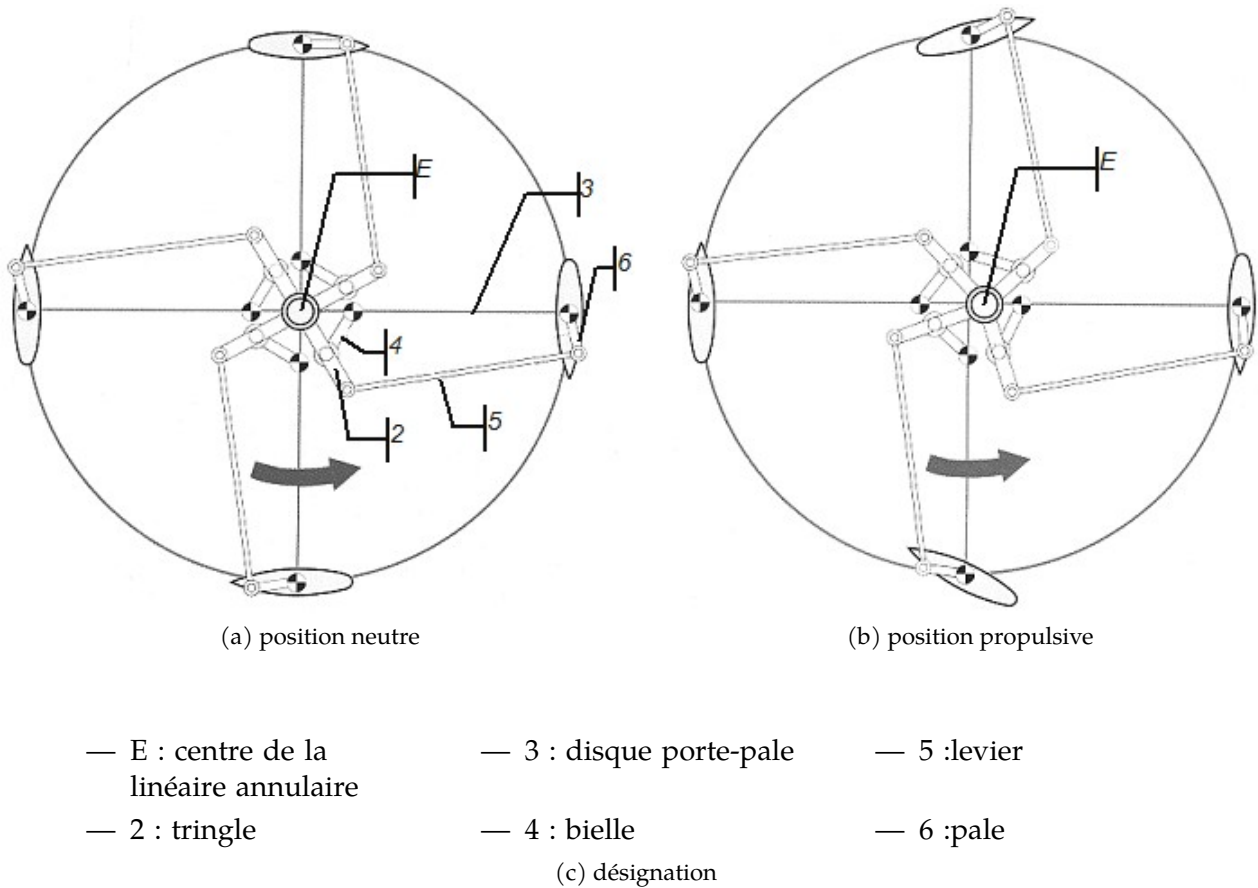
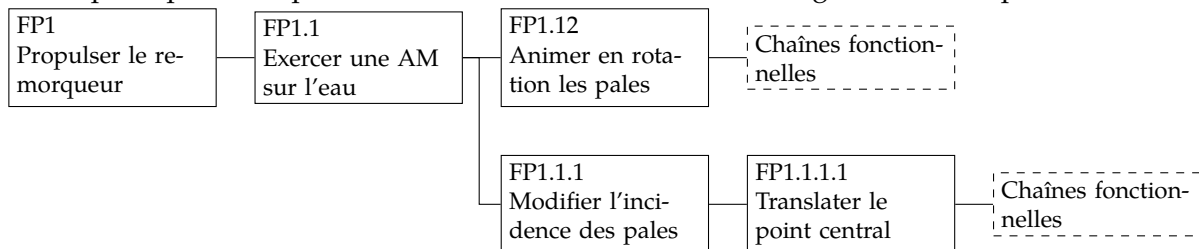


FIGURE 5 – Mise en évidence de l’influence de position du centre E de la rotule inférieure

B. Analyse : Fonction composante FP1.1.1 « Modifier l’incidence des pales »

L’étude suivante porte essentiellement sur la fonction principale « Propulser le navire » comme le montre le diagramme FAST présenté ci-dessous..



Analyse des modes de propulsion : fonction composante FP1.1 « Exercer une action mécanique sur l’eau ».

Objectifs :

- mettre en évidence le couple de renversement,
- déterminer les configurations relatives aux modes de marche principaux.

Les navires sont toujours équipés de deux propulseurs VSP disposés soit frontalement, soit longitudinalement.

Par exemple, les navires de type « remorqueur » sont équipés de deux VSP disposés frontalement (voir figure 1)

Pour tous les schémas (bateau et/ou propulseur seul), la poupe (arrière) est située à gauche, alors que la proue (avant) se trouve à droite.

