

ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES,
ÉCOLES NATIONALES SUPÉRIEURES DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE,
DE TECHNIQUES AVANCÉES, DES TÉLÉCOMMUNICATIONS,
DES MINES DE PARIS, DES MINES DE SAINT-ETIENNE, DES MINES DE NANCY,
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS DE BRETAGNE,
ÉCOLE POLYTECHNIQUE (FILIÈRE TSI)

CONCOURS D'ADMISSION 2000

ÉPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES

Filière : PSI

(Durée de l'épreuve : 4 HEURES)

Sujet mis à la disposition des concours : ENSTIM, INT, TPE-EIVP

Cet énoncé comporte 15 pages de texte et 8 pages de documents annexes. Le travail doit être reporté sur une copie de 12 pages distribuée avec le sujet. Pour valider cette copie, chaque candidat doit obligatoirement y inscrire à l'encre, à l'intérieur du rectangle d'anonymat situé en première page, ses nom, prénoms (souligner le prénom usuel), numéro d'inscription et signature, avant même d'avoir commencé l'épreuve.

Il est conseillé de lire la totalité de l'énoncé avant de commencer l'épreuve. Si au cours de l'épreuve le candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

Les questions sont organisées au sein d'une progression logique. Il est donc préférable de les traiter dans l'ordre proposé. Toutefois, ce sujet comporte plusieurs parties indépendantes.

L'usage d'ordinateur et de calculatrice est interdit.

Système de stabilisation pour navire à grande vitesse

La photographie ci-contre (Figure 1) représente un navire à grande vitesse de la SNCM qui assure la liaison entre la Corse et le continent en 3 heures 30 minutes (au lieu de 5 heures pour un ferry* classique).

La vitesse de croisière de ce navire est de 37 nœuds* (70 Km/h). Cette vitesse exceptionnelle pour un navire commercial est impulsée par quatre hydrojets : l'eau, aspirée dans les turbines, est éjectée sous pression créant ainsi une poussée qui propulse le navire. Cette technologie, empruntée aux scooters des mers, permet



Le NGV3 de la SNCM

Figure 1



Figure 2

Maquette du NGV3
Utilisée en bassin des
carènes

d'abandonner les hélices classiques et ainsi de réduire considérablement le tirant d'eau. Cet « hydrodynamisme » est renforcé par la longueur et la finesse de la coque (forme « semi-planante » en V profond) qui évoque les bateaux de course off-shore.

Le mode de propulsion utilisé et les formes de la coque ne peuvent assurer seuls ce niveau de vitesse. Pour l'atteindre, il est nécessaire de

réduire la surface mouillée de la carène* en générant une sustentation dynamique du navire et en minimisant les mouvements parasites de rotation de lacet*, roulis* et tangage*, ceci que la mer soit formée ou non. Un système de stabilisation active équipe ces navires. Il utilise des appendices ou « Foils ». Sur le NGV3, on

* Voir glossaire en « ANNEXE 1 »

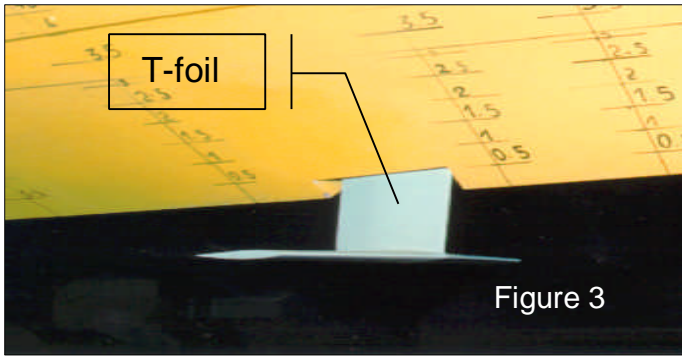


Figure 3

en trouve sept (voir les figures de 2 à 4): un « *T-foil* » à l'avant, deux « *Flaps* » arrières et quatre safrans inclinés ou « *Fins* ». Tous ces appendices garantissent la stabilité du navire et le confort des passagers. Ils sont en effet pilotés en « temps réel » par un ordinateur à partir des informations fournies par un ensemble de capteurs (le système sensoriel) et permettent de créer des actions mécaniques hydrodynamiques qui vont s'opposer à celles qui provoquent les

mouvements du navire réduisant ainsi leur amplitude.

La « vitesse » de ce navire se joue aussi aux escales : les manœuvres portuaires sont facilitées par deux propulseurs d'étrave et par deux hydrojets latéraux dont le jet orientable sert de gouvernail. L'embarquement et le débarquement des 500 passagers et de 148 véhicules (dont quatre autocars) s'effectuent en 20 minutes.

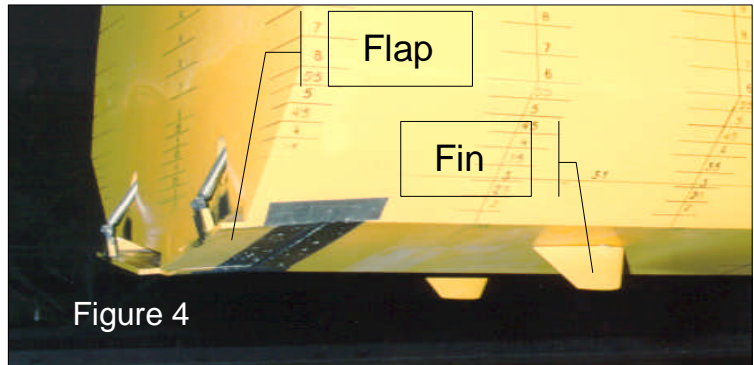
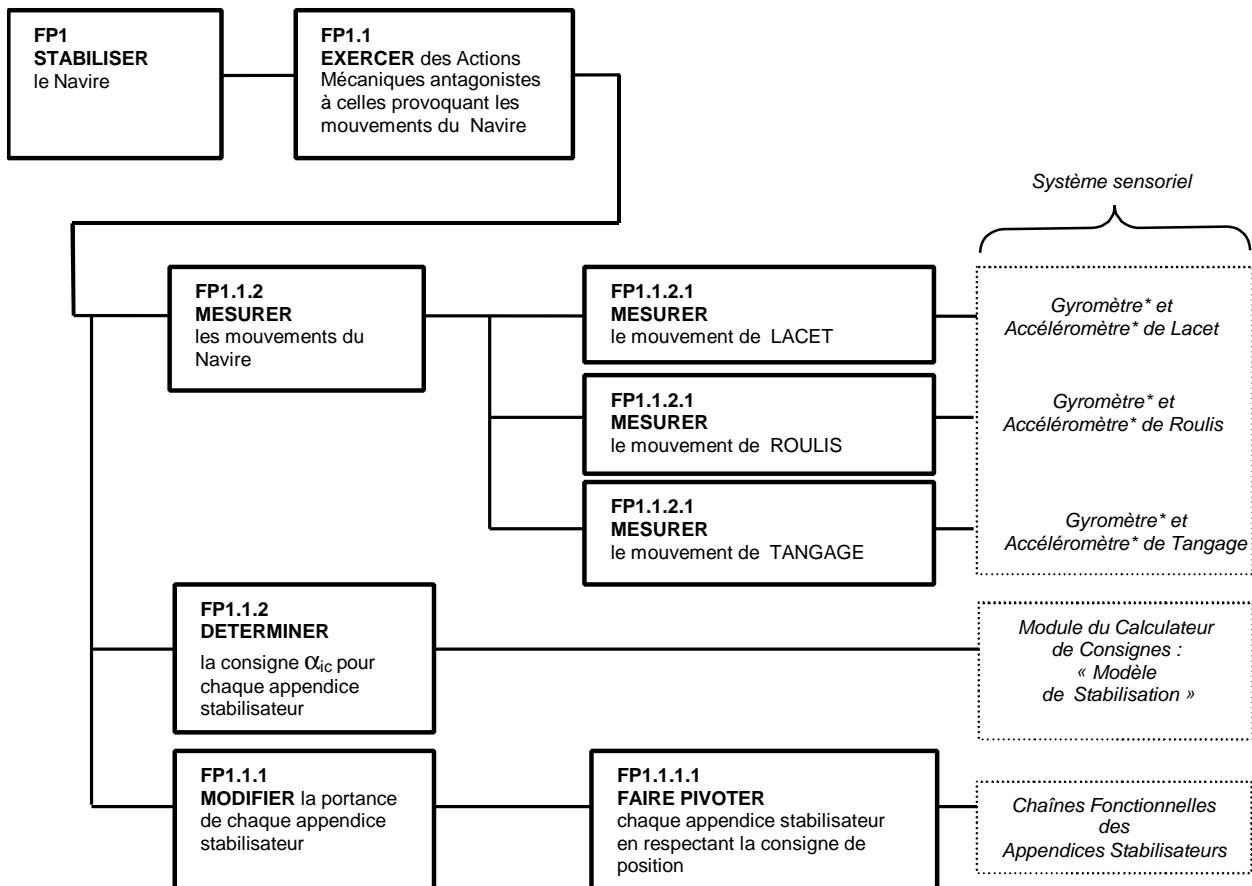


Figure 4

Du système que constitue le NGV3, l'étude qui va suivre isolera la fonction principale FP1 : « Stabiliser le navire ». La composition de cette fonction peut être



illustrée par le diagramme F.A.S.T. représenté ci-dessous.

