Concours Centrale-Supélec, France

Session 2013, filière PSI

Sciences industrielles de l'ingénieur

Durée : 4 heures

Ce que traite le sujet

- Partie I : performances et architecture des grues
- Partie II : validation des nouvelles motorisations
- Partie III : tenue mécanique du portique et commande du spreader
- Parties IV.A et IV.B : asservissement du chariot et dynamique de la charge
- Parties IV.C, IV.D et V : commandes anti-ballant et conclusion

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/centrale/psi/2013/si

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

CONCOURS CENTRALE•SUPÉLEC

S2I

PSI

2013

4 heures Calculatrices autorisées

Chargement et déchargement des cargos porte-conteneurs

I Performances et architecture des grues

I.A – Le rôle des ports dans le transport mondial des marchandises

Le transport des marchandises (hydrocarbures, charbon, agroalimentaire, ciment, matériaux de construction, biens de consommation...) à travers le monde est incontournable dans l'économie moderne. Excepté les matières premières, ces marchandises sont envoyées par conteneurs. Au port de Marseille (premier port français), 950 000 conteneurs transitent chaque année, soit 9 millions de tonnes de marchandises et 1 300 navires.

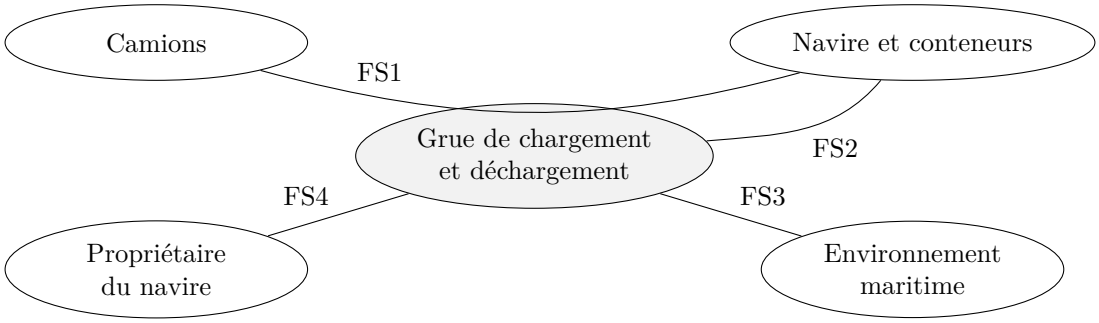
Les conteneurs sont des boites standardisées, d'une masse maximale de 40 tonnes, permettant de transporter des marchandises du fournisseur au client par navire, train, camion, voire par avion, sans déballer la marchandise. Les navires « post-panamax » sont les plus gros navires de transport et peuvent embarquer jusqu'à 13 000 conteneurs.



Figure 1 Cargo porte-conteneurs et grues de chargement–déchargement

Pour rejoindre sa destination finale, un conteneur changera plusieurs fois de navire. Il sera déchargé puis rechargé par des grues dans des plateformes portuaires, véritables « hubs » du réseau maritime.

Le temps d'immobilisation des navires à quai est donc un paramètre important du cout du transport. Ainsi les deux prestations principales attendues pour la grue sont la sécurité des hommes et des marchandises et la cadence de transfert. La figure 2 et le tableau 1 donnent les caractéristiques du cahier des charges partiel de la phase de déchargement.



- FS1 : déplacer les conteneurs du navire vers les camions de transfert ;
- FS2 : assurer la sécurité du contenu du conteneur ;
- FS3 : fonctionner malgré des conditions météorologiques difficiles ;
- FS4 : assurer une cadence de transfert suffisamment rapide.

Figure 2 Diagramme partiel des interacteurs

BY-NC-SA

N°	Expression	Critère	Niveau
FS1	Déplacer les conteneurs du navire vers les camions de transfert	Masse maximale du conteneur	40 tonnes
		Altitude des conteneurs sur le navire par rapport au quai	−13 m à 40 m
		Longueur × largeur du navire	400 m × 50 m
		Précision du positionnement du conteneur	10 cm
FS2	Assurer la sécurité du contenu du conteneur	Accélération maximale du conteneur (verticale × horizontale)	1 g × 0,5 g
FS3	Fonctionner malgré des conditions météorologiques difficiles	Stabilité du portique	Aucun renversement
		Plage de vitesse de vent autorisant les activités portuaires de déchargement	0 à 120 km · h^{-1}
		Vitesse maximale du vent mesurée au cours des 100 dernières années	300 km · h^{-1}
FS4	Assurer une cadence de transfert suffisamment rapide	Cadence	2 min par conteneur en moyenne

Tableau 1 Cahier des charges partiel de la grue de chargement/déchargement

L'objet de ce sujet est la validation de quelques-unes des performances qui contribuent à la réalisation de ces prestations.

Le contexte est celui du port de Fos, l'un des deux quais de déchargement du port de Marseille. Il est équipé de 13 grues de chargement–déchargement, pour cargos de type « post-panamax », fonctionnant 23 heures sur 24, 7 jours sur 7.

Il y a quelques années, les équipements étant devenus vétustes, le port a engagé la modernisation des chaines de motorisation et des systèmes de commande des grues pour en améliorer la fiabilité et la cadence.

Ce sujet s'inscrit en partie II et partie III dans cette démarche de validation des nouveaux équipements en vérifiant la stabilité mécanique de la grue sur ses appuis et en étudiant le risque de basculement lors du levage des conteneurs et par grand vent, et se poursuit par une étude prospective de l'automatisation du pilotage des grues dans la partie IV.

I.B – Architecture d'une grue et performances souhaitées des nouvelles motorisations

Les grues (voir figure 3) sont constituées d'un portique (structure métallique) dont les quatre pieds peuvent se déplacer sur deux rails, d'un chariot de levage et d'un « *spreader* » (voir figure 5), situé à l'extrémité des câbles, permettant de s'arrimer au conteneur par un verrouillage aux quatre coins supérieurs.

Chaque grue de déchargement assure trois mouvements principaux de translation du conteneur : un mouvement appelé « *translation* », horizontal et parallèle au quai (suivant $\vec{x}$), un mouvement appelé « *direction* », horizontal et perpendiculaire au quai (suivant $\vec{y}$) et un mouvement de « *levage* », vertical (suivant $\vec{z}$).

Le mouvement de *translation* est assuré par quatre moteurs implantés dans chaque pied de la grue (soit 16 moteurs au total), permettant à l'ensemble de la grue de se déplacer le long de deux rails. Le mouvement de *direction* est assuré par un chariot motorisé se déplaçant sur le portique. Le mouvement de *levage* est assuré par un treuil et un moufle de douze câbles.

Lors du déchargement d'un conteneur, le spreader est posé à plat sur le conteneur puis verrouillé (cette opération dure environ 5 s). Un premier mouvement de levage extrait le conteneur des glissières de guidage du bateau. Une fois en hauteur, le mouvement de direction déplace le conteneur du coté du quai. Il est alors posé sur un camion, déverrouillé du spreader (cette opération dure environ 5 s), puis évacué vers la zone de stockage arrière.

Éléments de cahier des charges de la nouvelle motorisation

- **translation :** vitesse maximale $V_{tm} = 0{,}75$ m·s^{-1}, accélération maximale $\gamma_{tm} = 0{,}1$ m·s^{-2}. La motorisation doit pouvoir déplacer la grue malgré une force du vent sur le portique $F_{vent} = 400$ kN. La masse du portique vaut $M_p = 1\,080$ tonnes ;
- **direction :** vitesse maximale $V_{dm} = 2{,}5$ m · s^{-1}, accélération maximale $\gamma_{dm} = 0{,}6$ m · s^{-2} pour un chariot de masse $M_{ch} = 27$ tonnes ;
- **levage :** vitesse maximale $V_{lmv} = 1{,}65$ m·s^{-1} à vide (c'est-à-dire sans conteneur) et $V_{lmp} = 0{,}75$ m·s^{-1} avec un conteneur de masse $M_c = 40$ tonnes et un spreader de masse $M_s = 10$ tonnes, accélération maximale $\gamma_{lm} = 0{,}5$ m · s^{-2}.