Ces deux propulseurs sont commandés indépendamment ; on peut alors envisager une multitude de configurations de commande, la figure 6 en montre quelques-unes.

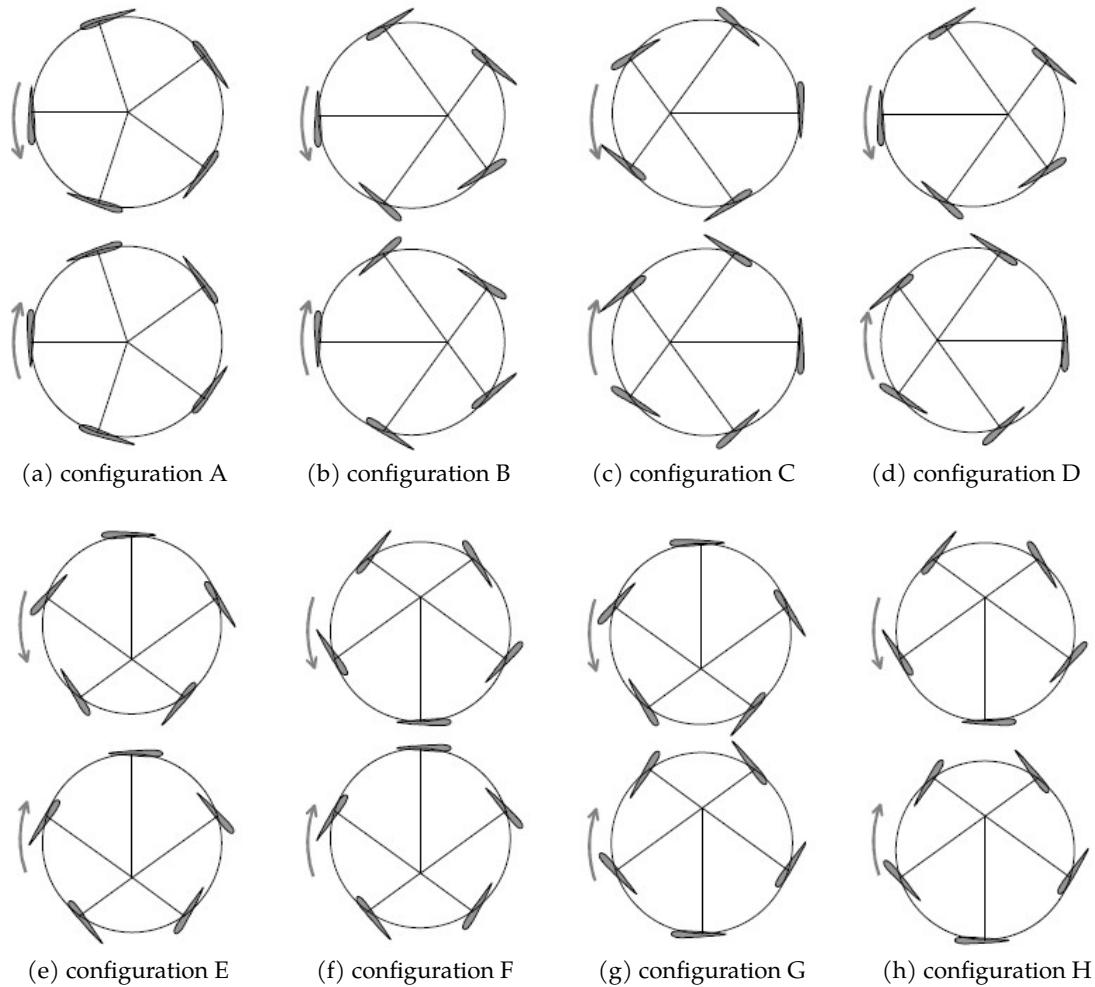


FIGURE 6 – Différentes configurations de commande

Q1.

Q1a. Pourquoi faut-il associer deux propulseurs contra-rotatifs ? Justifier votre réponse en quelques lignes.

Q1b. Parmi les configurations proposées dans la figure 6 retrouver celles correspondant aux manœuvres suivantes STOP, AVANT TOUTE, ARRIÈRE TOUTE, TRIBORD TOUTE (déplacement latéral).

C. Performances nominales : Fonction composante FP1.1.1.1-2 « Animer le point central »

L'orientation des pales se fait à l'aide d'une tringlerie actionnée par une jambe verticale (7) dont on positionne le centre de la rotule supérieure en un point dit de consigne. Cette position de consigne impose alors à chaque pale une orientation angulaire, fonction de sa position relative sur le disque (3).

C.1. Analyse géométrique de la fonction composante FP1.1.1.1-2.3 « Transmettre le mouvement »

Objectifs :

- déterminer la mobilité du mécanisme de positionnement du centre C de la rotule supérieure,
- déterminer les lois de pilotage des vérins (1) et (2) pour obtenir la position de consigne,
- mettre en évidence la non-linéarité du couplage des mouvements générés.

On raisonnera, pour traiter cette partie, à partir du schéma cinématique spatial de la figure 7

La commande d'orientation des pales consiste à déplacer le centre C de la rotule supérieure à l'aide des vérins (1) et (2). La position de consigne du point C est repérée en coordonnées polaires par (ρ, β) dans le plan $(J, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$.

Les élongations des vérins sont notées λ pour le premier et μ pour le second (cf. fig.7).