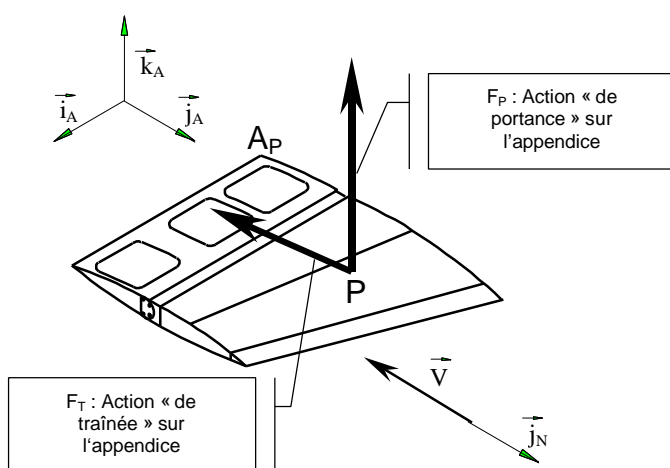
A - ANALYSE FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLE

1- Analyse de la Partie Opérative : fonction composante FP1.1 : « Exercer des actions mécaniques antagonistes à celles provoquant les mouvements du navire »

Objectifs:

- ↳ mettre en évidence le rôle de chaque appendice ;
- ↳ identifier les appendices (ou effecteurs) à activer pour chaque mouvement à stabiliser ;
- ↳ mettre en évidence les couplages de mouvements générés par les effecteurs.

Un bassin d'essai des carènes ou « bassin des carènes » est constitué d'un plan d'eau instrumenté sur lequel il est possible de tester des appendices ou des maquettes de navire comme celle du NGV3 de la figure 2.



Dans un tel bassin, l'appendice ci-contre auquel est associé le repère $R_A : (A_P; \vec{i}_A, \vec{j}_A, \vec{k}_A)$ est placé dans un écoulement d'eau de mer dont la vitesse de déplacement par rapport au repère $R_N : (G_N; \vec{i}_N, \vec{j}_N, \vec{k}_N)$ lié au navire est \vec{V} . Les essais montrent alors qu'il est soumis de la part de l'eau à une action mécanique modélisée par un glisseur que l'on peut exprimer dans la

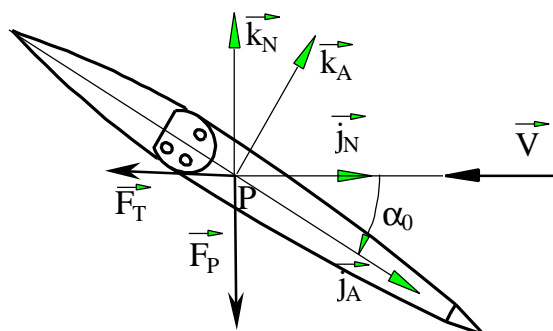
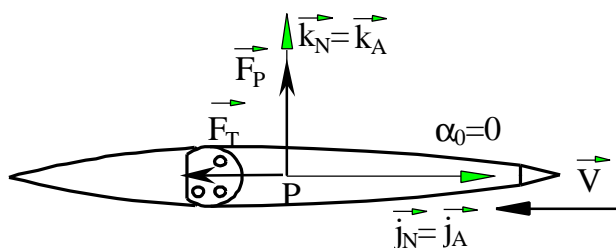
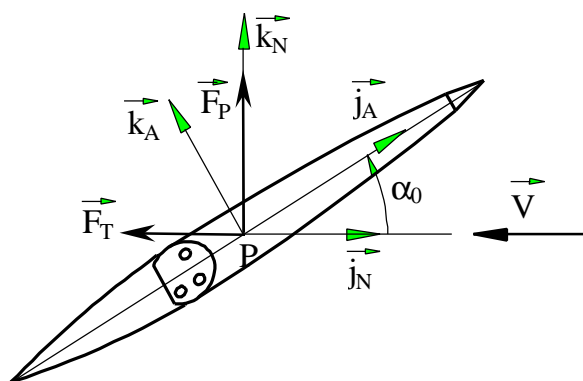
base B_N sous la forme
$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{e \rightarrow l} = F_P \cdot \vec{k}_N + F_T \cdot \vec{j}_N \\ \vec{M}(P, e \rightarrow l) = \vec{0} \end{array} \right\}$$
 où :

- P est le « centre de poussée » ;
- F_P est l'action mécanique de portance (valeur algébrique) ;
- F_T est l'action mécanique de traînée (valeur algébrique).

La section de l'appendice (obtention du « profil » hydrodynamique de l'appendice) par le plan $(P; \vec{j}_A, \vec{k}_A)$, met en évidence l'angle d'incidence α_0 mesuré entre les bases B_A et B_N .

Les lois de l'hydrodynamique montrent que $|F_P| = K \cdot C_z$ et $|F_T| = K \cdot C_y$ avec :

- K : coefficient numérique dépendant de la masse volumique de l'eau et de la forme du profil ;
- C_z : coefficient de portance variant en fonction de l'angle d'incidence α_0 (voir figures ci-dessous) ;
- C_y : coefficient de traînée variant en fonction de l'angle d'incidence α_0 (voir figures ci-dessous).



La figure R1 de la copie, représente sous différentes directions d'observation, la maquette du NGV3 munie de ses appendices. Le point G_N est son centre de gravité.

Cette maquette est supposée soumise à l'action d'un courant d'eau de direction de déplacement $(-\vec{j}_N)$.

Question 1A

- Représenter en couleurs sur la figure R1 de la copie, **les projections dans la base** $(\vec{i}_N, \vec{j}_N, \vec{k}_N)$ **des seules actions mécaniques de portance** telles qu'elles doivent apparaître sur les appendices concernés pour s'opposer :
 - a- à l'amorce du seul mouvement de roulis autour de l'axe (G_N, \vec{j}_N) dans le sens positif ;
 - b- à l'amorce du seul mouvement de tangage autour de l'axe (G_N, \vec{i}_N) dans le sens positif .

NB : les actions de portance n'étant pas chiffrées, seuls leur direction et leur sens seront significatifs.

Question 2A

- En remplissant le tableau de la copie, identifier (par le symbole **X**) les appendices dont les actions mécaniques de portance ont une influence sur la correction des mouvements indiqués.

Question 3A

- Expliquer ce que signifie la notion de couplage des mouvements du navire générés par les différents effecteurs.

2- Analyse des flux d'information

⇒ Objectif :

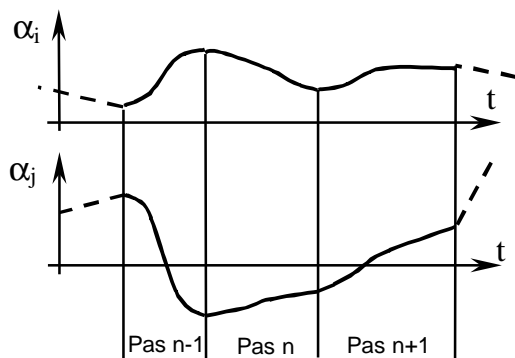
- ↳ Etablir le diagramme fonctionnel du système de stabilisation active ;
- ↳ Etablir le modèle de coordination des mouvements des appendices.

La figure R2 de la copie donne l'ébauche du diagramme fonctionnel correspondant au système formé par le navire et son système de stabilisation.

Sur ce diagramme fonctionnel, les quantités α_{ic} correspondent aux consignes de déplacement angulaires des effecteurs permettant, par modification de l'angle d'incidence et donc la portance, d'obtenir la stabilisation. Les fonctions $t \rightarrow \alpha_i(t)$ donnent les lois d'évolution en fonction du temps des angles de rotation de chaque appendice par rapport au navire (ou angle de calage) pour atteindre la consigne α_{ic} .