Q 1. Estimer à 10% près le nombre de jours nécessaires au déchargement par les 13 grues d'un cargo post-panamax de 10 000 conteneurs. Pour cette estimation, le modèle retenu est celui de la figure 3, où D vaut 40 m et h_c 26 m. Une hauteur moyenne des conteneurs sur le navire $h_c/2 = 13$ m et une distance moyenne au quai $D/2 = 20$ m pourront être adoptées. Les transitoires d'accélération et de décélération sont négligés.

BY-NC-SA

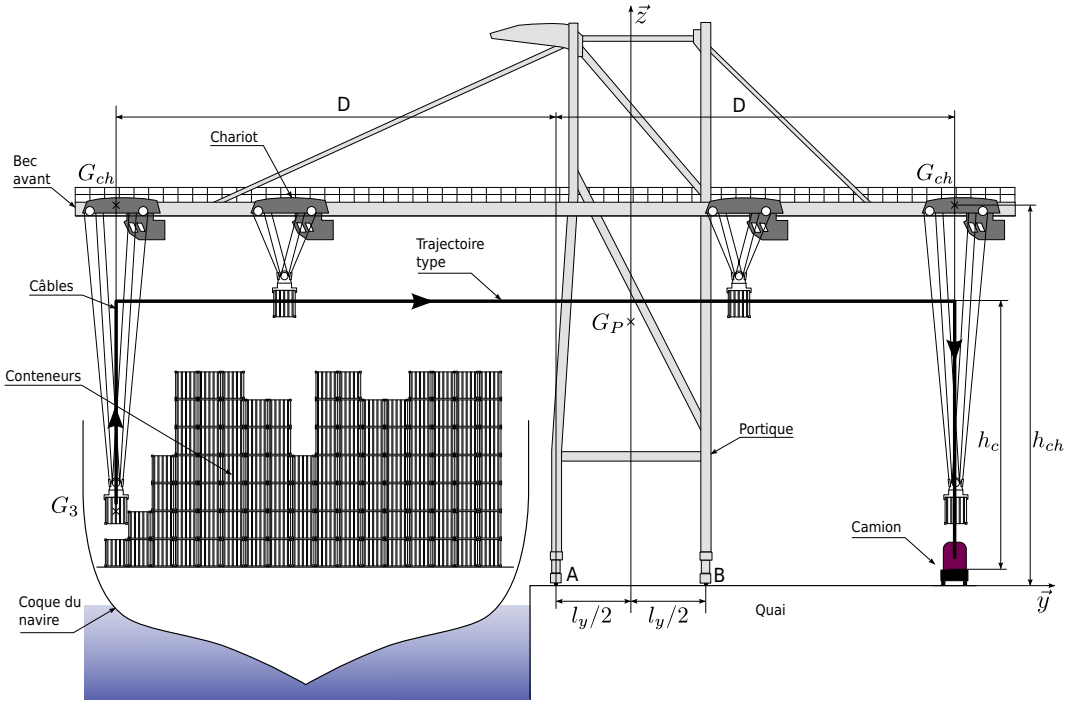


Figure 3 Grue de déchargement des conteneurs

II Validation des nouvelles motorisations de la grue

Objectif

Vérifier l'adéquation entre les motorisations proposées par un fournisseur et les performances attendues de la grue.

À partir des performances souhaitées (cahier des charges partie I.B), un fournisseur de matériel électrotechnique a proposé dans des couts raisonnables une nouvelle motorisation pour chacun des 3 mouvements : translation, direction et levage. Le tableau 2 précise les caractéristiques principales de la solution technique.

Axe	**Caractéristiques**
Moteur de translation	Vitesse maximale : 1 500 tr $\cdot$ min^{-1} 16 moteurs asynchrones de 22 kW chacun
Moteur de direction	Vitesse maximale : 1 800 tr $\cdot$ min^{-1} 1 moteur à courant continu de 56 kW
Moteur de levage	Vitesse maximale : 2 000 tr $\cdot$ min^{-1} 2 moteurs à courant continu de 210 kW chacun

Tableau 2 Caractéristiques des motorisations proposées par le fournisseur

II.A – Description des chaines de transmission de puissance de la grue

II.A.1) Mouvement de translation

Le mouvement de translation est guidé par 32 galets posés sur deux rails. Les 4 pieds disposent chacun de 8 galets de diamètre $d_g = 0{,}8$ m, entrainés par 4 moteurs asynchrones, par l'intermédiaire d'un réducteur de rapport $r_t = 1/80$. L'architecture cinématique de chaque pied est donnée figure 4 et chacun des moteurs entraine 2 galets.

II.A.2) Mouvement de direction

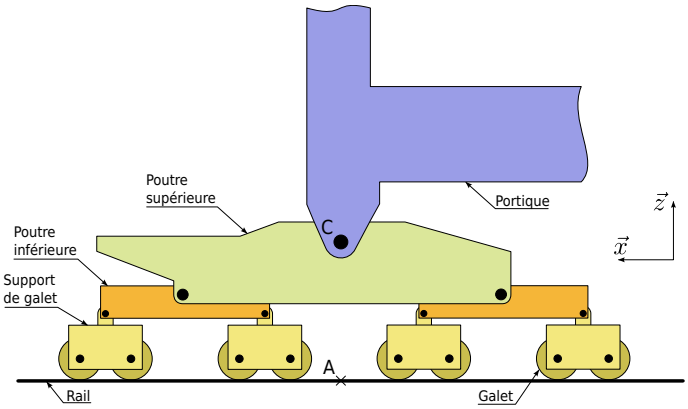
Le chariot de direction, de masse $M_{ch} = 27$ tonnes, est mis en mouvement par des câbles s'enroulant sur un tambour de diamètre $d_{ch} = 0{,}54$ m. Un moteur à courant continu entraine le tambour par l'intermédiaire d'un réducteur de rapport $r_{ch} = 1/20$.

II.A.3) Mouvement de levage et positionnement du spreader

Le mouvement de levage est assuré par 6 câbles s'enroulant sur un tambour de diamètre $d_l = 1{,}22$ m. Deux moteurs à courant continu accouplés entrainent le tambour par l'intermédiaire d'un réducteur de rapport $r_l = 1/34$.

Un système de moufles élaboré (voir figure 5) permet d'orienter le spreader dans 3 directions afin de le poser à plat sur le conteneur (condition nécessaire à un verrouillage correct). Un moufle est un dispositif mécanique permettant le levage d'une charge par plusieurs brins de câbles et poulies. En phase de prise du conteneur, trois

BY-NC-SA



Architecture d'un pied de la grue (chaque disque noir représente une liaison pivot)



Photographie du pied de grue (le tambour supérieur permet l'enroulement du câble d'alimentation 20 000 V)