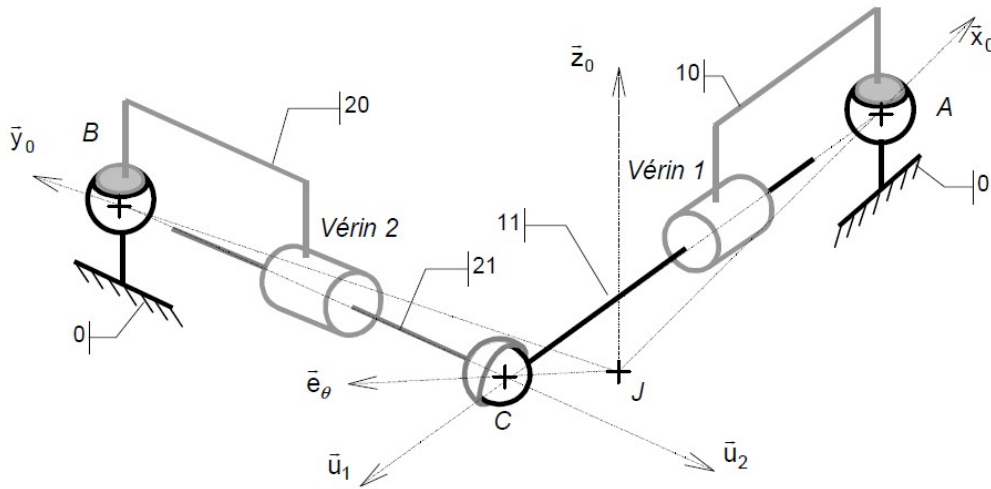


FIGURE 7 – Schéma cinématique spatial limité à la commande

En terme de propulsion, l'angle polaire θ permet d'orienter la direction de la poussée, tandis que le rayon polaire ρ permet d'accentuer ou de diminuer l'incidence des pales vis-à-vis de l'écoulement et donc l'intensité de la poussée.

Q2.

Q2a. Faire le graphe des liaisons à partir du schéma cinématique du mécanisme (cf. fig.7).

Q2b. Le mécanisme étant isostatique, justifier que le mécanisme est mobile de degré $m = 7$. Préciser chacune de ces mobilités.

Q2c. Combien faut-il imposer de paramètres géométriques pour obtenir une position déterminée du point C dans le plan $(J, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$?

Le pilotage couplé des vérins (1) et (2) (élongations notées respectivement λ et μ), positionnent le point C. La position de consigne de C est paramétrée par ρ et θ .

Remarque : Dans un souci de simplification, on suppose que le problème reste plan, en particulier, on ne tient pas compte du fait que le point C se déplace formellement sur une sphère de centre O, mais qu'il reste dans le plan.

On raisonnera, pour traiter cette partie, dans le plan et à partir du schéma cinématique plan de la figure 8.

Q3.

Q3a. Déterminer les expressions littérales de λ et μ en fonction de ρ , θ et μ .

Q3b. Justifier alors la non-linéarité et le couplage des élongations des vérins.

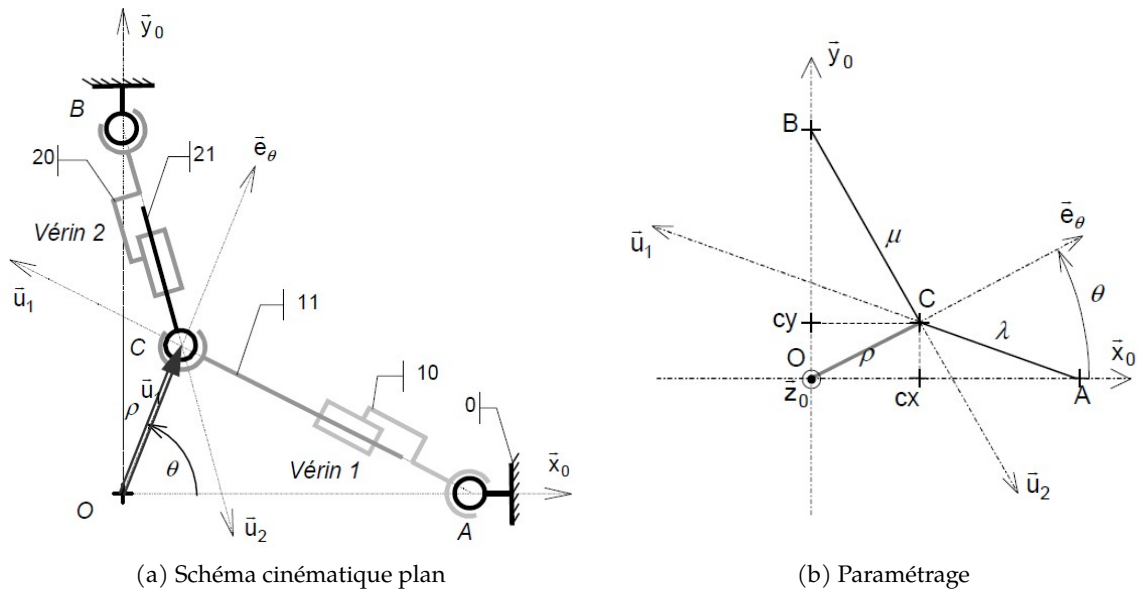
On se place dans le cas d'une configuration particulière où les élongations respectives des vérins (1) et (2) sont telles que : $\frac{3}{4} \cdot L < \lambda < \frac{5}{4} \cdot L$ et $\frac{3}{4} \cdot L < \mu < \frac{5}{4} \cdot L$, les points extrêmes (mini et maxi pour chaque vérin) sont repérés sur la figure du document réponse page 13 par des réticules (+).