Question 4A

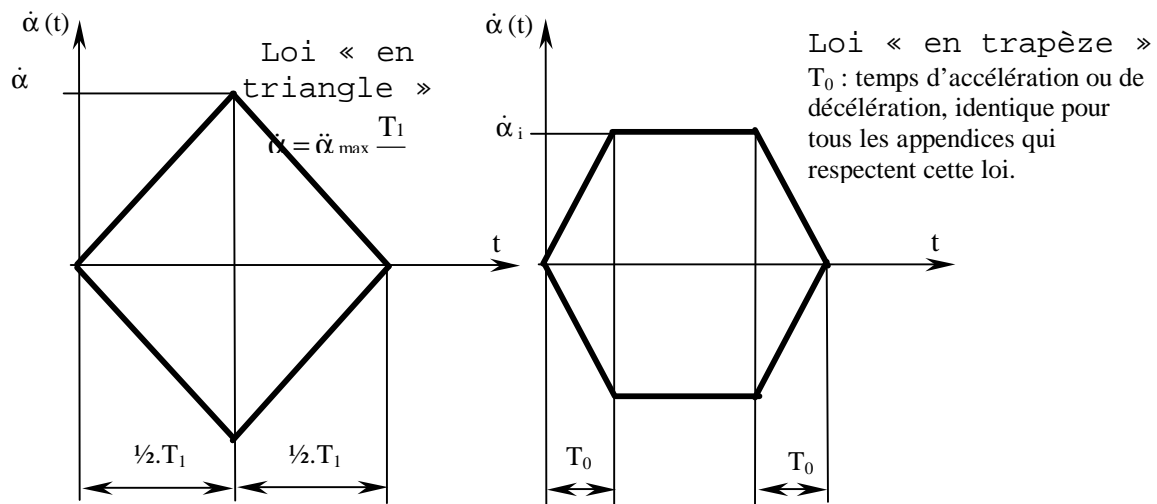
- A l'aide des diagrammes F.A.S.T. de la fonction FP1 et de la fonction FP1.1.1.1 (donné au document « ANNEXE 2 »), compléter ce diagramme fonctionnel. Préciser en particulier le nom du constituant ou l'information devant figurer dans les cases repérées par une *.
- Quelles valeurs numériques des consignes $\text{cons}(\theta_L)$, $\text{cons}(\theta_R)$, $\text{cons}(\theta_T)$ sont utilisées pour assurer le confort optimal des passagers ?



Lorsque le système de stabilisation est actif, les mouvements des sept appendices se font de manière séquentielle (pas à pas) suivant le schéma temporel donné ci-contre. Dans cet exemple seuls les mouvements de deux appendices parmi les sept ont été représentés.

Remarque : l'allure des lois d'évolution des angles de calage α_i et α_j en fonction du temps est purement indicative et ne correspond pas à l'allure réelle des courbes.

A chaque pas, pour atteindre la consigne de position voulue, les appendices évoluent en suivant l'une ou l'autre des lois de commande « en vitesse » données ci-dessous.



Le modèle de commande est donné par les graficets G0, G1, G2, G3 et G4 présentés sur le document « ANNEXE 3 ». Le tableau ci-dessous donne la signification des notations symboliques employées dans ce document et dans le document «ANNEXE 4».

Notation Symbolique	Signification	Provenance/Situation	Nature
init	Initialisation des appendices	Pupitre de commande	Entrée TOR*
act	Activation du système de stabilisation	Pupitre de commande	Entrée TOR
desact	Désactivation du système de stabilisation	Pupitre de commande	Entrée TOR
au	Arrêt d'urgence	Pupitre de commande	Entrée TOR
acquit	Autorisation de réactivation après incident	Pupitre de commande	Entrée TOR
$\alpha_i(t)$	Loi de consigne de position instantanée de l'appendice n°i	Générateur de consignes	Variable interne
mes(α_i)	Mesure de l'angle de calage de l'appendice n°i	Codeur position	Grandeur numérique
EIL	Ecart Instantané Limite admissible (valeur identique pour tous les appendices)	Mémoire "programme"	Constante
$\alpha_i(n)$	Position absolue visée au pas n pour l'appendice n°i	Programme de calcul	Variable interne
$\dot{\alpha}_{\max}$	Vitesse angulaire maximale admissible des appendices (valeur identique pour tous les appendices) $\dot{\alpha}_{\max} = 0,5 \text{ rd/s}$	Mémoire "programme"	Constante
$\ddot{\alpha}_{\max}$	Accélération angulaire maximale admissible des appendices (valeur identique pour tous les appendices) $\ddot{\alpha}_{\max} = 1 \text{ rd/s}^2$	Mémoire "programme"	Constante
α_{M1}	Angle pilote 1	Programme de calcul	Variable interne
α_{M2}	Angle pilote 2	Programme de calcul	Variable interne
$\dot{\alpha}_i$	Vitesse angulaire maximale visée pour l'appendice n°i	Programme de calcul	Variable interne
$\ddot{\alpha}_i$	Accélération angulaire maximale visée pour l'appendice n°i	Programme de calcul	Variable interne
T_1		Programme de calcul	Variable interne
T_0		Programme de calcul	Variable interne

* Voir glossaire en « ANNEXE 1 »

Question 5A

- En considérant les situations (ensemble des étapes actives à l'instant considéré) définies ci-après, définir les commandes à délivrer via le pupitre pour atteindre à partir de la situation S0, la situation S1, puis à partir de S1 la situation S2 et enfin à partir de S2 directement la situation S3.
 $S0 = \{0, 10, 20, 30\}$; $S1 = \{1, 13, 20, 30\}$; $S2 = \{2, 10, M21, 30\}$; $S3 = \{0, 10, 20, 30\}$.
- Etant en situation S2, l'arrêt d'urgence est actionné, définir la situation atteinte.
- Définir alors la procédure à suivre pour réactiver le système de stabilisation.

Question 6A

- Quel est l'intérêt de la commande modélisée par le Grafcet G4 ? Commenter en quelques lignes.

L'expansion de la macro-étape M21 est donnée sur le document «ANNEXE 4». Le système de commande est dans la situation : $\{2, 10, 25, 30\}$. Le calcul des consignes de position à atteindre a fourni les résultats suivants :

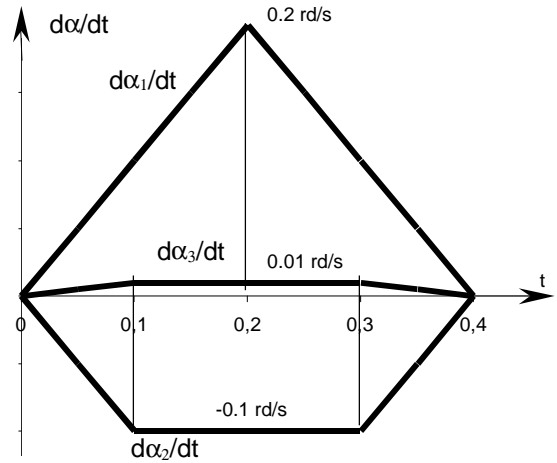
$$\alpha_{1c} = 7,2/\pi^\circ \quad \alpha_{2c} = -5,4/\pi^\circ$$

$$\alpha_{3c} = 0,54/\pi^\circ \quad \alpha_{4c} = \alpha_{5c} = \alpha_{6c} = \alpha_{7c} = 0^\circ.$$

Question 7A

- Exprimer à l'aide des valeurs numériques données ci-dessus les valeurs affectées aux variables α_{M1} et α_{M2} lors des séquences (26, 27) et (28, 29).