Figure 4 Pied de grue

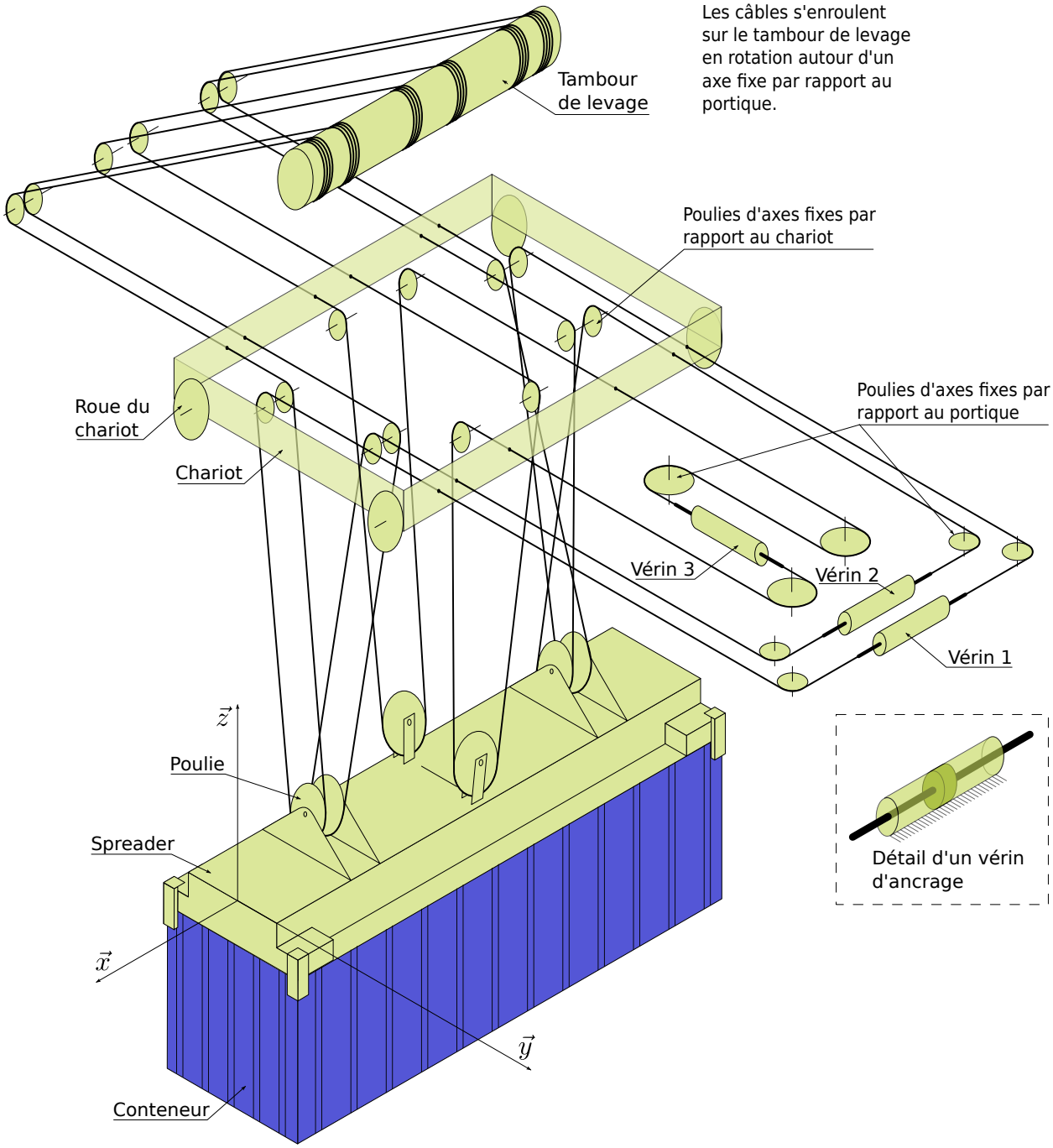


Figure 5 Câblage assurant le mouvement de levage et l'orientation d'un conteneur de 20 pieds

BY-NC-SA

vérins hydrauliques ajustent les points d'ancrage des câbles afin de déplacer en rotation le spreader avant son verrouillage sur le conteneur. En phase de déplacement, les vérins d'ancrage peuvent être libérés de façon à ne plus bloquer les mouvements de rotation du conteneur et répartir au mieux les efforts dans les câbles.

Les vérins hydrauliques présentent deux modes de fonctionnement :
- vérin libéré (les chambres sont dépressurisées et le mouvement de translation est libre) ;
- vérin bloqué ou piloté (le déplacement est commandé par le conducteur).

II.B – Validation des performances des nouvelles motorisations

Les hypothèses simplificatrices suivantes sont admises pour cette partie :
- les rendements sont unitaires ;
- les accélérations et décélérations sont constantes ;
- les inerties des pièces en rotation (rotors, tambours, galets, réducteurs, etc) sont négligées.

Q 2. Vérifier pour chaque moteur (levage, direction et translation) si les performances du cahier des charges défini par les services techniques de la société portuaire (partie I.B) sont satisfaites et compléter le tableau A du document réponse. La masse de la charge suspendue (conteneur et spreader) ne sera pas prise en compte pour le mouvement de direction. Noter que le moufle conduit à une vitesse du conteneur égale à la moitié de la vitesse du câble.

III Tenue mécanique du portique et commande du spreader

III.A – Stabilité du portique sur ses appuis

Objectif

Évaluer le risque de basculement lorsque le portique est soumis au vent et lors du levage d'un conteneur.

La forme très élancée du portique présente des risques de basculement lors de la manipulation des conteneurs les plus lourds et par grand vent. Il s'agit de lever ces risques.

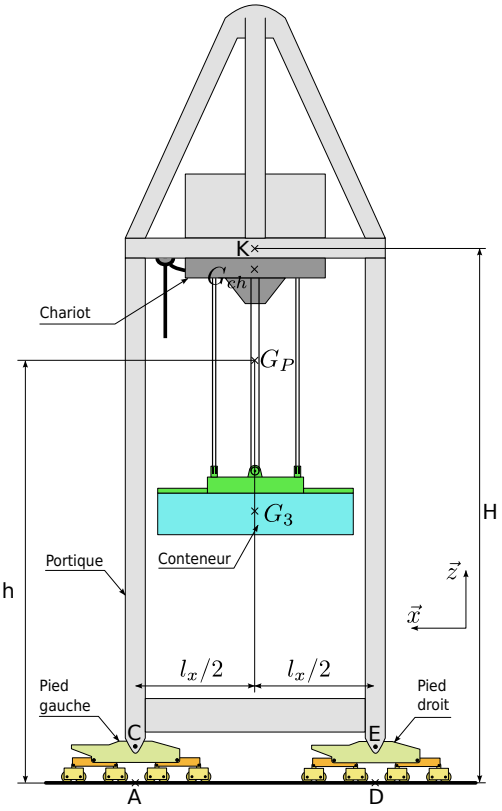
Le centre de gravité du portique seul est noté G_P, le centre de gravité du chariot G_{ch} et le centre de gravité de l'ensemble {spreader et conteneur} G_3. Soient $l_x = 17$ m, $l_y = 15$ m, $H = 32$ m et $h = 25$ m certaines longueurs précisées figure 6 et figure 3.

Q 3. Lorsque le chariot est en bout de bec avant (voir figure 3, la distance D vaut 40 m) et que la charge maximale est levée à l'accélération maximale γ_{lm}, déterminer littéralement, dans le cadre d'un problème plan (dans le plan $(\vec{y}, \vec{z})$ de la figure 3), les efforts dans les contacts rails/portique, modélisés par des liaisons sphère-plan en A et B. Donner la condition de non basculement de la grue. Cette condition est-elle vérifiée ?

La grue doit pouvoir se déplacer normalement en translation dans une plage de vents de 0 à 120 kilomètres par heure. Elle ne doit jamais basculer (vitesse maximale du vent mesurée au cours des 100 dernières années : 300 km $\cdot$ h^{-1}).

La prise au vent latérale est très forte et sera modélisée par une force : $\vec{F}_{vent} = \frac{1}{2}\lambda V^2 \vec{x}$ appliquée en K (figure 6), avec $\lambda = 800$ N $\cdot$ s^2 $\cdot$ m^{-2}.

La liaison galets-rail supporte les 1080 tonnes du portique. En raison des pressions admissibles aux contacts, plusieurs galets sont nécessaires pour chaque pied. Les questions suivantes visent à élaborer un modèle statique d'un pied pour conclure sur le critère de non basculement de la grue.



$H = 32$ m
$h = 25$ m
$h_c = 26$ m
$l_x = 17$ m
$l_y = 15$ m
$D = 40$ m

Figure 6 Vue longitudinale du portique

Q 4. Déterminer le degré d'hyperstatisme du modèle plan d'un seul pied, de la liaison portique/sol donné sur la figure 4. En déduire la répartition de la charge entre les 8 galets.

BY-NC-SA

Q 5. À partir de l'étude des mobilités du pied décrit figure 4, proposer une liaison équivalente à la liaison assurée par un pied entre le portique et le rail, dans le plan $(\vec{x}, \vec{z})$ de la figure 4, en précisant ses caractéristiques géométriques.