Q4.

Q4a. Tracer (en noir) sur l'épure page 13 le contour de la zone dans laquelle il est possible de positionner le point C.

Q4b. Compléter votre figure par l'esquisse (en bleu) de la trajectoire du point C lorsque l'on pilote les vérins (1) et (2) en partant du point $(\lambda = \frac{9}{8} \cdot L, \mu = L)$ et avec le cycle de pilotage suivant :

- premier temps : μ varie de L à $\frac{9}{8} \cdot L$, λ inchangé,
- deuxième temps : λ varie de $\frac{9}{8} \cdot L$ à $\frac{7}{8} \cdot L$, μ inchangé,
- troisième temps : μ varie de $\frac{9}{8} \cdot L$ à $\frac{3}{4} \cdot L$, λ inchangé.



$$\begin{array}{lll}
 - \vec{OA} = L \cdot \vec{x}_0 & - \vec{OC} = \rho \cdot \vec{e}_\theta & - \vec{BC} = \mu \cdot \vec{u}_2 \\
 - \vec{OB} = L \cdot \vec{y}_0 & - \vec{AC} = \lambda \cdot \vec{u}_1 &
 \end{array}$$

FIGURE 8 – Schéma et modélisation

Q4c. En supposant que les vérins (1) et (2) soient pilotés de telle sorte que, en permanence ($\lambda = \mu$), déterminer le lieu du point C en coordonnées polaires (ρ, θ) et exprimer le rayon polaire ρ en fonction de λ .

Q4d. Montrer que la valeur limite théorique de λ_{min} est inférieure à $\frac{3}{4} \cdot L$. Déterminer son expression. Sur la figure, indiquer le point C correspondant à ce minimum d'élongation pour les deux vérins.

C.2. Analyse de la fonction composante FP1.1.1.1-2.3 « Transmettre le mouvement »

Objectifs :

- mettre en évidence l'hyperstatisme de la chaîne cinématique correspondante,
- proposer une solution isostatique.

La cinématique est conçue de manière à ce que les pales changent continûment d'incidence vis-à-vis de l'écoulement, afin que la composante de portance soit globalement toujours orientée dans la même direction, ce que réalise le tringlerie schématisée sur la figure ci-dessous.

Cette tringlerie permet d'imposer aux pales une position angulaire (et donc une incidence) à partir de la position de consigne imposée au point E (centre de la linéaire annulaire inférieure de la jambe (7)).

Pour toute la suite, on ne considère que le mouvement plan de la tringlerie de commande d'orientation des pales dans le plan $(J, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$.

Q5.

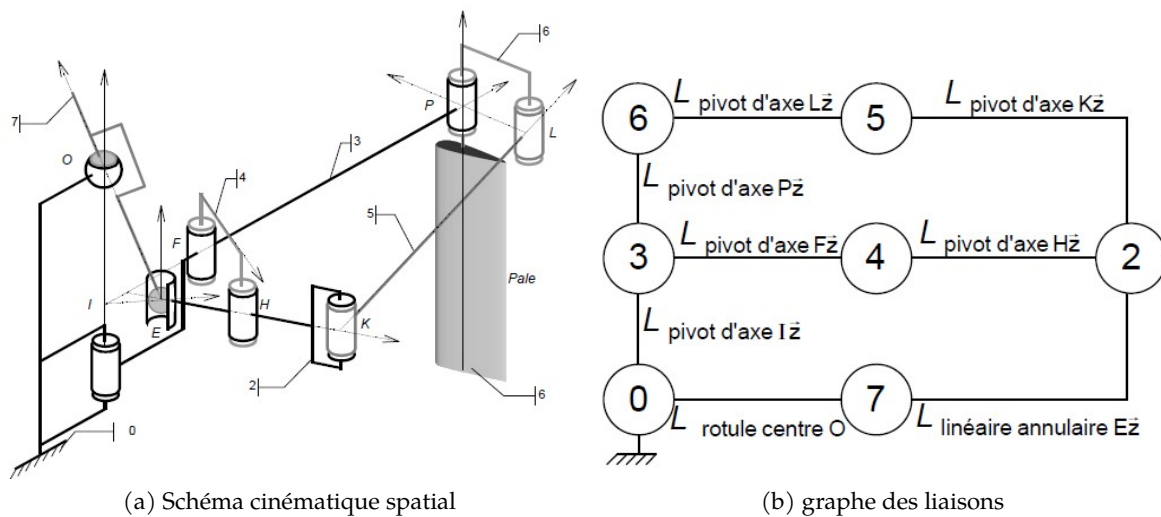
Q5a. À partir du graphe des liaisons, évaluer le degré de mobilité puis déterminer le degré d'hyperstatisme du mécanisme de commande d'orientation d'une pale (limitée à la chaîne fermée : $3 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 3$).

Q5b. Proposer une nouvelle solution sous la forme d'un graphe de liaison limité à cette chaîne pour rendre cette chaîne fermée isostatique en modifiant le nombre minimum de liaison.

Q6.

Q6a. Quelle relation existe-t il entre la position du point C (ρ_C, θ_C) et celle de E, sachant que $OE = OC$?

Q6b. Donner la réponse en précisant les coordonnées polaires de E (ρ_E, θ_E) dans le plan $(J, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$.