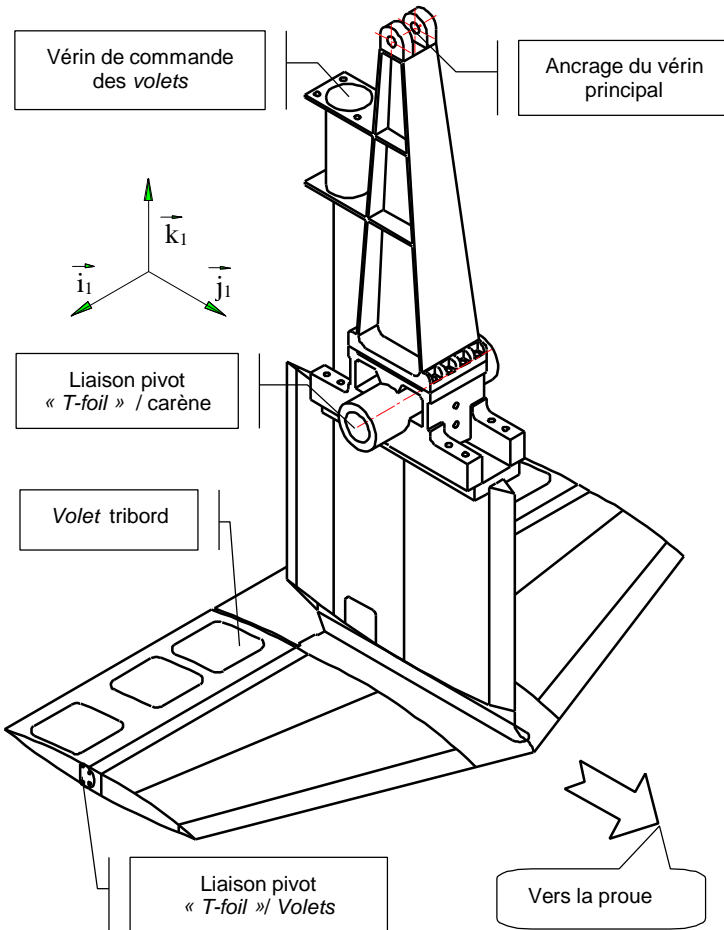
A l'issue de la macro-étape, on obtient les lois de vitesses $\dot{\alpha}_1(t)$, $\dot{\alpha}_2(t)$ et $\dot{\alpha}_3(t)$ représentées sur la figure ci-contre.



Question 8A

- On considère la séquence des étapes 30 à 35. Compléter le tableau du document réponse en faisant apparaître, pour chaque valeur de la variable i (colonne 1) :

- En colonne 2 : la suite des étapes activées entre l'étape 30 et l'étape 35 ;
 - En colonne 3 : les éléments du graphe construits à partir des calculs effectués dans la séquence considérée.
- Commenter le choix fait par le concepteur du système pour gérer les mouvements des sept appendices à chaque pas.



B – VERIFICATION DES PERFORMANCES

Chaîne Fonctionnelle associée au «T-foil»

Le «T-foil» (en forme de T renversé, voir figure ci-contre) est l'appendice actif le plus massif. Il est situé à l'avant du navire, dans son plan de symétrie. Il est en liaison pivot d'axe (O, \vec{i}_1) avec la carène du navire. Un vérin dit « vérin principal » permet l'animation de cette liaison. Deux volets en liaison pivot avec le «T-foil» sont actionnés simultanément par un vérin secondaire embarqué sur le «T-foil».

1- Performances nominales : fonction composante FP1.1.1.1-2.3 : « Transmettre le mouvement »

⇒ Objectifs:

- ↳ établir la loi entrée-sortie de la chaîne de commande du «*T-foil*» ;
- ↳ linéariser cette loi.

Le document « ANNEXE 5 » représente le modèle cinématique de la chaîne de commande du «*T-foil*», ainsi que le paramétrage utile.

Le paramètre d'entrée de la chaîne de commande est λ . Le paramètre de sortie est l'angle de calage α .

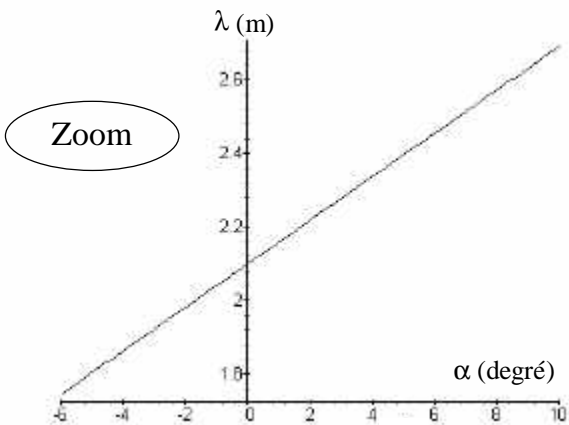
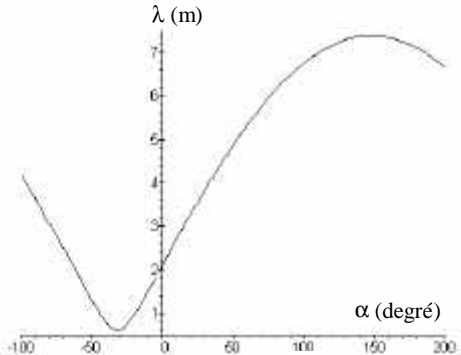
Question 1B

- Etablir la loi géométrique d'entrée-sortie, soit $\lambda = f(\alpha)$.

La figure ci-contre et son « zoom » donnent la courbe représentative de cette loi $\lambda = f(\alpha)$.

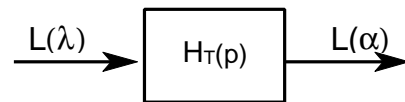
Le domaine utile d'évolution de α est $[-5^\circ, 9^\circ]$.

Soit $L[\lambda](p)$, et $L[\alpha](p)$, les transformées de Laplace de λ et α .



Question 2B

- En linéarisant $\lambda = f(\alpha)$ autour du point de fonctionnement $\{\alpha=0^\circ, \lambda = 2,1 \text{ m}\}$, exprimer la fonction de transfert $H_T(p)$ du schéma-bloc ci-dessous.



2- Performances dynamiques des constituants opératifs : fonction composante FP1.1.1.1-2.4 : « Résister sans rupture aux actions mécaniques extérieures »

⇒ Objectifs:

- ↳ évaluer les effets dynamiques dus aux mouvement du navire et du «*T-foil*» sur ce dernier;
- ↳ déterminer les efforts maximaux sur la structure du navire pour dimensionner la liaison avec le «*T-foil*», l'étude se limitant à deux composantes, l'une de force, l'autre de moment.

Les mouvements du navire de repère $(O; \vec{i}_N, \vec{j}_N, \vec{k}_N)$, par rapport au repère $(O; \vec{i}_G, \vec{j}_G, \vec{k}_G)$ **considéré comme galiléen** dans cette étude, sont limités aux mouvements de roulis et de tangage. Sur le NGV stabilisé ou non, le mouvement de lacet est pour cette étude d'effets négligeables et en conséquence, $\theta_L = \dot{\theta}_L = 0$.

Modèle de calcul

Le mouvement de tangage est maintenant modélisé par la rotation d'angle θ_T entre la base galiléenne $(\vec{i}_G, \vec{j}_G, \vec{k}_G)$ et la base intermédiaire $(\vec{i}_G, \vec{j}_N, \vec{u})$.

Le mouvement de roulis est modélisé par la rotation d'angle θ_R entre la base $(\vec{i}_G, \vec{j}_N, \vec{u})$ et la base liée au navire $(\vec{i}_N, \vec{j}_N, \vec{k}_N)$.

Le système de commande du «*T-foil*», impose une vitesse angulaire de rotation maximale $\dot{\alpha}_{\max}$ de 0,5 rd/s, et une accélération angulaire $\ddot{\alpha}_{\max}$ maximale de 1 rd/s².

Le calcul des vitesses et accélérations angulaires maximales que peuvent atteindre les mouvements de tangage ($\dot{\theta}_T$ et $\ddot{\theta}_T$) et de roulis ($\dot{\theta}_R$ et $\ddot{\theta}_R$) montrerait qu'elles sont petites devant $\dot{\alpha}_{\max}$ ou $\ddot{\alpha}_{\max}$ dans les conditions de navigation (houle, vent...) rencontrées par les Ferries de la SNCM que le navire soit stabilisé ou non.

Les quantités $\dot{\theta}_T, \ddot{\theta}_T, \dot{\theta}_R$ et $\ddot{\theta}_R$ seront donc négligées dans la suite de l'étude.

Actions mécaniques d'inter-efforts navire/«*T-foil*» : dimensionnement de la liaison pivot

Soit Σ le système matériel constitué des solides **1, 5 et 4**. Les conditions de l'étude sont telles que :

- le mouvement du navire par rapport au repère galiléen R_G est tel que :
 - la vitesse du point O du navire dans son mouvement par rapport au repère galiléen est $\vec{V}(O, N/R_G) = a_{cc}.t. \vec{j}_G$ où a_{cc} est l'« accélération » du navire en exploitation commerciale. Cette accélération est au maximum de 0,88.g m/s² (où g est l'accélération de la pesanteur) lorsque la stabilisation est active et de 0,2.g m/s² lorsqu'elle n'est pas activée ;
 - il est soumis uniquement au tangage et roulis, d'angle θ_T et θ_R ;
- les *Volets* arrière du «*T-foil*» sont bloqués en position $\gamma = 0$;
- le point G tel que $\vec{OG} = -L_G \vec{k}_1$ est centre de gravité de Σ ($L_G = 1,8$ m) ;
- la masse de Σ est $m_\Sigma = 6000$ Kg ;
- la matrice d'inertie du système Σ exprimée en G dans la base $(\vec{i}_1, \vec{j}_1, \vec{k}_1)$ est

$$[I(G, \Sigma)]_{(\vec{i}_1, \vec{j}_1, \vec{k}_1)} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & B & -D \\ 0 & -D & C \end{bmatrix}_{(G; \vec{i}_1, \vec{j}_1, \vec{k}_1)}$$

Question 3B

- Exprimer en fonction de $L_G, \dot{\alpha}$ et a_{cc} , la vitesse de G dans le mouvement de Σ par rapport à R_G : $\vec{V}(G, \Sigma/R_G)$.

