

Bassin d'essais de carènes

La puissance de la motorisation installée sur des embarcations de faible longueur comme des vedettes propulsées par hélice permet d'espérer des vitesses de déplacement importantes. Pendant la phase de conception qui précède l'industrialisation et la commercialisation de ces vedettes, il est nécessaire de valider les performances attendues dans le cahier des charges. L'influence de la partie de la coque au contact de l'eau, **la carène**, est prépondérante.



photothèque Bénéteau / G. Martin Raget

La simulation numérique de son comportement ne donne aujourd'hui qu'un résultat approché. La validation de la géométrie est le fruit d'essais avec des reproductions à échelle réduite de la coque étudiée (maquette) sur un plan d'eau instrumenté que l'on appelle bassin d'essais de carènes. Le bassin, objet de cette étude (figure 1), est principalement constitué :

- d'une fosse de 70m de longueur utile, 5m de largeur et 3m de profondeur,
- d'une plate-forme carrée de 6m de côté destinée à l'entraînement des maquettes à vitesse constante jusqu'à 5m/s. Cette plate-forme est propulsée par quatre bogies automoteurs à deux roues qui roulent sans glisser sur deux rails installés de part et d'autre du bassin distants de 5,40m. Quatre galets latéraux complètent le guidage en translation rectiligne. Lors de l'essai, la plate-forme doit embarquer les opérateurs et l'ensemble du matériel. Sa structure est massive pour être rigide et ne pas se déformer. La masse en mouvement de la plate-forme équipée peut atteindre 8000kg,

- d'un axe vertical asservi installé sur la plate-forme supportant la balance de mesure, (à l'extrémité de cet axe est fixée la cane de propulsion liée à la maquette),
- d'un batteur immergé, générateur de houle à la surface du bassin.

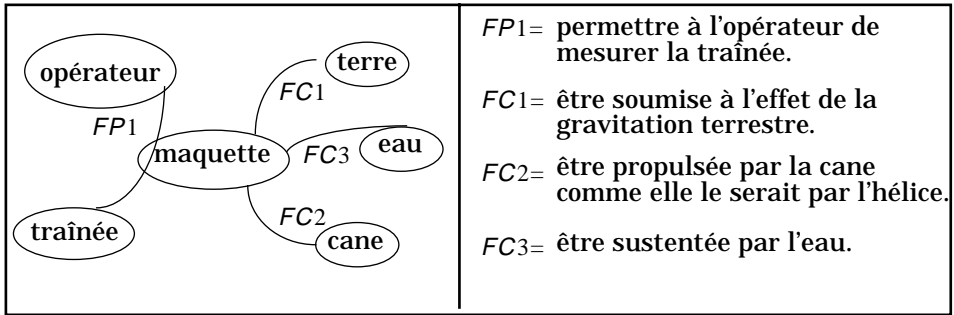


Photo École Centrale de Nantes

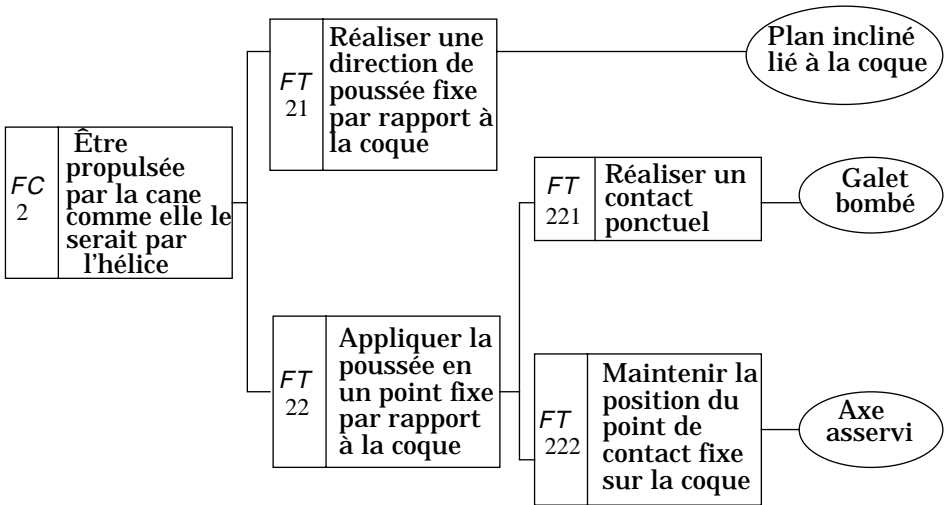
L'étude proposée s'inscrit dans la validation d'un essai finalisé par la mesure de l'effort de traînée, c'est-à-dire la composante de l'action de l'eau sur la carène selon la direction de déplacement de la coque à différentes vitesses.

Partie I - L'objet de cette partie est de valider des choix de solutions techniques dans la réalisation de la liaison de la cane avec la maquette.

Une analyse fonctionnelle partielle de l'environnement d'utilisation a permis de dégager quelques fonctions de service.



Une analyse de la réalisation a permis d'identifier les solutions techniques proposées en réponse aux fonctions de service attendues et de dégager les fonctions techniques associées.