(a) Schéma cinématique spatial

(b) graphe des liaisons

FIGURE 9 – Schéma cinématique de l'orientation des pales

D. Etude graphique complémentaire

Analyse cinématique de la fonction composante FP1.1.1.1-2.3 « Transmettre le mouvement »

Objectifs :

- mettre en évidence le changement continu d'incidence des pales lors de la rotation du disque,
- mettre en place une stratégie pour déterminer la loi entrée-sortie du mécanisme de commande d'orientation des pales $\alpha = f(\theta, \beta, \dots)$.

Pour toute la suite, on notera les coordonnées polaires du point E supposé fixe dans (0).

La géométrie du mécanisme est telle que lorsque le point E se trouve en I, les pales ont toutes une incidence nulle lors de la rotation du disque (3). Le déplacement du point E provoque un changement d'incidence des chacune des pales via la tringlerie (2-4-5) liée au disque (3) et à la pale (6).

Hypothèse : On s'intéresse à un système VSP à quatre pales en vue de dessus et pour lequel le disque d'entraînement (3) tourne dans le sens trigonométrique. On se place dans une configuration donnée (celle du document réponse), on suppose que le point E est maintenu dans une position de consigne fixe par rapport au bâti (0).

Q7.

Q7a. En se plaçant dans cette configuration, compléter le document réponse page 2 qui propose une vue d'un des ensembles (pale + tringlerie) par une épure où vous ferez apparaître les points F, H, K, P et L pour la pale **suivante** du disque (3).

Q7b. Faites clairement apparaître l'angle d'incidence de la pale précédente par un angle orienté. Mesurer sa valeur en degrés ($^\circ$).

Q8.

Q8a. A partir de ces deux chaînes cinématiques fermées, déterminer par fermeture vectorielle et angulaire, le système d'équations à résoudre en θ , β et α qui permettrait d'obtenir l'angle d'incidence d'une pale α en fonction de β , ρ et θ . Justifier $(\vec{e}_\theta, \vec{e}_\rho)$ comme base de projection optimale. Il n'est pas demandé de résoudre ce système.

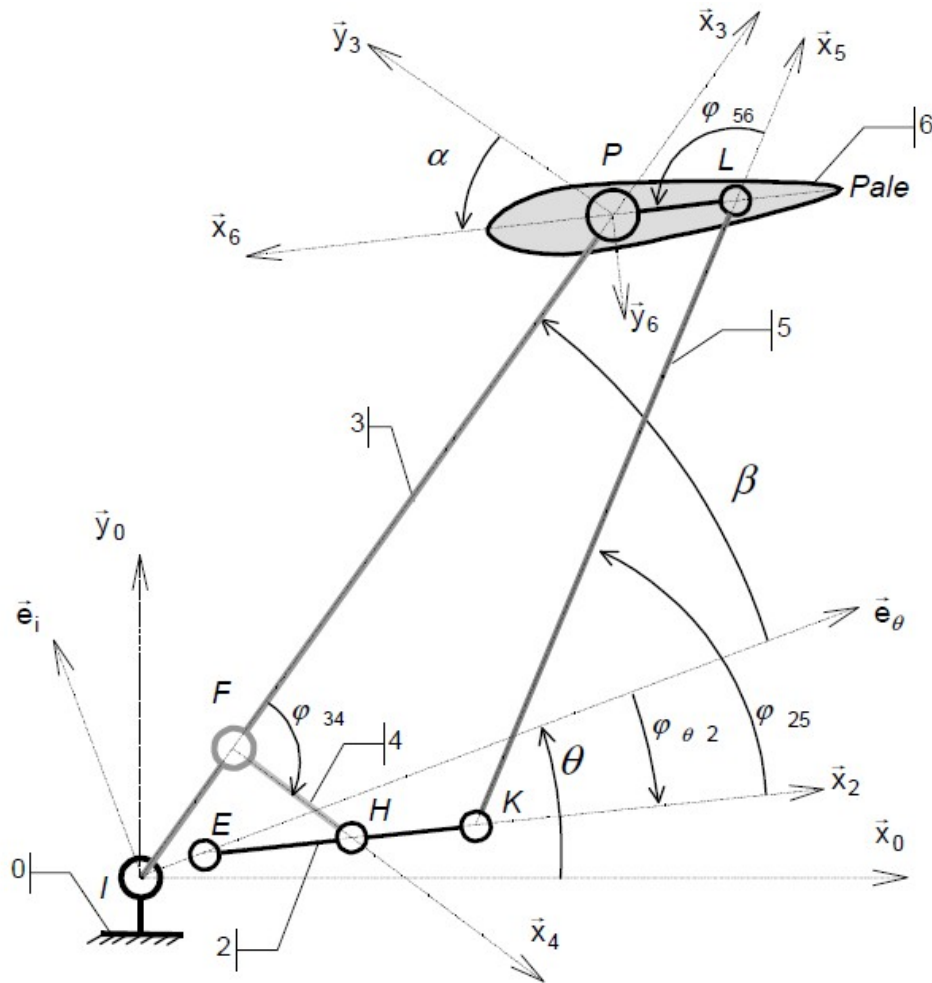
Q8b. Justifier le fait que le système obtenu permettrait d'obtenir une relation de la forme $\alpha = F(\theta, \beta, r, R, e, L, c, \rho)$ dans laquelle **n'apparaît pas d'autre paramètre angulaire**.