Question 4B

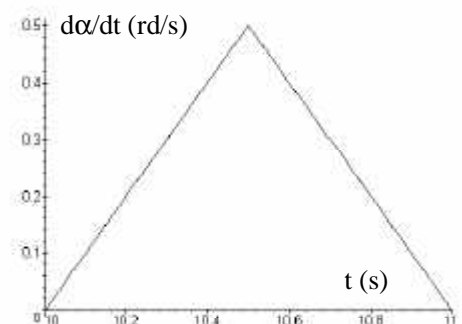
- Exprimer en fonction de $L_G, \alpha, \theta_T, \theta_R, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}$ et a_{cc} , la projection sur \vec{k}_N de l'accélération de G dans le mouvement de Σ par rapport à R_G : $a_{ZN} = \vec{a}(G, \Sigma/R_G) \cdot \vec{k}_N$.

Question 5B

- Exprimer en fonction de $L_G, \alpha, \theta_T, \theta_R, a_{cc}$ et m_Σ , la projection sur \vec{j}_N du moment dynamique exprimé en O de Σ dans son mouvement par rapport à R_G : $D_{OYN} = \vec{\delta}(O, \Sigma/R_G) \cdot \vec{j}_N$.

Le document « ANNEXE 6 » représente les lois d'évolution des quantités a_{ZN} et D_{OYN} en fonction du temps lorsque :

- les hypothèses de calcul précédemment énoncées sont respectées :
 - tangage et roulis à vitesses et accélérations angulaires négligées ;
 - navire « en accélération » avec $a_{cc} = 0.88.g$ m/s² lorsqu'il est stabilisé et $a_{cc} = 0.2.g$ m/s² lorsqu'il ne l'est pas ;
- le «*T-foil*» est, lorsque le navire est stabilisé, commandé à $t = 10$ s sur toute son amplitude de déplacement angulaire ($\alpha \in [-5^\circ, 9^\circ]$) à l'aide d'une loi de mise en vitesse « en triangle » (voir ci-contre) lui permettant d'atteindre la vitesse angulaire maximale (0,5 rd/s) avec l'accélération angulaire maximale (1 rd/s²).



Question 6B

- Evaluer les valeurs maximales:
 - de la composantes sur la direction \vec{k}_N de la résultante du torseur dynamique de Σ dans son mouvement par rapport à R_G ;
 - de la composante sur la direction \vec{j}_N du moment en O de ce torseur.

Les actions mécaniques de contact sur le «*T-foil*» dont seule l'« aile » tribord est supposée soumise à l'action de l'eau de mer, sont modélisées de la façon suivante (voir document « ANNEXE 7 ») :

- (C ; \vec{F}_V) : action mécanique qu'exerce le vérin principal sur le «*T-foil*» au point d'ancrage C ($\vec{F}_V = F_V \vec{j}_{23}$ où F_V est algébrique) ;
- (P ; \vec{F}_P) : action mécanique « de portance » qu'exerce le fluide sur l'« aile » tribord du «*T-foil*» au centre de poussée P ($\vec{F}_P = F_P \vec{k}_N$ où F_P est algébrique) ;
- (P ; \vec{F}_T) : action mécanique « de traînée » qu'exerce le fluide sur sur l'« aile » tribord du «*T-foil*» au centre de poussée P ($\vec{F}_T = F_T \vec{j}_N$ où F_T est algébrique).
- torseur d'inter-effort (modèle de liaison parfaite) transmissible par la liaison pivot d'axe (O, \vec{i}_{1N}) entre le «*T-foil*» 1 et le navire N écrit au point O dans la base liée au navire:

$$\{N \rightarrow 1\} : \begin{cases} \vec{R}_{N1} = X_{N1} \vec{i}_N + Y_{N1} \vec{j}_N + Z_{N1} \vec{k}_N \\ \vec{M}(O, N \rightarrow 1) = M_{ON1} \vec{j}_N + N_{ON1} \vec{k}_N \end{cases}_{(\vec{i}_N, \vec{j}_N, \vec{k}_N)}$$

L'accélération de la pesanteur au lieu considéré est $-g \cdot \vec{k}_G$, où $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ pour cette question.

Question 7B

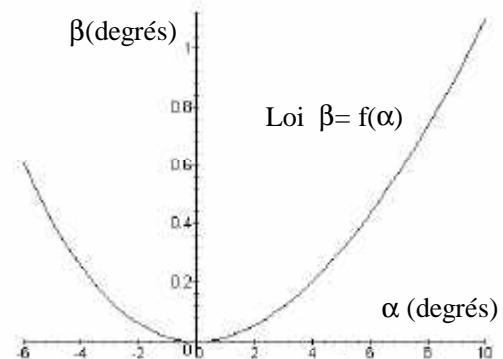
- Ecrire au point O, l'expression du Principe Fondamental de la Dynamique appliqué au système Σ dans son mouvement par rapport à R_G en détaillant les actions mécaniques concernées.
- Exprimer Z_{N1} et M_{ON1} en fonction des quantités F_P , F_T , F_V , m_Σ , g , α , β , θ_T , θ_R , des caractéristiques géométriques et des quantités évaluées à la question 6B.

Les actions mécaniques F_P , F_T et F_V ont été évaluées par essais : voir document « ANNEXE 7 ».

Pour un calcul de dimensionnement de la liaison pivot entre le «*T-foil*» et le navire il faut évaluer des majorants des composantes d'actions mécaniques d'inter-efforts de $\{N \rightarrow 1\}$.

Question 8B

- A l'aide du tableau du document « ANNEXE 7 » et de la courbe ci-contre qui donne $\beta = f(\alpha)$, et en choisissant à chaque fois dans le tableau le cas de charge le plus défavorable (que vous préciserez et justifierez clairement), calculer des valeurs qui majorent les quantités Z_{N1} et M_{ON1} .

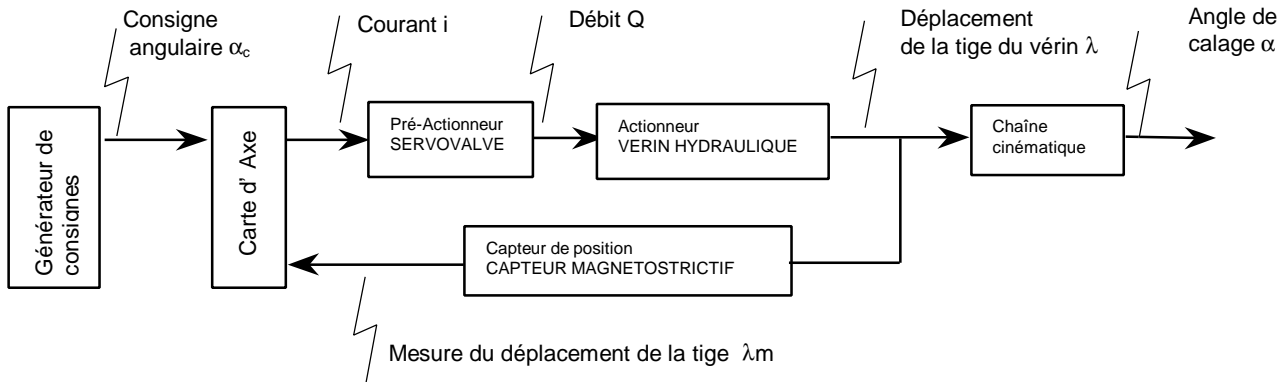


3- Performances dynamiques de la chaîne fonctionnelle associée au «*T-foil*»

Objectifs :

- ↳ Justifier la nécessité d'une commande en boucle fermée avec un pré-actionneur de bande passante élevée;
- ↳ Vérifier les critères du cahier des charges : précision, dépassement, rapidité ;
- ↳ Valider le correcteur proportionnel et son réglage ;
- ↳ Etudier l'influence de perturbations types.

Les données (schémas, caractéristiques, cahier des charges) relatives à cette partie sont rassemblées sur le document « ANNEXE 8 ». L'architecture fonctionnelle de cette chaîne répond à la structure définie ci-dessous.