La surface libre de l'eau du bassin n'est pas plane au repos. Les rails et les composants de guidage de la plate-forme ont été réglés au montage pour que le plateau porteur ait une trajectoire rectiligne parallèle à la tangente à la surface de l'eau au milieu du bassin.

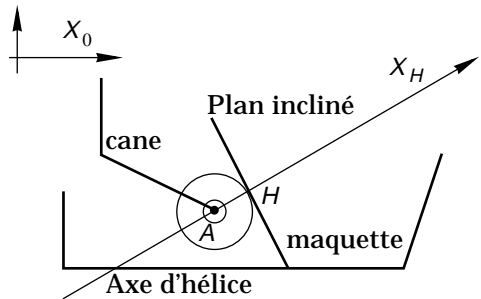
Q1 - En supposant que la terre est une sphère de rayon 6370km, calculer la variation de la distance entre un point du plateau porteur et la surface libre de l'eau sur la longueur du bassin.

Dans la suite de l'étude, on néglige cette variation et on considère que la surface libre de l'eau est plane et parallèle au plan des rails $(O_0, \vec{X}_0, \vec{Y}_0)$.

Le repère $R_0 = (O_0, \vec{X}_0, \vec{Y}_0, \vec{Z}_0)$ est supposé galiléen. \vec{Z}_0 est ascendant vertical et on note $\vec{g} = -g\vec{Z}_0$, l'accélération de la pesanteur. La maquette, de centre de masse C , est de masse m . L'action de l'eau sur la carène est modélisée, au centre de portance E , par un glisseur : $\{ \vec{L}(E, \text{eau} \rightarrow \text{carène}) \} = E \{ \vec{E}; 0 \}$.

Q2 - La maquette est posée sur l'eau. Écrire l'équilibre et en déduire la position du centre de portance E par rapport au centre de masse C .

L'action de l'hélice sur la vedette est simulée par l'action du galet en bout de cane sur le plan incliné réalisé sur la maquette. H est l'intersection du plan incliné et de la droite associée à l'axe de l'hélice.



Le contact est ponctuel, et l'action est modélisée par un glisseur $\{ \vec{H}(H, \text{galet} \rightarrow \text{maquette}) \} = H \{ \vec{H}; 0 \}$. On note $\vec{HC} = X_H \vec{X}_H + b \vec{Z}_H$ et $\vec{O}_0 H = X_H \vec{X}_0 + Z_H \vec{Z}_0$.

Le repère $R_H = (H, \vec{X}_H, \vec{Y}_H, \vec{Z}_H)$ est lié à la maquette. On suppose que la géométrie de la maquette est symétrique par rapport au plan (\vec{X}_H, \vec{Z}_H) . On note α l'angle de cabrage (\vec{X}_0, \vec{X}_H) qui caractérise l'inclinaison de la maquette ; $\vec{Y}_H = \vec{Y}_0$.

Pendant la mesure, la vitesse de la maquette doit être constante à 1%. Aussi, le déplacement de la plate-forme est régulé en vitesse.

Q3 - En supposant que le mouvement de la maquette par rapport à l'eau est une translation uniforme parallèle à (O_0, \vec{X}_0) , appliquer en C le principe fondamental à la maquette isolée.

Par définition on appelle T , tel que $T = \vec{E} \cdot \vec{X}_0$, l'effort de traînée et on note $\vec{HE} = X_E \vec{X}_H + Z_E \vec{Z}_H$.

Q4 - Exprimer T en fonction de \vec{H} , pour cela appliquer le principe fondamental à l'ensemble {galet + cane} et en déduire la possibilité de mesurer l'intensité de l'effort de traînée par la balance de mesure.

Q5 - Appliquer en C le principe fondamental à la maquette isolée pendant une phase d'accélération du centre de masse telle que $a = \vec{a}(C, \text{maquette}/R_0) \cdot \vec{X}_0$.

Q6 - En déduire la valeur maximale que peut atteindre a pour que l'erreur systématique sur la détermination de l'effort de la traînée ne dépasse pas 0,1% lorsque la maquette a une masse de 20kg et que l'effort de traînée est de 30N.