Q9. Cinématique graphique (document réponse page 15) : vos constructions ne seront pas commentées, mais vous ferez clairement apparaître les perpendicularités, parallélismes, CIR, etc. L'usage de la couleur est fortement conseillé.

Q9a. A partir de la seule indication de $\vec{V}_{P \in 6/0}$, construire graphiquement le vecteur vitesse $\vec{V}_{K \in 2/0}$ en ayant indiqué le CIR de $2/0 : I_{2/0}$.

Q9b. Construire alors le vecteur vitesse $\vec{V}_{L \in 6/0}$.

Q9c. Déterminer graphiquement la position du CIR de $5/0 : I_{5/0}$ pour cette configuration.



(a) Schéma cinématique de l'orientation des pales

- $\vec{IE} = \rho \cdot \vec{e}_\theta$
- $\vec{EH} = \vec{EK} = d \cdot \vec{x}_2$
- $\vec{IF} = r \cdot \vec{x}_3$
- $\vec{FH} = e \cdot \vec{x}_4$
- $\vec{KL} = L \cdot \vec{x}_5$
- $\vec{LP} = c \cdot \vec{x}_6$
- $\vec{IP} = R \cdot \vec{x}_3$

(b) Paramétrage

FIGURE 10 – Orientation des pales

Annexes

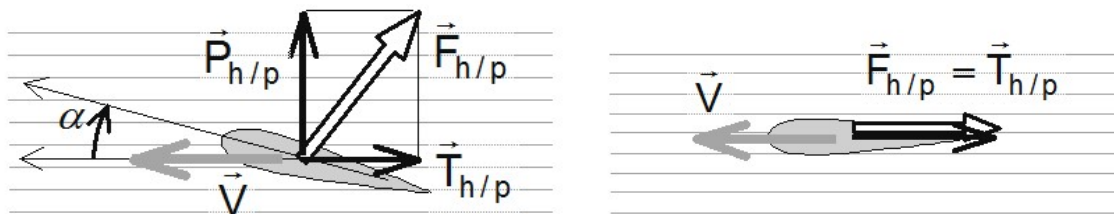
A-1. Principe hydrodynamique de portance

L'hydrodynamique du propulseur VSP est basé sur le principe de la portance d'une pale avançant dans un fluide à la vitesse (V) avec une incidence α , portance due aux actions mécaniques du champ de pression hydrodynamique.

D'une manière générale, la résultante des actions mécaniques de pression sur une pale est un glisseur noté $\vec{F}_{h/p}$ qui s'applique en P (centre de poussée) (cf. fig 11).

On a pour habitude de projeter cette résultante sur l'axe de l'écoulement et sur sa perpendiculaire de manière à faire apparaître naturellement :

- la composante de traînée $\vec{T}_{h/p}$.
- la composante de portance $\vec{P}_{h/p}$



(a) position portante (incidence α non nulle)

(b) position portante (incidence nulle)

FIGURE 11 – Mise en évidence des composantes de traînée et portance de la poussée

La composante utile est la portance $\vec{P}_{h/p}$, qui est nulle si l'incidence α est nulle, la composante parasite est la traînée $\vec{T}_{h/p}$ qui n'est jamais nulle quelle que soit l'incidence.