Q 6. Déterminer littéralement, dans le cadre d'une modélisation dans le plan $(\vec{x}, \vec{z})$ de la figure 6, les efforts normaux du sol sur la grue transmis par les pieds « gauche » et « droit », lorsque la grue est soumise au vent. (Hypothèses : le mouvement suivant $\vec{z}$ du conteneur ne sera pas considéré ; le chariot et le portique sont immobiles ; la masse des poutres supérieure, inférieure et des supports de galets est négligeable devant M_p.)

Q 7. En déduire la valeur (en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) de la vitesse de vent V_1 pour laquelle la grue bascule. En déduire la valeur (en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) de la vitesse de vent V_2 pour laquelle la grue glisse, en considérant au contact roue/rail un modèle de frottement sec de coefficient $f = 0{,}2$. Vérifier si les deux derniers critères de la fonction FS3 du cahier des charges sont validés, et proposer le cas échéant des solutions techniques.

III.B – Rôle du spreader et fonctionnement des vérins hydrauliques

Objectif

Vérifier les possibilités d'orientation du spreader dans les 3 directions et valider les 2 modes de fonctionnement d'un des vérins (libéré ou piloté).

Le conteneur est soulevé par un dispositif élaboré de moufle à douze brins de câbles. Les deux fonctions assurées sont :
- orienter le « spreader » pour le poser à plat sur le conteneur lors de la prise ;
- assurer l'équi-répartition de l'effort dans les brins lors des déplacements de la charge.

Elles sont assurées par les vérins hydrauliques 1, 2 et 3 de la figure 5. Les vérins possèdent 2 modes de fonctionnement : libéré (chambres dépressurisées) ou piloté (déplacement du spreader commandé par le conducteur).

Q 8. Indiquer dans le tableau B du document réponse quel mouvement (0, + ou −) imposer à chaque vérin pour assurer les rotations de sens positif du spreader autour des directions $\vec{x}$, $\vec{y}$ et $\vec{z}$.

Le schéma figure 7 décrit le circuit hydraulique de commande d'un des trois vérins (une documentation est proposée tableau 3 en page 12).

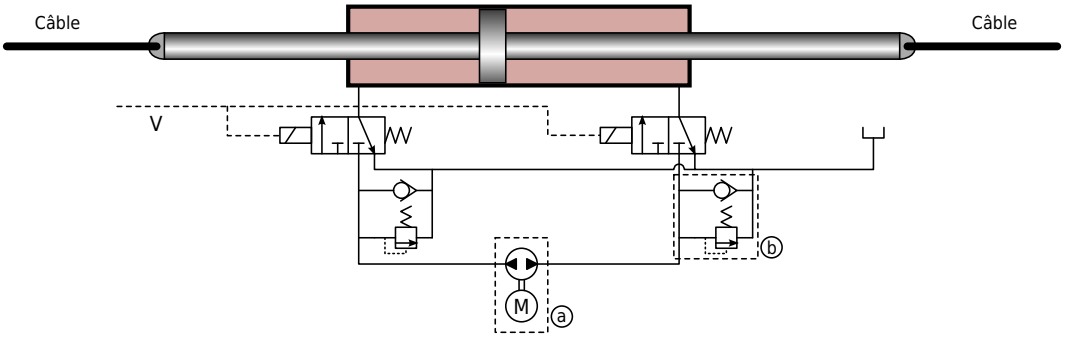


Figure 7 Schéma hydraulique de commande d'un vérin

Q 9. Indiquer à quels modes de fonctionnement correspondent les deux cas où la variable de commande V des distributeurs est validée ou pas. Quel est le rôle des composants du cadre a ? Quel est le rôle des composants du cadre b ?

Les parties précédentes ont eu pour finalité de vérifier la capacité d'une grue à satisfaire la fonction de service FS3 du cahier des charges partiel de la figure 2. L'objet de la partie qui suit concerne la fonction de service FS4, en s'intéressant plus particulièrement à l'élaboration d'une commande automatisée de déchargement.

IV Élaboration d'une commande automatisée de déchargement

Le port de Marseille souhaite offrir à ses clients les installations parmi les plus modernes au monde. Aussi, une étude prospective envisage l'automatisation des grues pour un chargement et un déchargement toujours plus efficaces et rapides. Le service technique de la Société portuaire souhaite implanter un nouveau système de commande, sans modifier la partie opérative couteuse (alimentation des moteurs, motorisation et chaine de transmission de puissance).

Un extrait du cahier des charges du système de commande automatisé est décrit ci-dessous :
- **stabilité :** système stable, dépassements de moins de 10% (en réponse à un échelon), marge de gain supérieure à 10 dB et marge de phase supérieure à 50° ;
- **rapidité :** temps de réponse à 5% inférieur à 10 s (en réponse à un échelon) ;
- **précision du positionnement de la charge sur le camion :** 10 cm ;
- **sensibilité aux perturbations :** aucune en régime permanent pour une perturbation due à un vent constant.

BY-NC-SA

IV.A – Asservissement de position du chariot

Objectif

Modéliser le procédé et choisir la loi de commande en position du chariot pour assurer les performances nécessaires au positionnement du conteneur.

Le comportement global de la grue est directement dépendant de la qualité de la commande du chariot. L'asservissement en position $y_{ch}(t)$ doit être stable, précis, sans dépassement et rapide devant la période de balancement du conteneur (temps de réponse à 5% de moins de 5 s).

Le déplacement du chariot est réalisé par un câble s'enroulant sur un tambour (voir figure 8), entrainé par un moteur associé à un réducteur. Le rapport de réduction du réducteur est $r_{ch} = 1/20$, le diamètre du tambour $d_{ch} = 0{,}54$ m et le moment d'inertie du tambour $J_t = 20\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$ (l'inertie du réducteur est négligée).

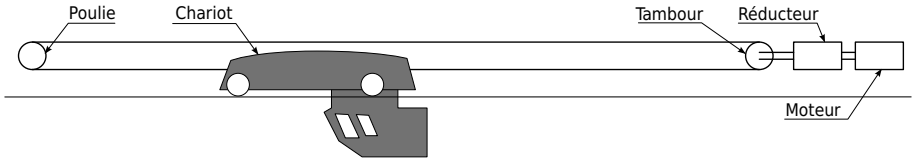


Figure 8 Architecture de la chaine de transmission de puissance de la motorisation du chariot

Le moteur de direction est une machine à courant continu et aimants permanents modélisée par les équations de comportement :

$$u(t) = R_{ch}i(t) + L_{ch}\frac{di}{dt}(t) + e(t) \quad ; \quad J_{eq}\frac{d\omega_m}{dt}(t) = C_m(t) \quad ; \quad e(t) = K_m\omega_m(t) \quad ; \quad C_m(t) = K_m i(t)$$

où $u(t)$ et $i(t)$ sont respectivement la tension aux bornes de l'induit et le courant d'induit, $e(t)$ la force contre-électromotrice, $C_m(t)$ et $\omega_m(t)$ le couple et la vitesse de rotation du moteur, $R_{ch} = 0{,}17\ \Omega$ et $L_{ch} = 3{,}7$ mH la résistance et l'inductance de l'induit, J_{eq} le moment d'inertie équivalent de la chaine de transmission ramené à l'arbre du moteur et $K_m = 2\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ la constante de couple (égale à la constante de force électromotrice).

Le modèle du moteur est intégré dans le schéma-bloc figure A du document réponse, correspondant à la chaine d'asservissement en position du chariot. Le rotor seul a pour moment d'inertie $J_m = 0{,}24\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$.

Q 10. Compléter le schéma-bloc de la figure A du document réponse et exprimer littéralement la fonction de transfert $H_m(p) = \frac{Y_{ch}(p)}{U(p)}$ sous forme canonique.

Le chariot a pour masse $M_{ch} = 27$ tonnes. Pour la synthèse du correcteur, un modèle simplifié du comportement est adopté en négligeant les effets du câble, de la poulie et de la charge sur le moment d'inertie équivalent rapporté à l'arbre moteur (les câbles s'enroulent sans glisser sur le tambour et leur élasticité est négligée).