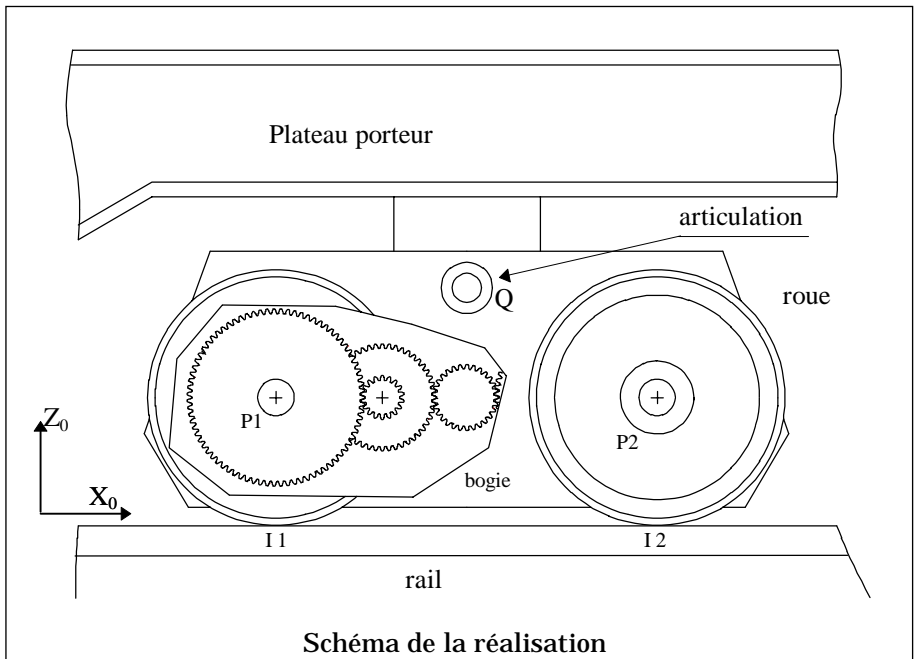
Le bassin est équipé d'un générateur de houle, qui permet de créer des vagues à la surface de l'eau. La surface de la coque qui est au contact de l'eau varie. En conséquence, le centre de poussée évolue, la maquette s'enfonce dans l'eau et remonte et son inclinaison, par rapport au bassin, change. La plate-forme est immobile et le point A est fixe dans R_0 . On suppose que le contact entre le plan incliné et le galet est maintenu. Soit I ce point.

Q7 - En analysant les surfaces en contact en I montrer que la solution technique assure la fonction technique FT_{21} .

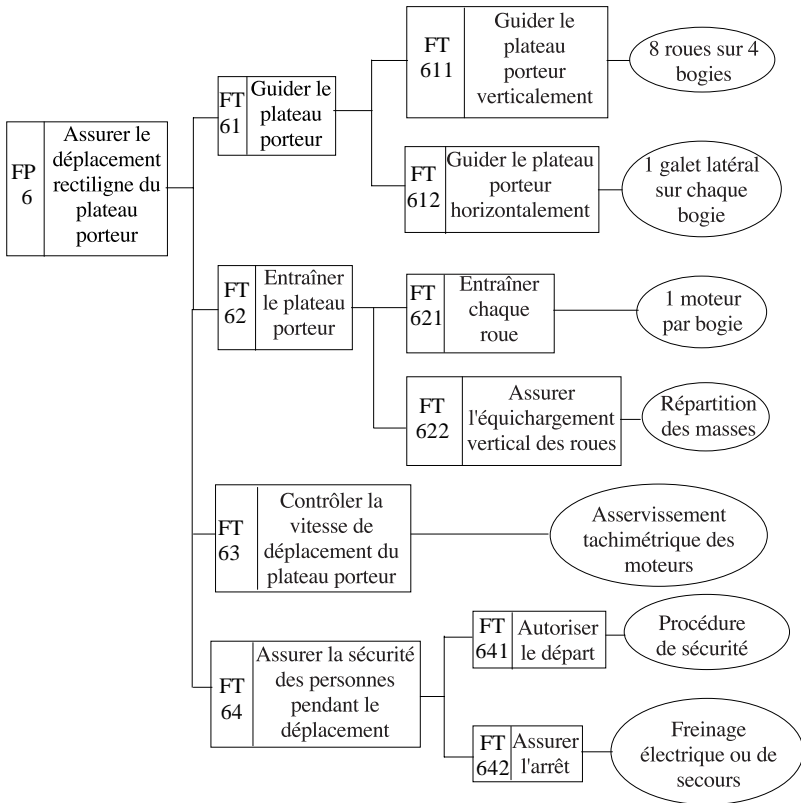
On suppose que la maquette s'enfonce, sans rotation.

Q8 - Déterminer les coordonnées X_I et Z_I du point de contact I dans le repère $(H, \vec{X}_0, \vec{Y}_0, \vec{Z}_0)$ en fonction de la variation ΔZ_C du centre de masse C .

Q9 - Justifier la solution technique retenue pour maintenir le point de contact I en H .



Partie II - L'objet de cette partie est de valider les solutions techniques retenues pour assurer la fonction de service notée FP6 : "assurer le déplacement rectiligne du plateau porteur".



II.A - Guider la plateau porteur

Une analyse de la réalisation (voir schéma ci-contre) conduit à retenir pour les liaisons les modèles suivants : liaisons pivots entre le plateau porteur et le bogie d'axe (Q, \vec{Y}_0) , et entre le bogie et la roue d'axe (P_i, \vec{Y}_0) et liaison sphère-plan entre la roue et le rail.

Q10 - Réaliser le graphe de structure du sous-ensemble constitué du plateau porteur, des quatre bogies, des huit roues et des deux rails assemblés.

Q11 - Calculer le nombre d'inconnues cinématiques l_c .

Q12 - Déduire du nombre de cycles indépendants le nombre d'équations E_c que l'on pourra obtenir.