A-2. Photo du mécanisme réel

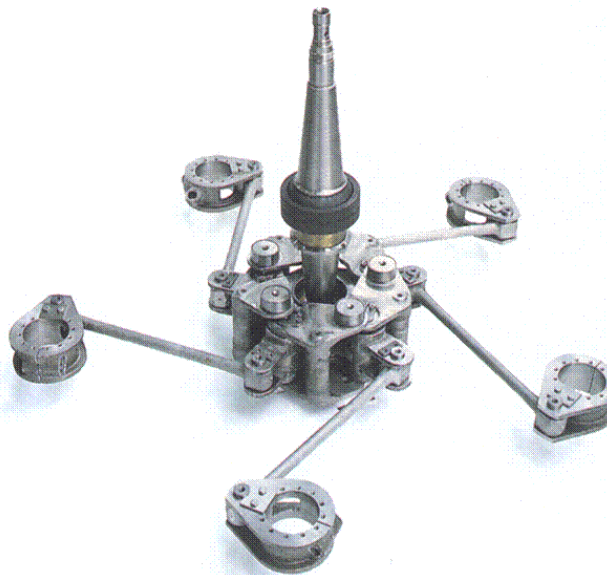
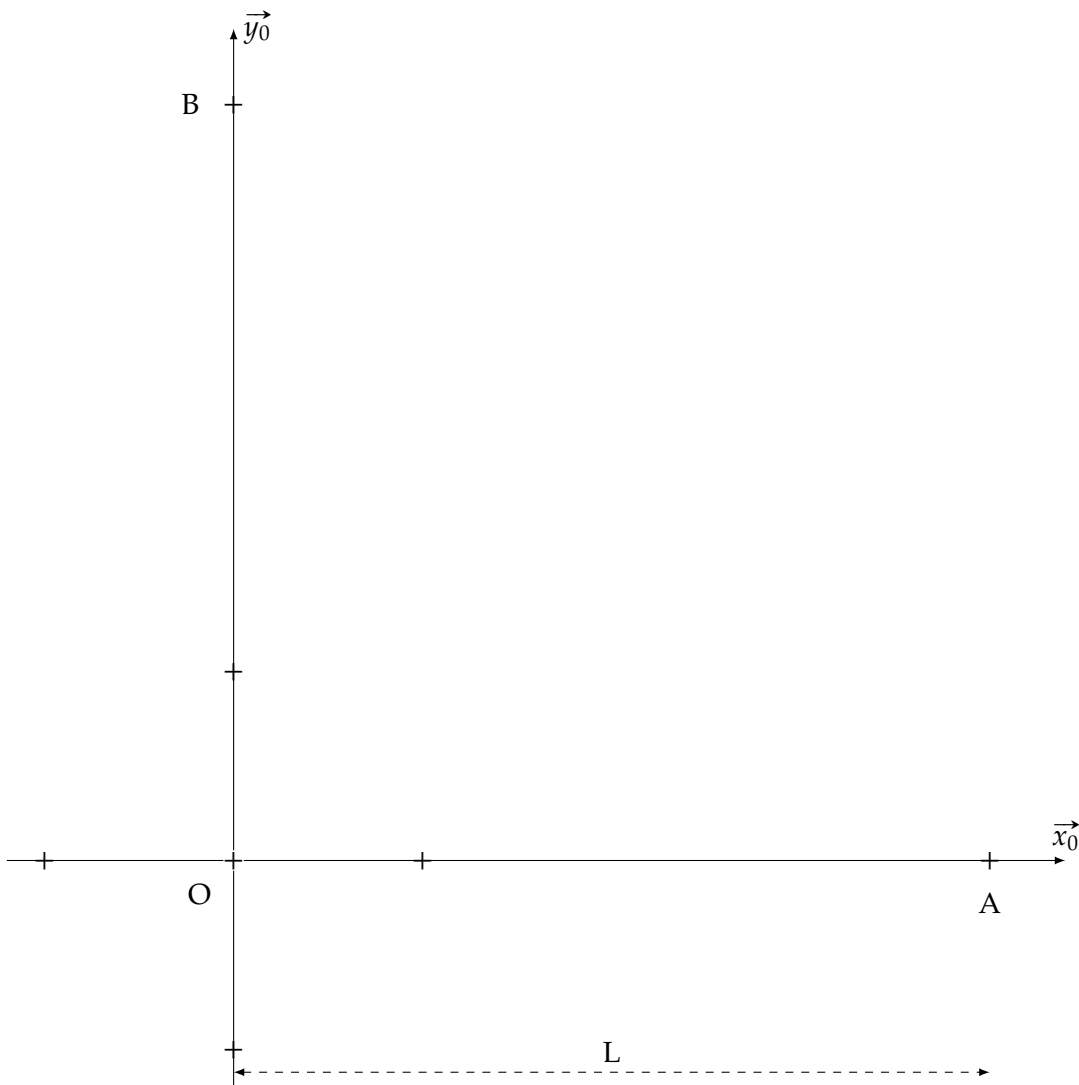