Q 11. Déterminer l'expression littérale du moment d'inertie équivalent J_{eq} des éléments mobiles (à l'exception des câbles, de la poulie, du spreader et du conteneur) rapporté à l'arbre moteur de l'ensemble en mouvement.

Un correcteur proportionnel $C_2(p) = K_P$ est adopté, où $K_P = 3$. Le capteur est modélisé par un gain unitaire. Dans ces conditions, la fonction de transfert $H_{dir}(p) = \dfrac{Ych(p)}{YCch(p)}$, d'ordre 3, possède les pôles suivants : $p_1 = -41\ \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $p_2 = -3{,}4\ \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ et $p_3 = -1{,}5\ \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ et ne comporte pas de zéros.

Q 12. L'asservissement du chariot est-il stable ? Est-il précis pour une consigne en échelon ? Présentera-t-il des dépassements pour une entrée en échelon ? Déterminer une expression simplifiée de $H_{dir}(p)$ afin d'en déduire une valeur approximative du temps de réponse à 5% de l'asservissement en position du chariot. Conclure quant à l'objectif de cette partie.

IV.B – Modélisation dynamique du comportement de la charge

Objectif

Déterminer les équations du mouvement du conteneur de façon à en obtenir un modèle simple pour la synthèse de la commande.

En vue d'élaborer une commande automatisée du déchargement des conteneurs, une bonne compréhension de la dynamique du système est nécessaire. Cette partie vise à établir les équations du mouvement du conteneur.

Seul le vérin 3 est libéré. La charge peut alors balancer selon le modèle figure 9. Dans cette étude, le mouvement de levage est supposé arrêté et la vitesse de vent nulle. Les douze câbles supportant le conteneur sont assimilés à un seul câble indéformable, en liaison pivot à ses extrémités. Les liaisons entre les solides 0, 1, 2 et 3 sont supposées parfaites.

Le portique support du chariot est noté 0, le chariot 1, le câble 2 et l'ensemble {spreader + conteneur} 3.

BY-NC-SA

Paramétrage :

- le repère $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ est lié au portique fixe ; il est supposé galiléen avec $\vec{z}_0$ l'axe vertical ascendant ;
- la position du chariot telle que $\overrightarrow{OE} = y_{ch}(t)\,\vec{y}_0$ est notée $y_{ch}(t)$; l'angle $(\vec{z}_0, \vec{z}_2)$ d'inclinaison du câble $\theta(t)$ et l'angle $(\vec{z}_2, \vec{z}_3)$ d'inclinaison du conteneur par rapport au câble $\beta(t)$.

Données :

- $R_1(E, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ repère lié au chariot de levage (1) ;
- $R_2(E, \vec{x}_0, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$ repère lié au câble 2 ; $l_2 = 50$ m la longueur EF du câble ; la masse est négligée ;
- $R_3(F, \vec{x}_0, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$ repère lié à l'ensemble {spreader + conteneur} ; $m_3 = 50$ tonnes la masse du solide 3 ; G_3 le centre de gravité du solide 3, tel que $\overrightarrow{G_3F} = h_3\vec{z}_3$ où $h_3 = 2{,}5$ m ; la matrice d'inertie du solide 3 s'écrit

$$I(G_3,3) = \begin{pmatrix} A_3 & 0 & 0 \\ 0 & B_3 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{pmatrix}_{(\vec{x}_0,\vec{y}_3,\vec{z}_3)} \quad \text{où} \quad \begin{vmatrix} A_3 = & 52 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 \\ B_3 = & 600 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 \\ C_3 = & 600 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 \end{vmatrix} ;$$

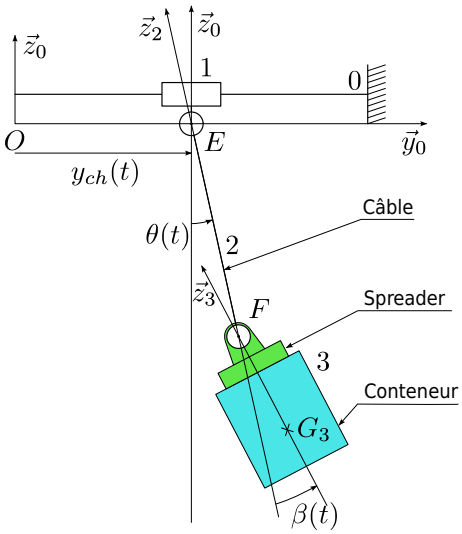


Figure 9 Paramétrage du mouvement de direction de la grue et du conteneur dans le plan (y_0, z_0)

- la motorisation M_D du mouvement de direction exerce, par l'intermédiaire de câbles, des actions mécaniques sur (1) qui se réduisent à un glisseur de la forme $\vec{R}(M_D \to 1) = F\vec{y}_0$;
- l'action mécanique du câble sur le spreader est notée $\vec{R}(2 \to 3) = F_{23}\vec{z}_2$.

Q 13. Déterminer le nombre de degrés de liberté et le nombre d'actionneurs du modèle proposé figure 9. En déduire le nombre de degrés de liberté non motorisés. Expliquer pourquoi il est difficile de poser le conteneur sur un camion avec précision ?

Q 14. Déterminer littéralement, dans la base B_2 et au point G_3, la vitesse $\vec{V}_{G_3\in 3/0}$ puis le torseur dynamique $\{D_{3/0}\}$ de l'ensemble {conteneur + spreader} (3) dans son mouvement par rapport au repère galiléen R_0.

Q 15. En précisant l'isolement et le bilan des actions mécaniques extérieures, déterminer l'équation différentielle de résultante en projection sur $\vec{y}_2$, reliant les paramètres $\theta(t)$, $\beta(t)$ et $y_{ch}(t)$, et sans inconnue de liaison.

Les deux autres équations différentielles (équation de résultante en projection sur $\vec{z}_2$ et équation de moments) sont données :

$$\begin{vmatrix} m_3\left[l_2\dot{\theta}^2 - \ddot{y}_{ch}\sin\theta + h_3(\ddot{\theta}+\ddot{\beta})\sin\beta + h_3(\dot{\theta}+\dot{\beta})^2\cos\beta\right] = -m_3 g\cos\theta + F_{23} \\ A_3(\ddot{\theta}+\ddot{\beta}) = -F_{23}h_3\sin\beta \end{vmatrix}$$

Q 16. En supposant que θ, β, $\dot{\theta}$ et $\dot{\beta}$ sont petits, linéariser les équations précédentes.

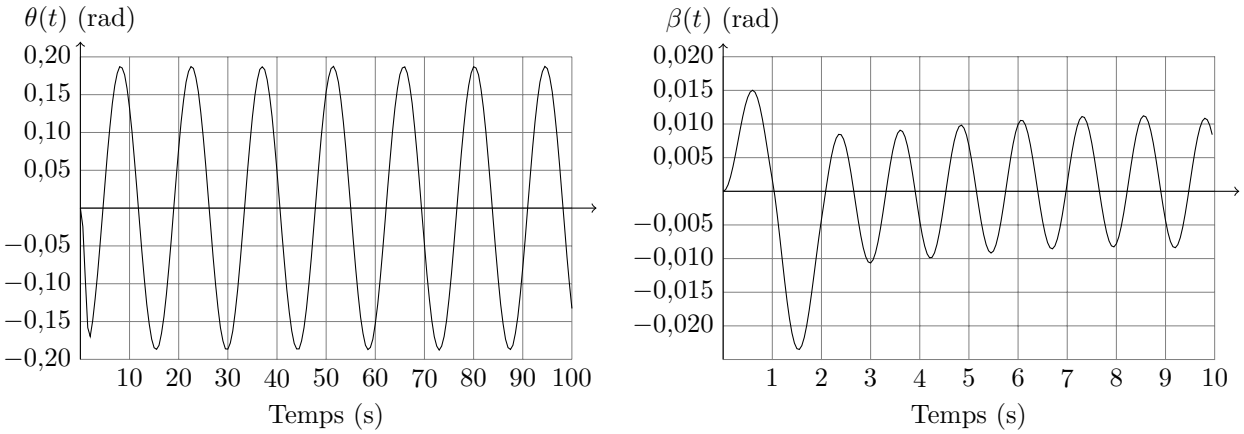


Figure 10 Résultat de simulation

Les courbes temporelles figure 10 ont été obtenues par simulation, à partir des équations précédentes, pour un échelon en $y_{ch}(t)$ de 10 m. Une étude fréquentielle complémentaire permet de montrer que le paramètre β est négligeable dans le comportement du conteneur. Nous pouvons donc adopter le modèle défini figure 11.