Q13 - Montrer que la liaison équivalente entre le {bogie + une roue} et le rail est une liaison sphère-plan c'est-à-dire que la rotation de la roue autour de son axe est considérée comme une mobilité interne dans cette analyse.

Q14 - Donner sans démonstration les caractéristiques de la liaison équivalente entre le plateau porteur et les rails. En déduire le degré d'hyperstatisme de ce modèle du mécanisme.

Q15 - Justifier le choix de poser un bandage en élastomère autour des roues en alliage d'aluminium pour minimiser l'effet néfaste, sur le fonctionnement, de cet hyperstatisme.

Q16 - Commenter brièvement la solution technique qui réalise la fonction technique FT_{612} .

II.B - Assurer l'équichargement vertical des roues

Le repère $R_p = (G_p, \vec{X}_p, \vec{Y}_p, \vec{Z}_p)$ est lié à la plate-forme et G_p est le centre de masse. On note M la masse de la plate-forme instrumentée. Pour assurer l'équichargement statique des roues, les masses sont réparties de façon à positionner G_p sur l'axe (K, Z_0) tel que K est le centre géométrique des 8 points I_j .

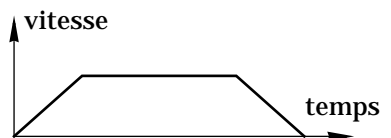
Q17 - Déduire de l'écriture de la projection sur \vec{Y}_0 du théorème du moment dynamique en K , appliqué à la plate-forme isolée par rapport à R_0 , la position de G_p qui assure l'équichargement dynamique des roues.

II.C - Entraîner chaque roue

Après avoir installé la maquette, validé tous les réglages et fixé tous les paramètres, l'essai comporte les étapes suivantes :

- Stabilisation de la surface de l'eau au régime choisi.
- Démarrage et accélération de la plate-forme jusqu'à la vitesse de l'essai.
- Stabilisation de la plate-forme à la vitesse de l'essai.
- Déclenchement de l'acquisition de l'effort de traînée.
- Fin de l'acquisition de l'effort de traînée.
- Décélération et immobilisation de la plate-forme.

On suppose que le mouvement de la plate-forme est caractérisé par trois phases : une montée en vitesse à accélération constante, un déplacement à vitesse constante pendant lequel s'effectuent les mesures et une décélération constante jusqu'à l'arrêt.



Q18 - Pour l'accélération maximale de la plate-forme préconisée ($0,8\text{m/s}^2$), déterminer la distance parcourue à la vitesse constante de 5m/s .

Q19 - De combien de temps dispose-t-on pour effectuer et enregistrer les mesures ?

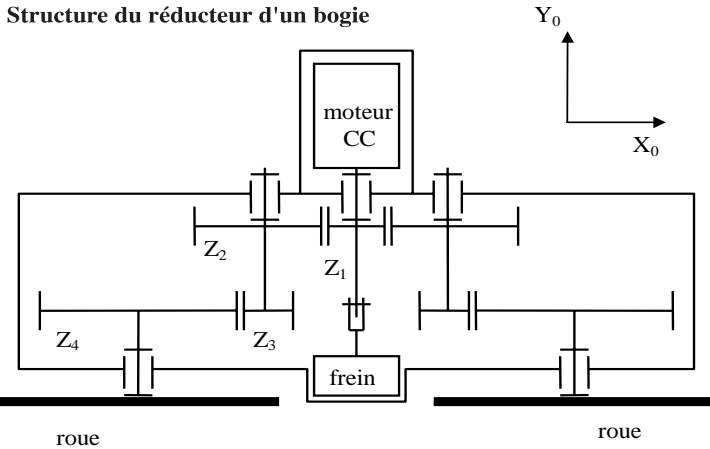
La géométrie du contact entre chacune des roues et les rails est supposée ponctuelle. Toutes les roues sont motrices et on considère une situation d'équichargement vertical et d'équiadhérence sur chacune des roues. La masse en mouvement est $M = 8000\text{kg}$. Seules les inerties en translation sont à considérer.

Q20 - En retenant le modèle de contact de Coulomb, quel coefficient de frottement doivent présenter les matériaux de la roue et du rail pour permettre d'atteindre cette accélération ?

Q21 - Le diamètre des roues est de 350mm . Quel doit être le couple transmis à chacune d'elles ?

Chaque bogie est composé d'un moteur électrique à courant continu équipé d'une dynamo tachymétrique, d'un réducteur à engrenages, d'un boîtier de distribution, d'un frein et de deux roues d'entraînement. Le réducteur est à deux étages. Les principales caractéristiques sont données dans le tableau ci-dessous :

Pièce par bogie	Nbre	\varnothing mm	L mm	Masse kg	Moment d'inertie 10^{-4}kg m^2	Z dents
pignon moteur	1	87	25	$1 \cdot 2$	$I_1 = 11 \cdot 4$	$Z_1 = 29$
pignon intermédiaire	2	144	25	$3 \cdot 2$	$I_2 = 83$	$Z_2 = 48$
pignon intermédiaire	2	54	40	$0 \cdot 7$	$I_3 = 2 \cdot 6$	$Z_3 = 18$
pignon de sortie	2	237	40	$13 \cdot 8$	$I_4 = 970$	$Z_4 = 79$
roue de bogie	2	350	58	$10 \cdot 1$	$I_r = 1070$	
moteur à C.C.	1	316	218	35	$I_m = 75$	
frein hydraulique	1	142	83	$8 \cdot 3$	$I_f = 6$	



Q22 - Calculer le rapport ρ , du taux de rotation de la roue par rapport au bogie sur celui du moteur par rapport au bogie.