- Le pré-actionneur pilotant le vérin est une servovalve qui délivre un débit hydraulique Q (en m^3/s) proportionnel au courant de commande i (en A) qu'elle reçoit en entrée. Dans sa documentation technique, le fabricant de servovalve propose un modèle du premier ordre de constante de temps T_s et de gain statique K_s pour ce composant.
- Le capteur de position est un capteur magnétostrictif intégré à la tige du vérin qui délivre une mesure de la position de cette tige par rapport au corps du vérin.

Les phénomènes hydrauliques liés à l'écoulement du fluide à travers les orifices de la servovalve, les canalisations et le vérin ont un caractère fortement non-linéaire. Néanmoins, moyennant certaines hypothèses le comportement du vérin peut être caractérisé par un modèle linéaire. Le modèle continu associé à cette chaîne est alors donné par le schéma de la Figure 1 du document « ANNEXE 8 » où apparaissent deux entrées, la consigne de position angulaire α_c et l'effort F appliqué par le «*T-foil*» sur la tige du vérin. Cet effort, résultant des actions hydrodynamiques sur l'appendice comme l'effort de traînée par exemple, est qualifié de grandeur de **perturbation** alors que α_c représente l'entrée de **consigne**.

Le comportement du vérin hydraulique présente ainsi deux aspects :

- un comportement « en position » modélisé par la fonction de transfert $H_v(p)$, définie par :

$$H_v(p) = \frac{\lambda_Q(p)}{Q(p)} = \frac{K_v}{p \cdot D(p)}$$

- un comportement « en effort » modélisé par la fonction de transfert $H_f(p)$. Cette fonction de transfert est obtenue avec consigne de position nulle ($\lambda_c=0$) lorsque la boucle de contrôle en position est **désactivée**. La modélisation retenue conduit à :

$$H_f(p) = \frac{\lambda_F(p)}{F(p)} = \frac{K_f}{D(p)}$$

Ces modélisations du vérin seront admises pour toute l'étude.

31-Performances de la chaîne de commande en position

L'étude du comportement de la boucle de commande est réalisée exclusivement en regard de l'entrée α_c indépendamment de la perturbation due à l'effort F .

L'étude du comportement dynamique de la chaîne ayant comme entrée α_c et comme sortie α , est conduite à partir de l'étude de la chaîne représentée Figure 2 du document « ANNEXE 8 » ; chaîne ayant comme entrée λ_c et λ comme sortie.

Question 9B

- En considérant que les transmittances $H_c(p)$ et $H_{cor}(p)$ sont équivalentes à des gains purs, quel écart statique présente le modèle d'étude proposé Figure 2 du document « ANNEXE 8 » ?

Question 10B

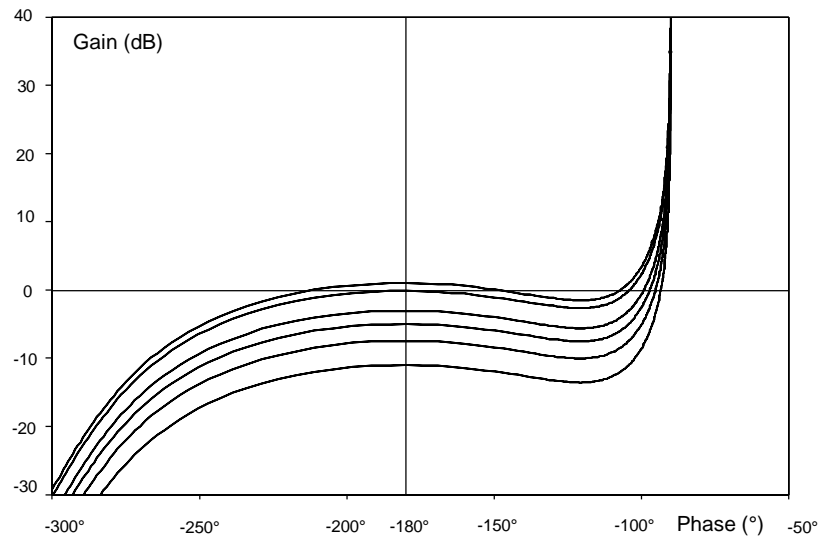
- Donner la valeur en (Hz) de la borne supérieure de la bande passante à 3dB, notée f_s , de la servovalve selon le modèle proposé par son fabricant.

On définit la fréquence f_v du vérin comme la fréquence pour laquelle le diagramme asymptotique d'amplitude de Bode présente une cassure. Le critère usuellement retenu en avant-projet consiste à choisir une servovalve dont la borne de bande passante f_s est deux à trois fois plus élevée que la fréquence f_v .

Question 11B

- Après avoir tracé les diagrammes **asymptotiques** de Bode d'amplitude de $H_s(j\omega)$ et $H_v(j\omega)$ comparer la fréquence de cassure, f_v à f_s . On donne : $\log(1,7) = 0,23$ et $\log(127) = 2,1$.
- Conclure sur le critère de bande passante précédemment évoqué.
- Quel est l'intérêt de choisir une servovalve à bande passante élevée ?

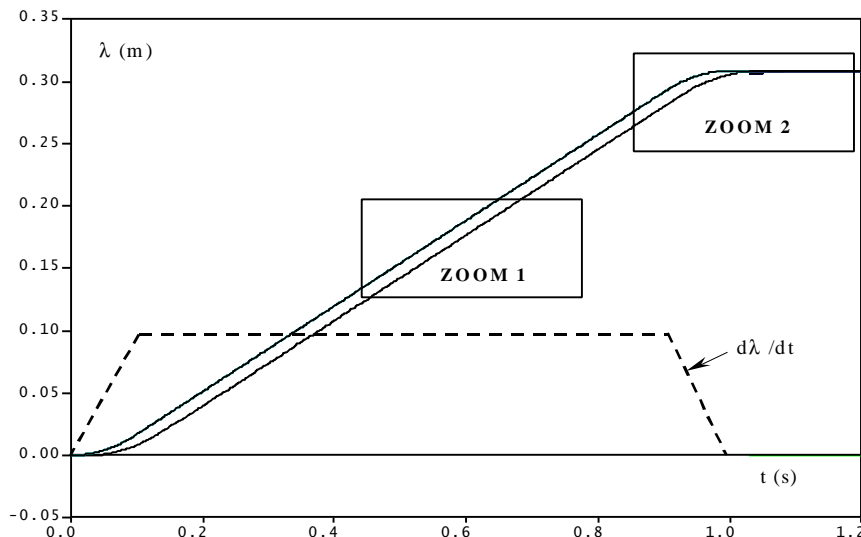
On considère que : $H_{cor}(p) = K$ (en mA/m) et $H_c(p) = 1$. Une simulation informatique a permis le tracé du lieu de transfert dans le plan de Black de la fonction de transfert complexe « en boucle ouverte » du modèle retenu (voir figure ci-dessous).



Ces courbes sont tracées pour la série des valeurs de K (en mA/m) suivante : [40,60,80,100,140,160].

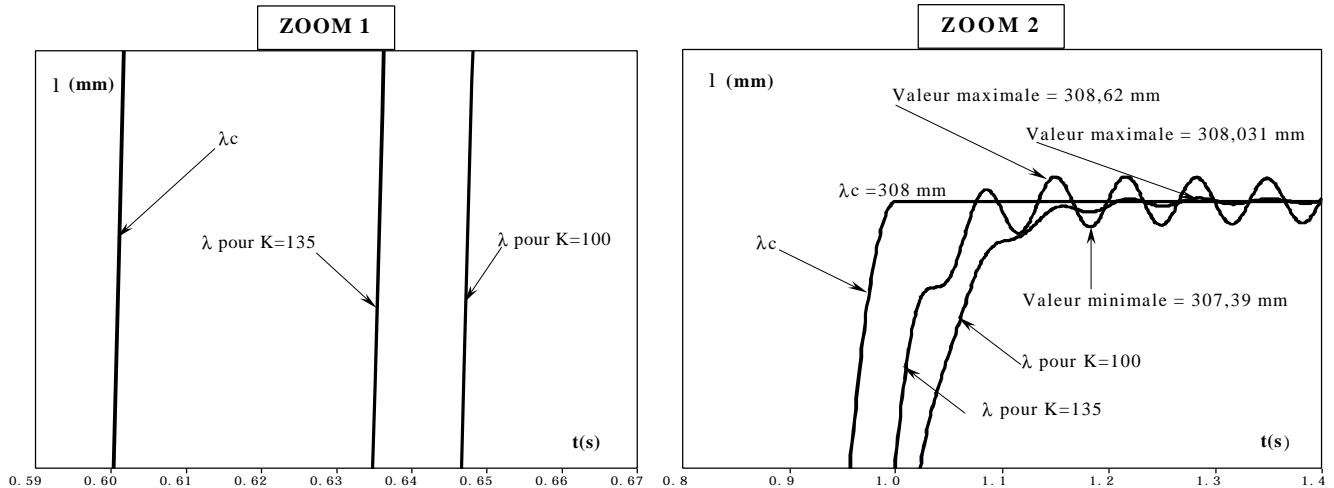
Question 12B

- Indiquer parmi les valeurs de K proposées celles qui sont acceptables du strict point de vue de la stabilité. Justifier votre réponse.