BY-NC-SA

Objectif

Piloter le mouvement du conteneur à travers une boucle fermée et ajuster le correcteur pour satisfaire les performances du cahier des charges.

Un modèle simplifié figure 11 est adopté. L'équation différentielle liant $\theta(t)$ et $y_{ch}(t)$ est admise :

$$\ddot{\theta}(t) + \frac{g}{L}\theta(t) = \frac{-\ddot{y}_{ch}(t)}{L}$$

où $L = 52{,}5$ m désigne la longueur EG_3.

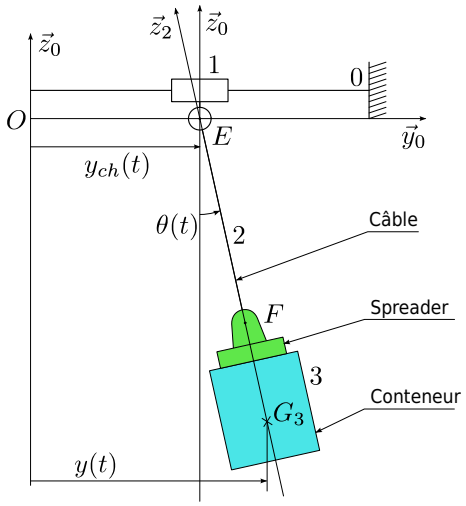


Figure 11 Modèle simplifié du mouvement de direction de la grue et du conteneur

Un schéma d'asservissement à deux boucles est proposé, figure 12 :
- une boucle d'asservissement du chariot en position $Y_{ch}(p)$;
- une boucle d'asservissement de la position du conteneur $Y(p)$ (incomplète).

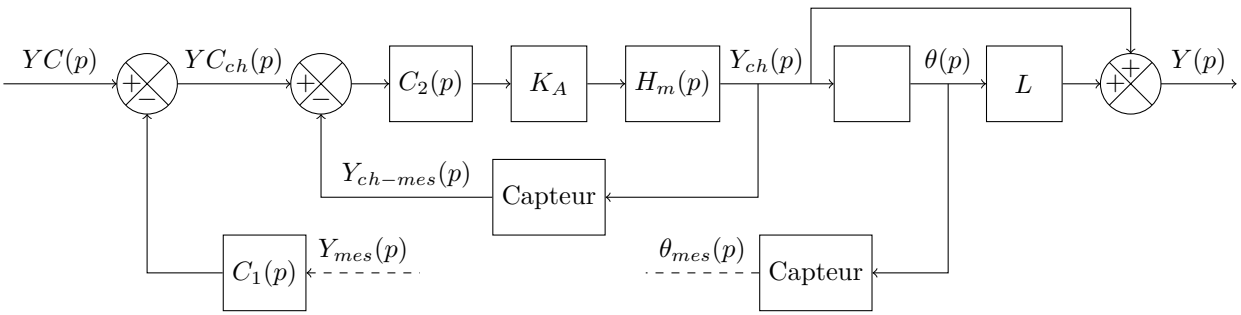


Figure 12 Schéma-bloc de l'asservissement de la position du conteneur

Notations :
- $YC(p)$ est la consigne de déplacement de la charge ;
- $Y(p)$ le déplacement de la charge ;
- $YC_{ch}(p)$ la consigne de déplacement du chariot ;
- $Y_{ch}(p)$ le déplacement du chariot ;
- $\theta(p)$ l'angle d'inclinaison de la charge ;
- $\theta_{mes}(p)$ la valeur mesurée par le capteur d'angle de la charge ;
- $Y_{ch-mes}(p)$ la valeur mesurée par le capteur de déplacement du chariot ;
- $Y_{mes}(p)$ l'image de la position $Y(p)$ du conteneur, issue d'une combinaison des mesures $\theta_{mes}(p)$ et $Y_{ch-mes}(p)$;
- $C_1(p)$ et $C_2(p)$ les fonctions de transfert des deux correcteurs ;
- $K_A = 50$ le gain de la chaine de puissance du moteur.

Q 17. Compléter le bloc vide du schéma-bloc du document réponse figure B. Déterminer l'expression linéarisée de $Y_{mes}(p)$ en fonction de $\theta_{mes}(p)$ et de $Y_{ch-mes}(p)$, puis compléter le schéma-bloc du document réponse figure B pour réaliser la seconde boucle d'asservissement en $Y(p)$.

Le schéma-bloc de la figure 12 est simplifié et remplacé par celui de la figure 13. Pour la suite, l'expression simplifiée $H_{\text{dir}}(p) = \dfrac{1}{1+Tp}$ est adoptée, où $T = 0{,}67$ s.

BY-NC-SA

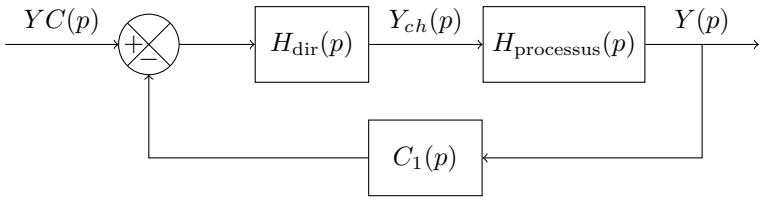


Figure 13 Schéma-bloc simplifié de l'asservissement de la position du conteneur

Q 18. Déterminer la fonction de transfert $H_{\text{processus}}(p)$ et en déduire l'expression littérale de la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée $FTBO_{nc}(p)$ du schéma-bloc de la figure 13. Tracer les diagrammes de Bode (asymptotiques et allure des diagrammes réels) de cette fonction de transfert en précisant les éléments caractéristiques (pentes, pulsations de cassure, gain statique). Le système en boucle fermée, pour $C_1(p) = 1$, est-t-il stable ? Est-il précis ?

Pour rappel, l'erreur s'écrit $\mu(t) = yc(t) - y(t)$.

Q 19. Déterminer la condition que doit vérifier $C_1(p)$ pour que l'erreur en réponse à un échelon en régime permanent soit nulle.

Par la suite, le correcteur $C_1(p) = \frac{5p}{1+p/100}$ est adopté.

Q 20. En déduire les diagrammes de Bode asymptotiques et l'allure des diagrammes de Bode réels de la fonction de transfert en boucle ouverte corrigée ($FTBO_c(p)$), ainsi que les marges de phase et de gain. Pour le calcul des marges, la courbe réelle **des gains** pourra être approchée par le tracé asymptotique. Pour ce tracé, une attention particulière devra être apportée à l'emplacement de la courbe par rapport à l'axe 0 dB, en précisant la (ou les) pulsation(s) de coupure à 0 dB.

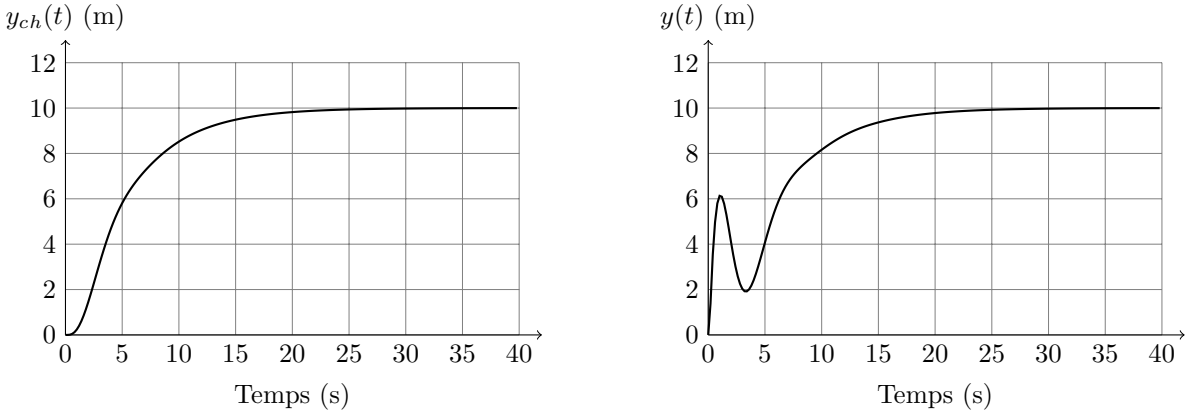


Figure 14 Courbes de réponses temporelles obtenues par un asservissement de position classique

Q 21. Les courbes de réponses indicielles figure 14 sont obtenues après réglage du correcteur $C_1(p)$, en boucle fermée et en réponse à un échelon de consigne d'amplitude 10 mètres. Conclure vis-à-vis du cahier des charges du système de commande décrit page 6.