Q23 - En déduire le couple moteur nécessaire à l'entraînement des roues dans les conditions des questions 20 et 21. Préciser les hypothèses qui valident ce calcul.

II.D - Contrôler la vitesse de déplacement du plateau porteur

L'asservissement de la commande de la translation de la plate-forme doit être réglé de sorte que la vitesse ne dépasse jamais la consigne car un ralentissement génère une vague devant l'étrave. Ce train de vagues se propage devant la coque tout au long de l'essai, perturbe l'eau et affecte la mesure. Pendant la mesure, la vitesse de la plate-forme doit être constante à 1% près. La boucle d'asservissement de la motorisation peut être représentée par le schéma bloc donné en figure 2.

Dans toute cette partie, on supposera que les phénomènes étudiés se reproduisent à l'identique et au même instant sur les quatre bogies de la plate-forme automotrice. Ainsi on considère comme représentative de l'ensemble l'étude menée sur un seul bogie. La vitesse nominale de déplacement de la plate-forme est de $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Elle correspond à une tension de consigne $u_c(t)$ maximale. Les moteurs à courant continu sont de type AXEM MP 27 PV équipés de génératrices tachymétriques TBN 420. Les impératifs fonctionnels liés à la mesure de l'effort de traînée imposent à la chaîne de motorisation asservie les critères suivants :

- ne pas avoir de ralentissement du début du mouvement jusqu'à la fin de la phase d'acquisition,
- monter rapidement à 99% de la vitesse finale pour déclencher au plus vite l'acquisition,
- évoluer réellement à moins de 1% de la vitesse de consigne afin de connaître précisément la vitesse lors de l'essai.

Le fonctionnement du système peut être modélisé par les équations suivantes. Trois sont issues des caractéristiques d'un moteur à courant continu :

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (1)$$

$$e(t) = K_E \omega(t) \quad (2)$$

$$c_m(t) = K_c i(t) \quad (3)$$

et une issue des lois de la mécanique

$$T(t) = -\lambda v(t) \text{ (avec } \lambda > 0 \text{)} \quad (4)$$

avec :

$u_c(t)$ tension de consigne (en Volt),

$u_v(t)$ tension du variateur (en Volt),

$u(t)$ tension aux bornes de l'induit (en Volt),

R résistance de l'induit (en Ohm),

L inductance de l'induit (en Henry),

$i(t)$ courant dans l'induit (en Ampère),

$e(t)$ tension contre-électromotrice (en Volt),

$\omega(t)$ taux de rotation du moteur électrique (en radian par seconde),

$c_m(t)$ couple disponible sur l'arbre du moteur (en Newton mètre),

$c_r(t)$ couple de frottement sec sur l'arbre du moteur (en Newton mètre),

μ inertie équivalente (en kilogramme),

M masse de la plate-forme équipée (en kilogramme),

$T(t)$ effort de traînée sur la maquette (en Newton),

λ coefficient de frottement visqueux de la maquette sur l'eau (en Newton seconde par mètre),

$v(t)$ vitesse galiléenne de la plate-forme (en mètre par seconde),

f coefficient de frottement visqueux au niveau des guidages des différents mobiles ramené au niveau de la plate-forme (en $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$),

- K_V gain variateur,
 K_{RV} gain de la génératrice tachymétrique (en $V \cdot \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$),
 r rayon de roue (en mètre).

Valeur numérique des différents coefficients :

$$K_V = 15 ; R = 0,18\Omega ; L = 100\mu\text{H}$$

$$K_E = 48,3\text{V par } 1000\text{tr} \cdot \text{min}^{-1} ; K_C = 0,46\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} ;$$

$$K_{RV} = 20\text{V par } 1000\text{tr} \cdot \text{min}^{-1} ; \lambda = 6,5\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} ; f = 160\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}.$$

Caractéristiques nominales du moteur AXEM MP 27 PV. $U = 154\text{V}$;
 $\Omega = 3000\text{tr}/\text{mn}$; $I = 52\text{A}$ et $C = 24\text{N} \cdot \text{m}$ avec quadruplement acceptable pendant 3s .

Q24 - On choisit d'asservir en vitesse le mouvement de la plate-forme. Expliquer brièvement si un asservissement en position peut satisfaire le besoin fonctionnel.

Q25 - Exprimer l'énergie cinétique de la plate-forme équipée dans son mouvement par rapport au galiléen. Présenter le résultat sous la forme : $E_C(\text{plate-forme}/R_0) = (1/2)4\mu v^2(t)$. Calculer μ et quantifier l'influence de M . Quelle remarque cela vous inspire-t-il ?