Afin que la détermination du correcteur se fasse dans des conditions proches de celles d'exploitation, la simulation est réalisée en utilisant une loi d'entrée reproduisant la loi réelle de commande de l'appendice. Cette loi de commande en position respecte la loi de conduite en vitesse, loi « en trapèze », précédemment définie. Les courbes de la figure ci-contre ainsi que celles de ses

« zooms » de la page suivante donnent les lois d'évolution de la consigne λ_c , de la position λ et de la vitesse $d\lambda/dt$ pour cette loi de vitesse. Les tracés sont donnés pour deux valeurs de K : 100 et 135 mA/m .



Question 13B

- Quelle valeur de K permet de satisfaire le critère de dépassement du cahier des charges ? Justifier.

Question 14B

On se place toujours dans la situation où la loi de commande « en trapèze » est utilisée et sur l'intervalle de temps où la vitesse est constante. On pose : $d\lambda/dt = v$.

- Donner l'expression de l'écart de traînage en régime établi ϵ_∞ en fonction de K , K_s , K_v et v . On note : $\epsilon_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} (\epsilon(t))$.
- Donner l'expression du retard de traînage en régime établi Ttr_0 en fonction de ϵ_∞ et v . En déduire l'expression de Ttr_0 en fonction de K , K_s et K_v .
- Déterminer la valeur minimale de K compatible avec le cahier des charges. L'évaluation se fera avec l'approximation : $1,7 \cdot 10^{-3} \times 127 \approx 0,2$.
- La valeur $K = 100$ permet-elle de satisfaire toutes les contraintes du cahier des charges ?
- Quelle est alors la valeur minimale EIL_0 à donner à EIL ? (EIL : écart de poursuite instantané limite utilisé dans le modèle de commande, document « ANNEXE 3 ».)

32-Performances de la boucle sous l'effet des seules perturbations

On pose : $H_s(p) = K_s = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s.mA}$; $H_{cor}(p) = K = 100 \text{ mA/m}$.

Question 15B

- En posant $\lambda_c = 0$, mais en considérant que la boucle de contrôle en position est toujours **active**, donner l'expression de $H1(p) = \lambda(p)/F(p)$ en fonction de p , K_f , K_s , K_v , K et $D(p)$.

La perturbation F est décomposée de la façon suivante : $F = F_1 + F_2$. Avec :

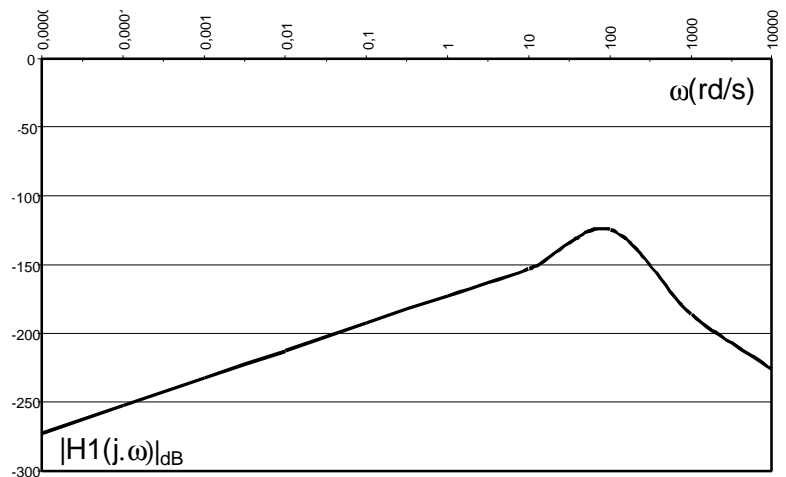
- F_1 : perturbation permanente correspondant aux actions de traînée et à ses fluctuations dues aux mouvements du navire.

$$F_1(t) = f_1 \cdot u(t) + \Delta f_1 \cdot \sin(10 \cdot t) \cdot u(t) \quad f_1 = 20 \text{ kN} \quad \Delta f_1 = 100 \text{ kN}$$

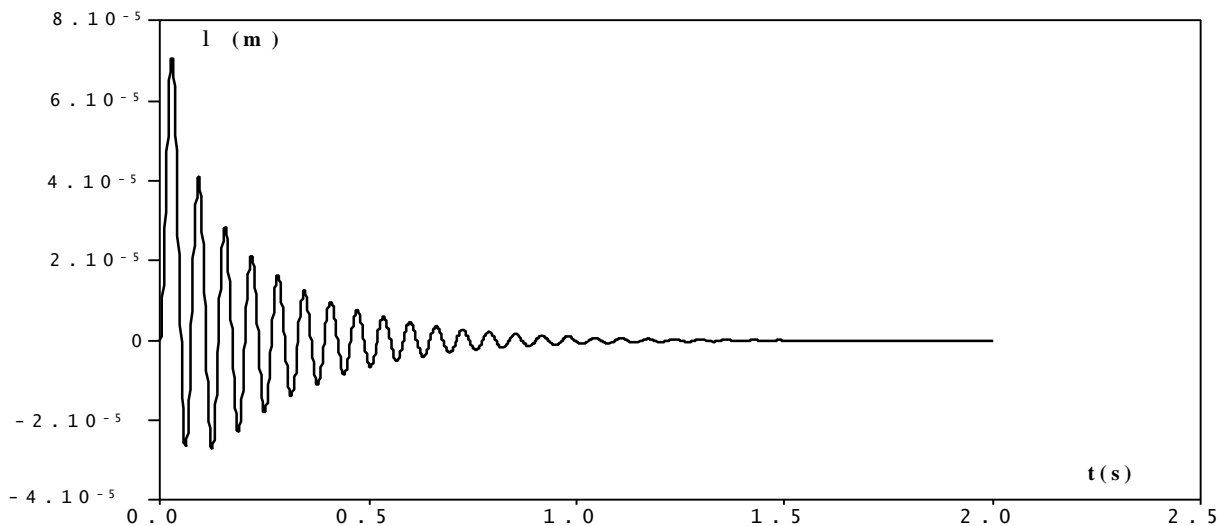
La fonction $u(t)$ est définie par $u(t) = 0$ si $t < 0$ et $u(t) = 1$ si $t \geq 0$.
- F_2 : perturbation accidentelle correspondant aux chocs avec les objets flottants, les mammifères marins, etc...

Question 16B

- Pour la composante de perturbation $\Delta f_1 \cdot \sin(10 \cdot t) \cdot u(t)$, calculer l'amplitude $\Delta \alpha_0$ des oscillations angulaires générées sur le «*T-foil*». On donne (voir figure ci-contre) le diagramme d'amplitude de Bode de $H1(j\omega)$ et l'approximation : $10^{7,5} \approx 3 \cdot 10^8$.
- Comparer $\Delta \alpha_0$ à la précision de positionnement. Conclure sur l'influence de cette composante de perturbation sur le comportement du navire.



La réponse temporelle du système correspondant à une entrée de perturbation de type échelon de la forme $F_0 \cdot u(t)$ est donnée par la figure ci-dessous.



Cette courbe tracée pour $F_0 = 1$ kN, met en évidence la présence d'un régime transitoire à caractère fortement oscillant.

Question 17B

- Au vu de cette courbe, évaluer l'erreur $\Delta \lambda$ sur la position finale. En déduire l'écart de position angulaire du «*T-foil*» consécutif à cette perturbation une fois le régime transitoire éteint, $\Delta \alpha^P$.
- Quelle particularité de $Hv(p)$ est à l'origine de cette valeur singulière ?
- A l'aide de la courbe ci-dessus, évaluer l'écart de position angulaire maximal, $\Delta \alpha^T$ généré par cette perturbation au cours du régime transitoire.
- Pour une entrée de perturbation de type échelon d'amplitude F_0 , quelle serait la valeur F_{01} de cette amplitude qui générerait un écart de position angulaire $\Delta \alpha^T$ de valeur égale à la précision de positionnement requise ($0,5^\circ$) ?