IV.D – Élaboration d'une commande avec mise en forme de la consigne

Objectif

Mettre en forme la consigne de mouvement du chariot pour améliorer la réponse dynamique du conteneur.

Une charge suspendue à un câble forme un système très peu amorti. L'asservissement classique est mal adapté car la consigne du chariot est élaborée *a posteriori*, à partir de l'erreur entre la consigne et la valeur atteinte.

Un bon conducteur anticipe le balancement de la charge dans le pilotage du chariot. Cette observation conduit à utiliser un « shaper » permettant de mettre en forme la consigne du chariot à partir du déplacement voulu du conteneur (figure 15).

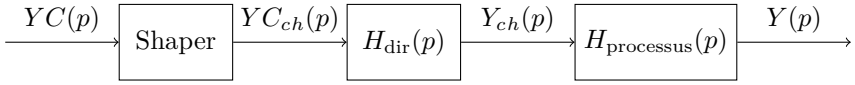


Figure 15 Implantation du shaper dans le schéma-bloc

BY-NC-SA

Dans la gamme de pulsations étudiée et dans un souci de simplification, l'asservissement du chariot est supposé remplir parfaitement son rôle : $H_{\text{dir}}(p) = 1$. La fonction de transfert du processus est donnée :

$$H_{\text{processus}}(p) = \frac{Y(p)}{Y_{ch}(p)} = \frac{g/L}{p^2 + g/L}$$

Q 22. Sans shaper, donner l'expression et dessiner en couleur (en précisant la légende) l'allure de la réponse temporelle $y(t)$ à un déplacement y_{ch} du chariot en échelon de 5 m, en précisant les points caractéristiques de la courbe. Le tableau 4 en page 12 propose quelques transformées de Laplace usuelles si nécessaire. À quel instant faut-il déplacer à nouveau le chariot pour stabiliser le conteneur à 10 m ? Tracer en couleur (en précisant la légende) l'allure de la réponse temporelle obtenue.

Le shaper retarde la moitié du signal de consigne d'un temps τ (figure 16) : $yc_{ch}(t) = \frac{1}{2}\left(yc(t) + yc(t-\tau)\right)$.

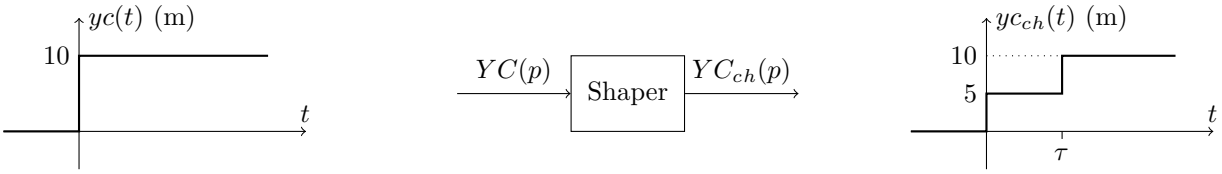


Figure 16 Mise en forme du signal de consigne par le shaper

Q 23. Quelle valeur doit prendre τ pour annuler les oscillations de la charge en fin de mouvement ? Dessiner sur le même graphe les allures de $yc(t)$, $yc_{ch}(t)$, $y_{ch}(t)$ et $y(t)$ en indiquant les éléments caractéristiques.

Q 24. Déterminer la fonction de transfert du shaper $SH(p) = \frac{YC_{ch}(p)}{YC(p)}$. Montrer que le module de cette fonction s'annule pour certaines valeurs de la pulsation ω à déterminer et justifier le tracé de la figure 17.

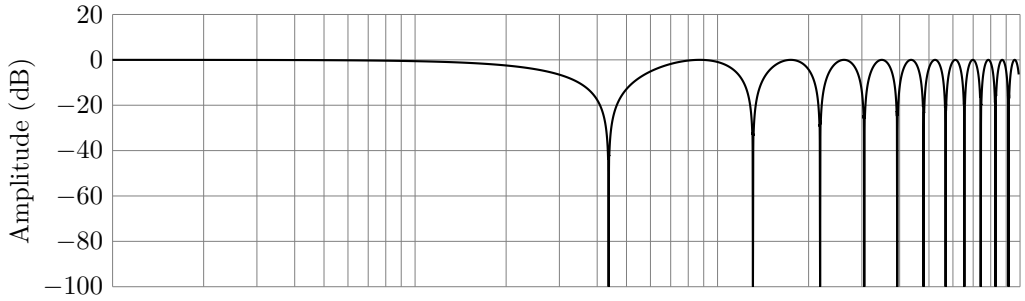


Figure 17 Diagramme de Bode des gains du shaper

Q 25. Justifier l'allure des diagrammes de Bode réels des fonctions de transfert $Y(p)/YC(p)$ avec et sans shaper, donnés figure 18. Au regard de ces tracés fréquentiels, justifier qualitativement les réponses temporelles tracées en question 22.

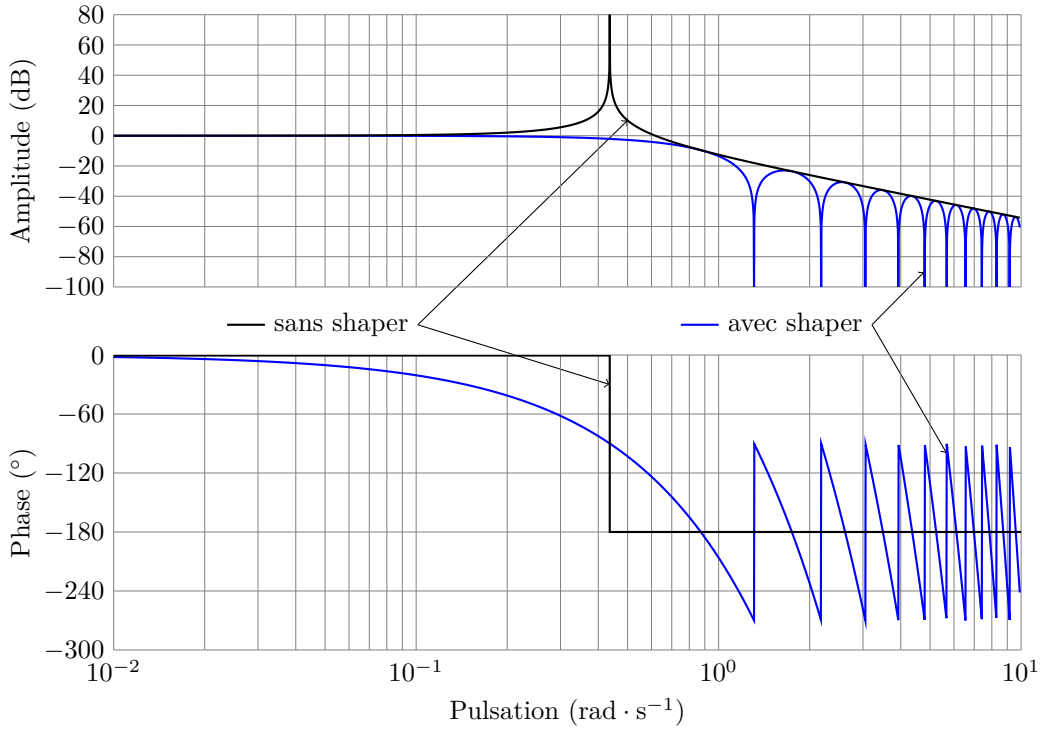


Figure 18 Diagrammes de Bode du processus avec et sans shaper

BY-NC-SA

En pratique, le système est soumis à des perturbations dues au vent, modélisées par une entrée $Y_{\text{pert}}(p)$ (voir figure 19).