Q26 - Appliquer le théorème énergie puissance à la plate-forme équipée dans son mouvement par rapport au galiléen. On considère que :

- les roues d'un bogie roulent sans glisser sur le rail,
- la puissance électrique fournie au niveau d'un moteur vaut :
 $P(t) = c_m(t)\omega(t)$.

Après avoir présenté les actions extérieures et intérieures au système isolé, établir une relation du type :

$$\Lambda\mu \frac{dv(t)}{dt} = \delta_1 v(t) + \delta_2 T(t) + \delta_3 \quad \text{où } \Lambda = v(t)/\omega(t).$$

Donner l'expression des coefficients ou fonctions du temps δ_1 , δ_2 et δ_3 .

Q27 - En vous appuyant sur la représentation du système par un schéma-bloc (figure 2), analyser le processus et exprimer clairement les transmittances manquantes dans le domaine symbolique de Laplace (blocs numérotés de (B1) à (B9) sur la figure 2). Vous appuierez votre démarche sur le résultat de la question précédente et les modèles de comportement dans le domaine temporel des différents constituants de la chaîne asservie. On supposera les conditions initiales nulles.

Q28 - En supposant que $C_r(p)$ est négligeable, réduire le schéma bloc et exprimer la Fonction de Transfert de la chaîne directe

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U_v(p)}. \text{ Faire l'application numérique.}$$

Pour toute la suite de l'étude on prendra :

$$H(p) = \frac{32}{1 + 0,986p + 5,48 \times 10^{-4} p^2}.$$

Q29 - Montrer que cette fonction ne présente pas de dépassement en réponse indicielle et que l'on peut se ramener à la forme suivante :

$$H(p) = \frac{K_H}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)}.$$

Déterminer τ_1 et τ_2 et justifier par un raisonnement dans le domaine temporel l'écriture

$$H(p) = \frac{K_H}{(1 + \tau p)}.$$

Q30 - Tracer le nouveau schéma bloc incluant $H(p)$ et donner l'écart statique de l'ensemble du système asservi en réponse indicielle dans les deux cas suivants :

$$Q(p) = K_p$$

$$Q(p) = K_p + \frac{K_1}{p}.$$

Justifier le choix d'un correcteur proportionnel intégral, sachant que l'on souhaite un écart statique nul.

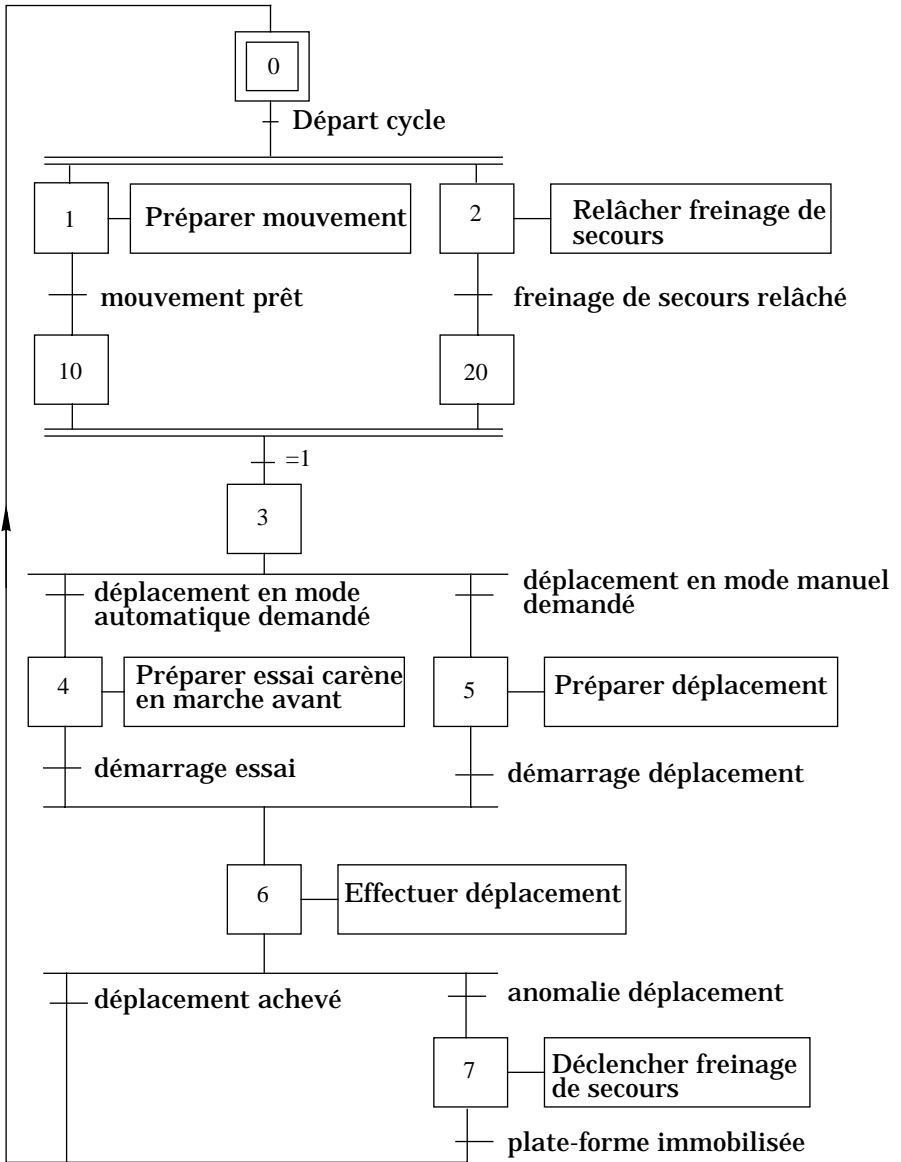
Q31 - Choisir les valeurs des gains K_p et K_1 afin que le comportement en boucle fermée soit celui d'un premier ordre, et que le temps de réponse à 99% en réponse indicielle de la valeur finale reste inférieur ou égal à 8 secondes.