33- Synthèse : Comportement du système soumis aux entrées conjointes de perturbation et de consigne.

Le constructeur a dimensionné la chaîne cinématique de façon à résister à des sollicitations générant un effort sur la tige du vérin, F_{max} . ($F_{max} = 600$ kN). Toute sollicitation qui provoquerait un effort sur la tige du vérin supérieur à cette valeur limite entraînerait la rupture d'un des éléments de la chaîne cinématique et rendrait le «*T-foil*» totalement inopérant.

Le navire faisant route et étant soumis à la perturbation permanente F_1 depuis plusieurs heures, un incident de navigation génère, à un instant τ , une perturbation accidentelle F_2 modélisée par un échelon d'amplitude F_i .

$$F_2 = F_i \cdot u(t - \tau).$$

A la variable EIL définie document « ANNEXE 3 » est affectée la valeur $1,9^\circ$.

Question 18B

- Décrire la réaction du système à cet incident dans les deux cas définis dans le tableau suivant :

A l'instant τ	$F_i = 470 \text{ kN}$
$d\lambda/dt = v = \text{cste} \quad v \neq 0$	Cas 1
$d\lambda/dt = 0$	Cas 2

Dans chaque cas, indiquer :

- s'il y a rupture d'un élément de la chaîne cinématique;
- l'erreur maximale de position angulaire consécutive à l'incident ;
- si l'alarme décrite par le grafcet G4, document « ANNEXE 3 » se déclenche.

C – PRODUCTION DE SOLUTIONS

Adaptation de la commande aux conditions de navigation rencontrées : Partie Commande

➔ Objectif:

- ↳ construire une table d'adaptation de la commande aux « conditions de navigation ».
- ↳ donner les perspectives de développement de ce système d'assistance.

La « grande vitesse » du navire suppose que la commande des appendices de stabilisation soit adaptée aux conditions de navigation rencontrées.

GAINS G_T et G_R	Angle de route	0°	45°	90°	135°	180°
Hauteur de houle >3 m	Tangage (G_T)	90	90	70	80	90
	Roulis (G_R)	50	80	80	60	50
Hauteur de houle de 2 à 3 m	Tangage (G_T)	90	90	60	80	80
	Roulis (G_R)	50	70	80	60	50
Hauteur de houle de 1 à 2 m	Tangage (G_T)	80	80	50	70	70
	Roulis (G_R)	40	60	70	60	40
Hauteur de houle < 1 m	Tangage (G_T)	60	60	40	40	40
	Roulis (G_R)	30	40	50	40	30

Le timonier dispose à cet effet, dans le poste de pilotage, d'une table à deux entrées (voir ci-contre) donnant les valeurs numériques de deux paramètres G_T et G_R (ou « gains » de tangage et de roulis) utilisés dans le modèle global de stabilisation

Les valeurs de ces gains sont fonction de la hauteur de la houle, et

de la direction du navire par rapport à la direction de propagation de cette dernière (angle de route).

En fonction des conditions de navigation appréciées visuellement qui désignent une case de la table, le timonier saisit à l'aide d'un ordinateur les valeurs de G_T et G_R contenues dans cette case.

Le constructeur du système de commande souhaite rendre la saisie des valeurs des gains plus commode en construisant un « écran tactile » (voir figure ci-contre) reproduisant la table précédente. Une case est « activée » quand elle correspond aux conditions de navigation observées.

Chaque case de l'« écran tactile » est désignée par T_{ij} , où i est le numéro de ligne et j le numéro de colonne.

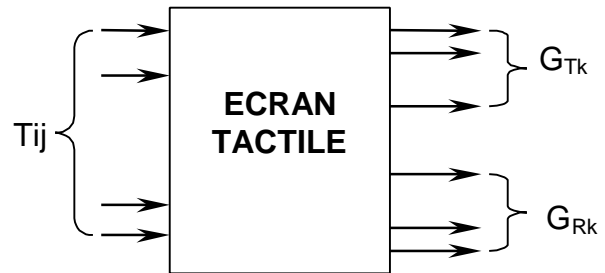
Angle de route	0°	45°	90°	135°	180°
Hauteur de houle >3 m	T11	T12	T13	T14	T15
Hauteur de houle de 2 à 3 m	T21	T22	T23	T24	T25
Hauteur de houle de 1 à 2 m	T31	T32	T33	T34	T35
Hauteur de houle < 1 m	T41	T42	T43	T44	T45

Le principe de fonctionnement retenu est le suivant :

- à chaque case « activée », les valeurs définies par la table sont attribuées aux « gains » G_R et G_T correspondants ;
- un dispositif de verrouillage logique (non étudié) ne permet que l'« activation » d'une seule case à la fois.

La modélisation suivante sera retenue :

- Les variables binaires T_{ij} sont les variables d'entrée de la Partie Commande de l'« écran tactile »; par convention T_{ij} est à l'état logique « 1 » si la case T_{ij} est « activée » ;
- Les valeurs discrètes des gains constitueront les variables de sortie de la Partie Commande de l'« écran tactile »;
- On notera GT_{90} la variable binaire qui est à l'état logique « 1 » si la valeur 90 est attribuée au gain G_T ; de même par exemple, on notera GR_{30} la variable binaire qui est à l'état logique « 1 » si la valeur 30 est attribuée au gain G_R , etc.



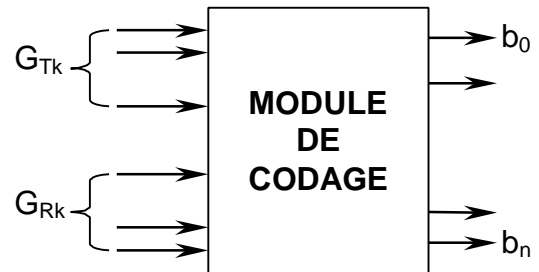
Question 1C

- Exprimer les deux variables GT_{70} et GR_{60} en fonction des variables T_{ij} .

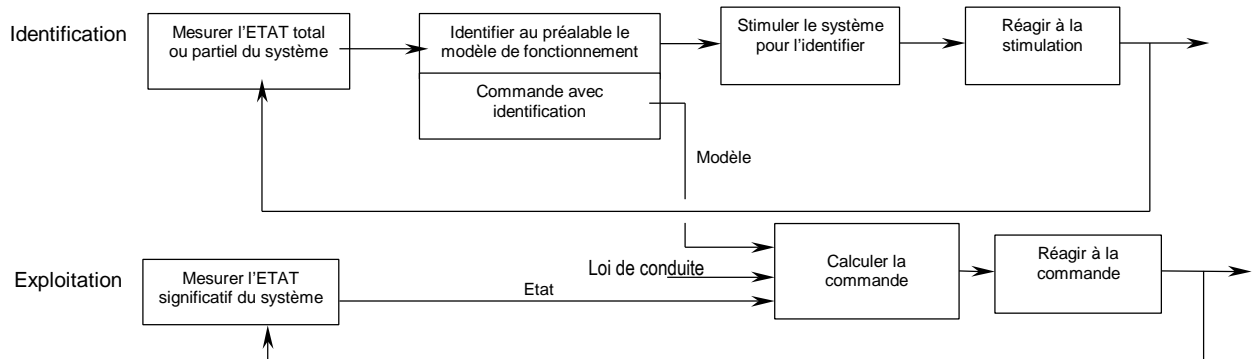
La valeur attribuée à chaque « gain » G_T ou G_R est codée en **binaire naturel** par un mot de $n+1$ éléments binaires (b_n, \dots, b_0) où b_0 est l'élément binaire de poids le plus faible.

Question 2C

- Donner en dimensionnant (nombre de colonnes) et complétant le tableau de la copie, les différents mots binaires correspondant aux valeurs possibles des « gains » G_{Tk} ou G_{Rk} .
- Proposer une solution simple pour coder le mouvement concerné, roulis ou tangage.
- Exprimer alors l'élément binaire b_2 en fonction des G_{Tk} et G_{Rk} .



Une autre évolution du système étudié serait de remplacer le système précédent par un système « expert » capable de faire varier sa commande en fonction des conditions de navigation, ce qui devrait permettre une adaptation plus « fine » à ces conditions. Les méthodes de commande dites « optimales » entrent dans cette catégorie. Le schéma ci-dessous en présente une : « Commande par Identification ».



Question 3C

- Indiquer la façon dont ce modèle de commande pourrait être adapté à la stabilisation du NGV.
- Donner les nouveaux équipements consécutifs à cette implantation et les éventuelles limites de fonctionnement d'une telle commande ainsi que ses possibilités de développements ultérieurs.

Fin