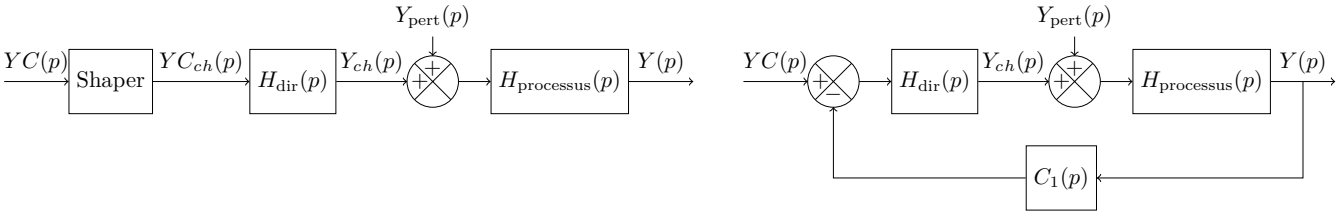


Figure 19 Structures de commande envisagées avec présence d'une perturbation

Q 26. Analyser qualitativement la sensibilité des deux lois de commandes à une perturbation en échelon, en considérant les critères de précision et de stabilité (rappel : l'erreur s'écrit $\mu(t) = yc(t) - y(t)$). En déduire une analyse critique des deux solutions de commande au regard des critères du cahier des charges de la page 6.

V Conclusion

Q 27. Pour chaque critère du cahier des charges dont l'extrait est donné tableau 1, déterminer si le niveau associé a pu être validé au cours de l'étude proposée.

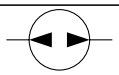
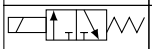
Schéma	Désignation	Caractéristiques
	Moteur électrique	avec accouplement mécanique
	Pompe hydraulique	à double sens
	Clapet anti-retour	
	Limiteur de pression	
	Distributeur hydraulique 3–2	Mono-stable à commande électrique
	Réservoir de charge	

Tableau 3 Documentation technique : Schématisation des composants hydrauliques

Fonctions temporelles	Transformées de Laplace
$\cos(\omega t)U(t)$	$\dfrac{p}{p^2+\omega^2}$
$\sin(\omega t)U(t)$	$\dfrac{\omega}{p^2+\omega^2}$
$e^{-at}\cos(\omega t)U(t)$	$\dfrac{p+a}{(p+a)^2+\omega^2}$
$e^{-at}\sin(\omega t)U(t)$	$\dfrac{\omega}{(p+a)^2+\omega^2}$

Tableau 4 Transformées de Laplace

• • • FIN • • •

BY-NC-SA

CONCOURS CENTRALE•SUPÉLEC

NOM : .....

Prénom : .....

Signature :

Épreuve de **S2I** Filière **PSI**

NUMÉRO DE PLACE

Ne rien porter sur cette feuille avant d'avoir rempli complètement l'en-tête

Question 2

	Valeur de la vitesse moteur nécessaire (tr/min)	**Performance du tableau 2 satisfaite (O/N)**	**Valeur de la puissance moteur nécessaire (kW)**	**Performance du tableau 2 satisfaite (O/N)**
Moteur de translation				
Moteur de direction				
Moteur de levage en montée				
Moteur de levage en descente				

Tableau A Validation des performances de la motorisation de la grue

Question 8

	Vérin 1	**Vérin 2**	**Vérin 3**
Rotation autour de $\vec{x}$			
Rotation autour de $\vec{y}$			
Rotation autour de $\vec{z}$			

Tableau B Sens de déplacement des vérins

2013-03-25 11 :54 :46

Ne rien écrire dans la partie barrée

2012-002-DR

Question 10

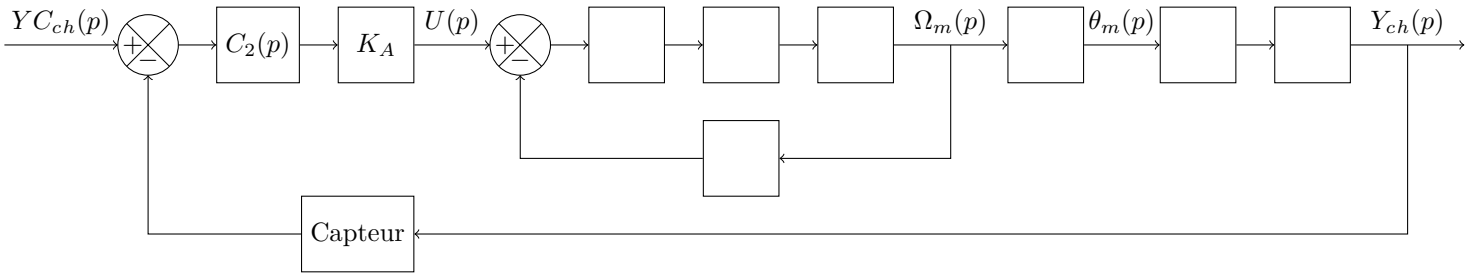


Figure A Modèle de la commande du chariot

Question 17

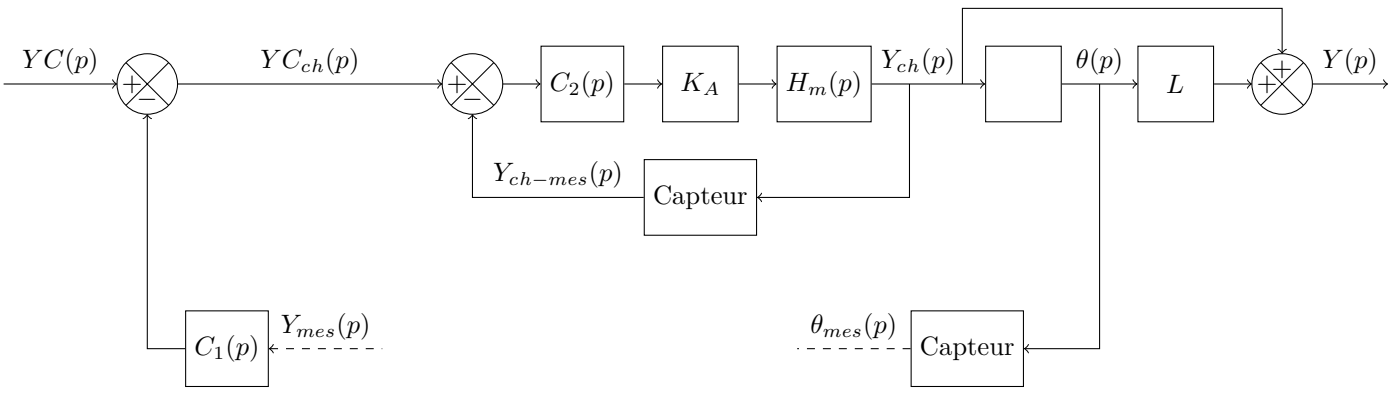


Figure B Schéma-bloc de l'asservissement de position du conteneur

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de PSI chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Ingénierie système : besoin, exigences et diagrammes SysML
- Architecture fonctionnelle et structurelle : chaînes d'information et de puissance
- Transmetteurs de puissance et trains d'engrenages
- Énergétique : puissances, théorème de l'énergie cinétique, rendement
- Mobilité, hyperstatisme et petits déplacements
- Chaînes de solides : liaisons équivalentes, mobilité et hyperstatisme
- Statique des solides : principe fondamental et stratégie d'isolement
- Performances des systèmes asservis : stabilité, précision, rapidité

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière :
écrire sur WhatsApp

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/centrale/psi