Q32 - Calculer la distance parcourue pendant la montée à 99%. En déduire le temps disponible pour l'acquisition de l'effort de traînée lorsque la plate-forme évolue à la vitesse de $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Q33 - Déterminer la valeur de l'accélération maximale. Au bout de combien de temps la valeur de l'accélération devient inférieure à $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$? Conclure quant au choix des moteurs.

II.E - Assurer la sécurité des personnes pendant le déplacement

Les 6 tâches qui interviennent dans le grafcet de coordination (on ne traite pas la demande de sortie des vérins de sustentation) donné ci-dessous sont :



Tâche 1 : Préparer mouvement. Au cours de cette étape, et de façon séquentielle :

- l'arrêt d'urgence est déverrouillé,
- le marchepied électrique d'accès à la plate-forme est rentré,
- on s'assure visuellement que les fosses qui bordent le bassin au niveau du port sont vides de personnel, en acquittant sur un bouton poussoir par au moins deux impulsions espacées de plus de 2 secondes en moins de 10 secondes au total,
- les vérins de sustentation de la plate-forme sont relevés et verrouillés en position haute,
- on allume deux gyrophares oranges, placés à chaque extrémité de la plate-forme, qui fonctionneront jusqu'à la fin du déplacement,
- on s'assure que le dispositif de freinage électrique automatique et que la régulation de vitesse sont opérationnels.

Tâche 2 : Relâcher freinage de secours.

Le frein de secours est de type multidisque lubrifié à commande hydraulique. À l'arrêt la pression de freinage est assurée par des ressorts, il est monostable et actif au repos (frein de sécurité). La pression minimum d'alimentation hydraulique est de 1,5 MPa. Au cours de cette étape :

- la pression d'alimentation hydraulique minimale du frein multidisque est contrôlée,
- on s'assure que le dispositif de freinage électrique automatique est opérationnel,
- on actionne le freinage électrique,
- l'alimentation en huile du frein multidisque de secours est commandé, le frein de secours est inactif.

Tâche 4 : Préparer essai carène en marche avant. Au cours de cette étape :

- on interdit le lancement de l'essai en mode automatique si la plate-forme n'est pas à l'extrémité arrière du chemin de roulement (côté port),
- on descend l'axe vertical instrumenté de façon à mettre la carène à l'eau.

Tâche 5 : Préparer déplacement. Au cours de cette étape :

- on interdit le déplacement en marche avant si la plate-forme est à l'extrémité avant du chemin de roulement (côté générateur de houle),
- on interdit le déplacement en marche arrière si la plate-forme est à l'extrémité arrière du chemin de roulement (côté port).

Tâche 6 : Effectuer déplacement. Au cours de cette étape :

- on commande les moteurs électriques en fonction du profil de vitesse prédéfini.

Tâche 7 : Déclencher freinage de secours. Au cours de cette étape :

- on coupe l'alimentation des moteurs électriques et on déclenche le freinage de secours par arrêt de l'alimentation hydraulique.

Affectations des Entrées-Sorties du système automatisé. On précise la signification des abréviations suivantes :

FCM : fin de course magnétique

BP : bouton poussoir

SP : sélecteur de position

NO : normalement ouvert

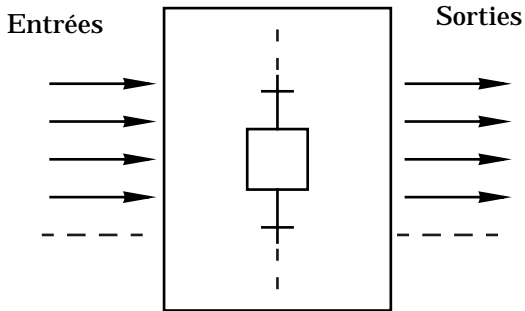
NF : normalement fermé

	Entrées : capteurs	État	Mnémonique
<i>SP – NO</i> :	bouton d'arrêt d'urgence	appuyé	<i>au</i>
		relâché	\overline{au}
<i>BP – NO</i> :	contrôle visuel des fosses	appuyé	<i>bpf</i>
		relâché	\overline{bpf}
<i>FCM – NO</i> :	position marchepied	rentré	<i>pm0</i>
		sorti	<i>pm1</i>
<i>FCM – NO</i> :	position des vérins de sustentation plate-forme (pour les 4 vérins)	haute	<i>pvh</i>
		basse	<i>pvb</i>
<i>FCM – NO</i> :	détection verrouillage des vérins de sustentation	verrouillage engagé	<i>dvv</i>
	contrôle de freinage électrique automatique	opérationnel	<i>cfe</i>
	contrôle de régulation de vitesse	opérationnel	<i>crv</i>