FIGURE 12 – Photo du mécanisme réel

Documents réponses

DR-1. Épure
Compléter l'épure



DR-2. Épure géométrique

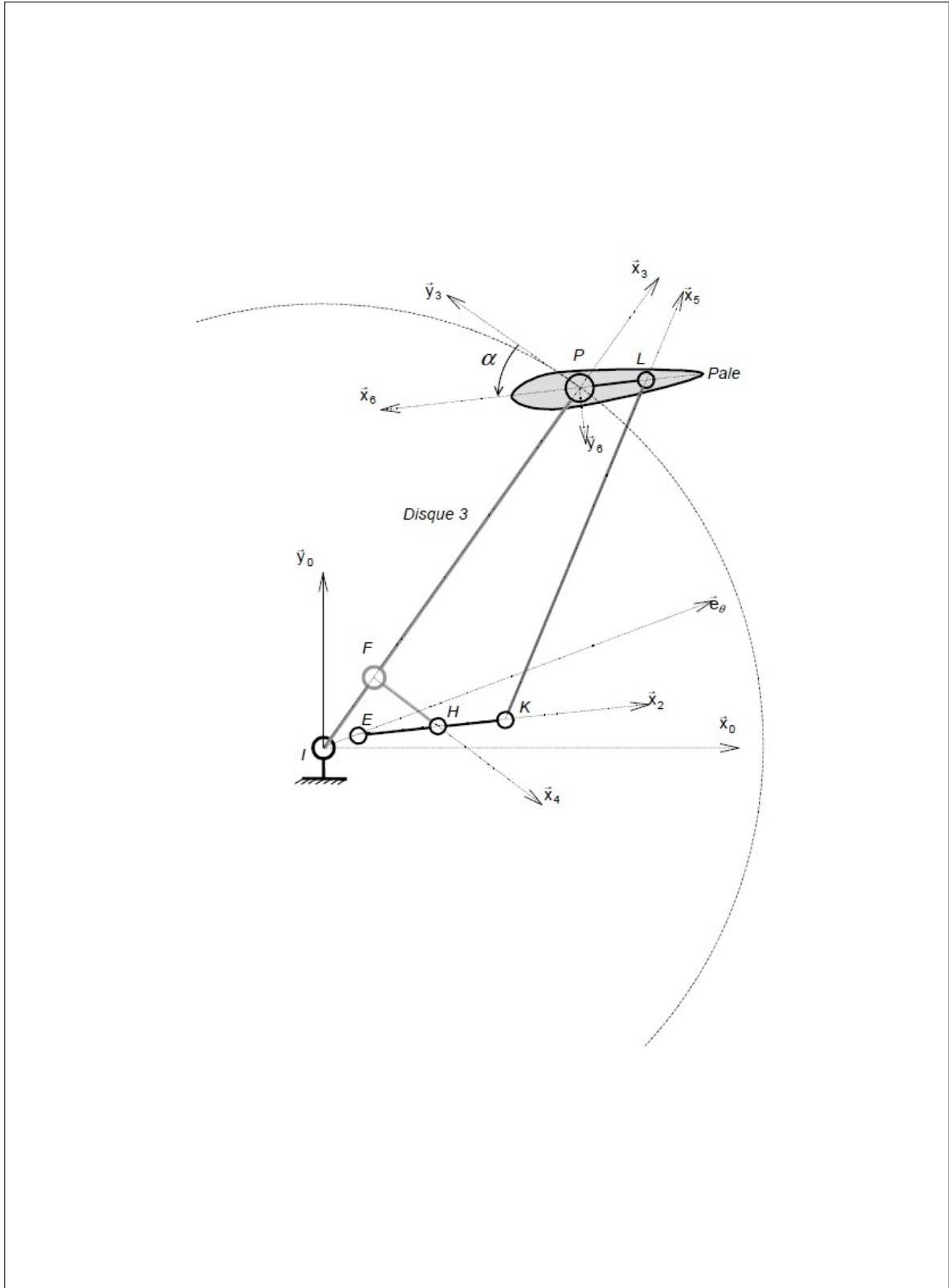


FIGURE 13 – Épure géométrique à compléter

DR-3. Épure cinématique

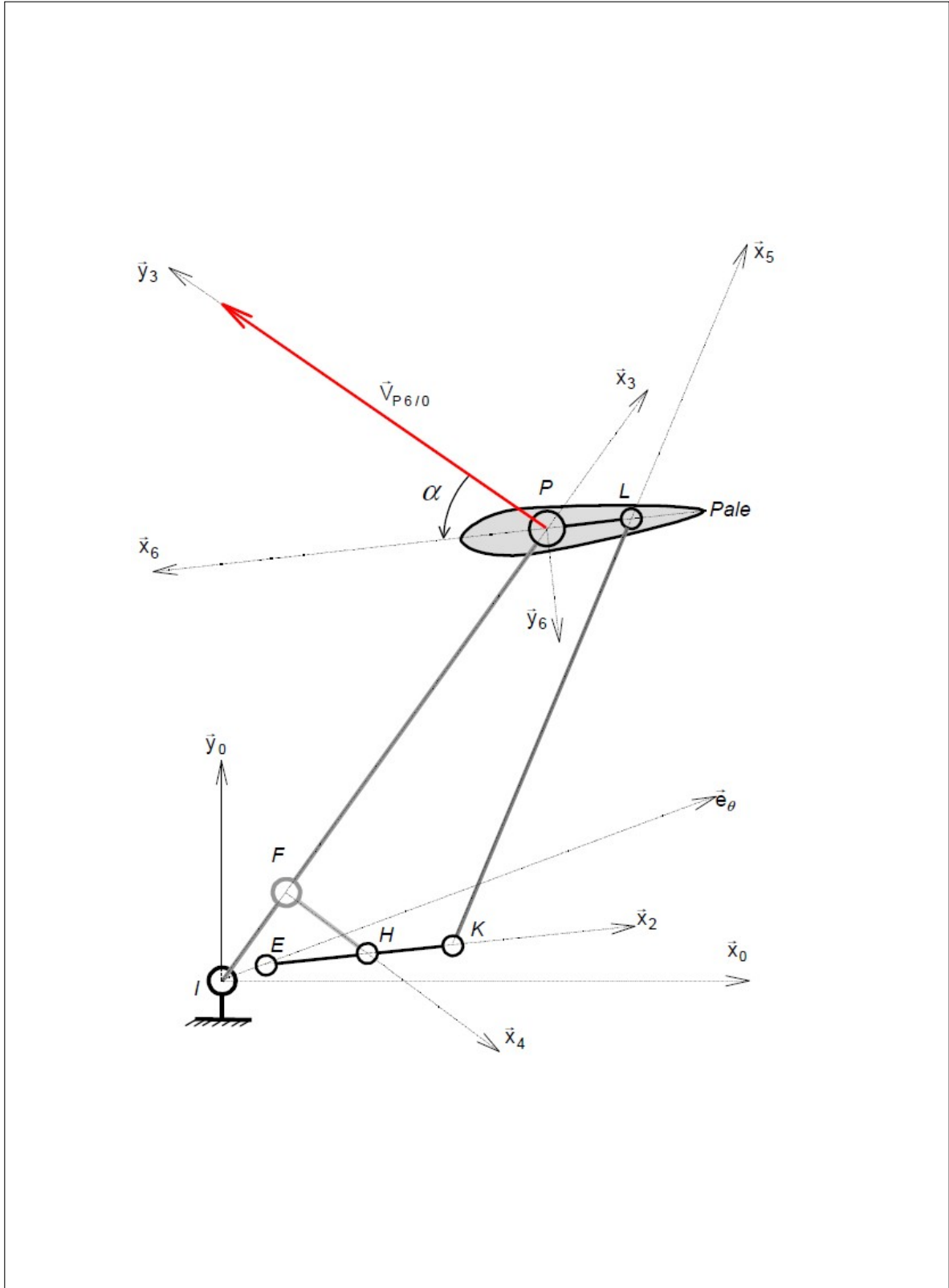


FIGURE 14 – Épure cinématique à compléter