Sorties : actionneur	Action	Commande
MM : moto-réducteur de marchepied	rentrer	MM-
	sortir	MM+
VS : vérins de sustentation	rentrer	VS-
	sortir	VS+
VV : verrouillage des vérins de sustentation	verrouiller	VV+
	déverrouiller	VV-
gyrophares oranges (2)	alimenter	GYR

Q34 - La troisième action de la tâche 1 réclame un acquittement double sur le bouton poussoir *bpf*. Tracer le chronogramme donnant l'état du bouton poussoir et proposer une solution de type grafcet en vous limitant à trois étapes et trois transitions au maximum.

Q35 - En vous référant au grafcet de coordinations des tâches, écrire le grafcet esclave d'exécution de la tâche 1 point de vue commande, **en marche normale**. Vous en ferez la présentation sous la forme normalisée suivante :



Une attention particulière sera portée sur la qualité de la syntaxe grafcet et sur le traitement de la synchronisation.

••• FIN •••

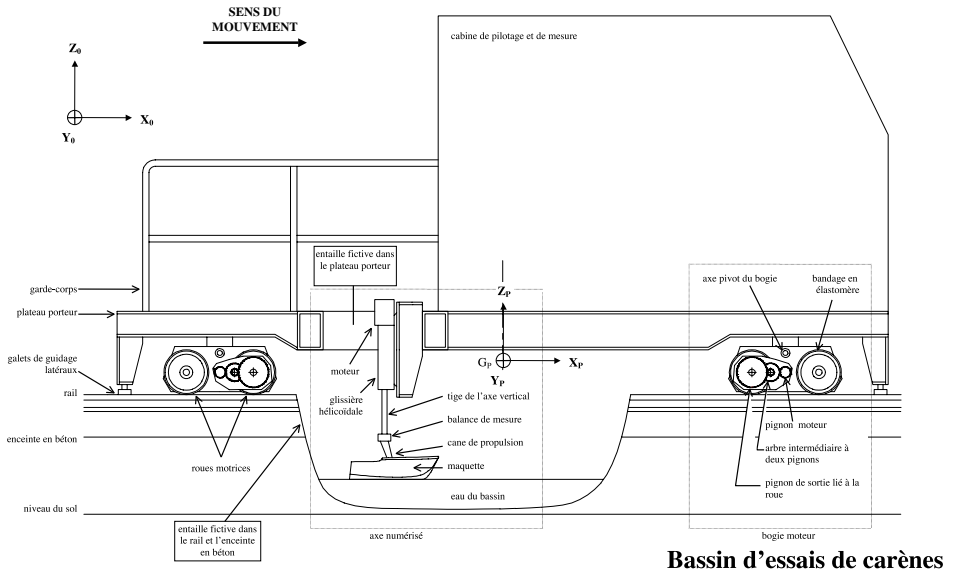


Figure 1

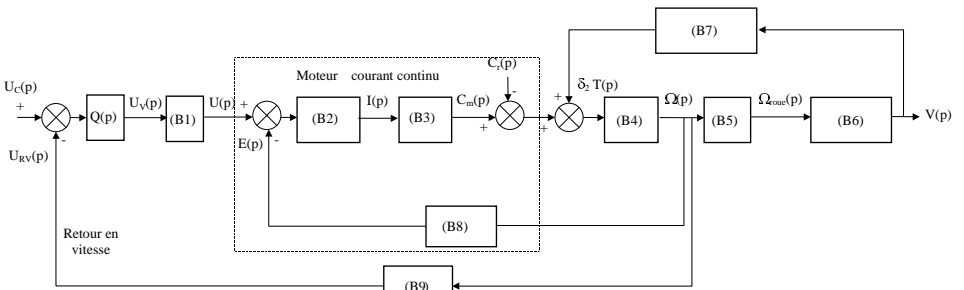
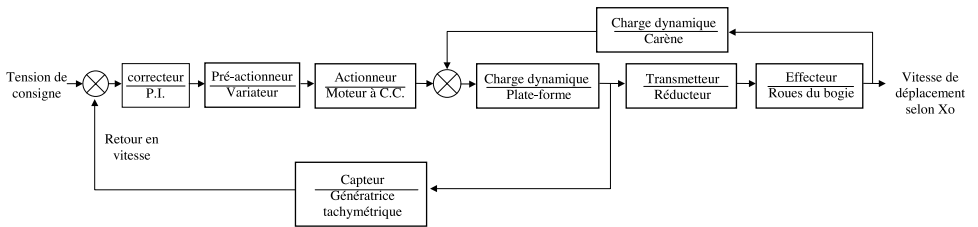


Figure 2