

Final

Durée : 2 heures

Seul le document reprographié est autorisé

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 boîtes 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.

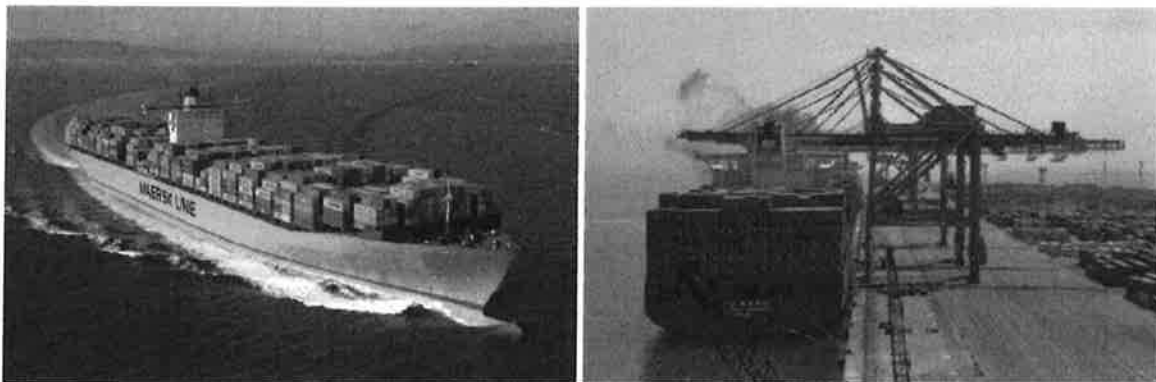
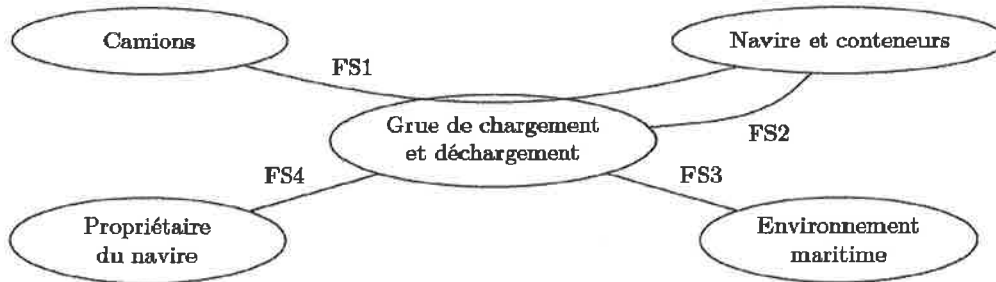


Figure 1 Cargo porte-conteneurs et grues de chargement-déchargement

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 coût 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

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

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 chaînes de motorisation et des systèmes de commande des grues pour en améliorer la fiabilité et la cadence.

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 côté 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 $V_{tm} = 0,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, accélération maximale $\gamma_{tm} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. La motorisation doit pouvoir déplacer la grue malgré une force du vent sur le portique $F_{vent} = 400 \text{ kN}$. La masse du portique vaut $M_p = 1080 \text{ tonnes}$;
- direction : vitesse maximale $V_{dm} = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, accélération maximale $\gamma_{dm} = 0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ pour un chariot de masse $M_{ch} = 27 \text{ tonnes}$;
- levage : vitesse maximale $V_{lmv} = 1,65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à vide (c’est-à-dire sans conteneur) et $V_{lmp} = 0,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ avec un conteneur de masse $M_c = 40 \text{ tonnes}$ et un spreader de masse $M_s = 10 \text{ tonnes}$, accélération maximale $\gamma_{lm} = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

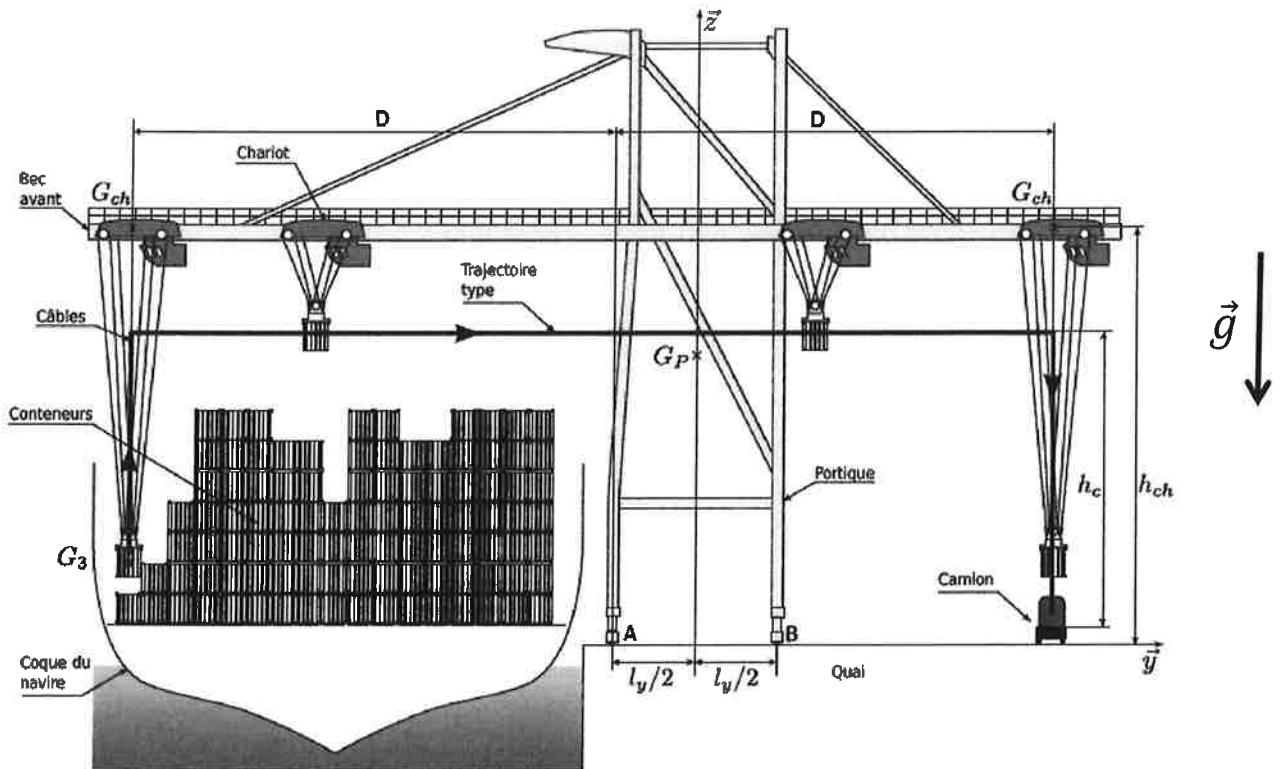


Figure 3 Grue de déchargement des conteneurs

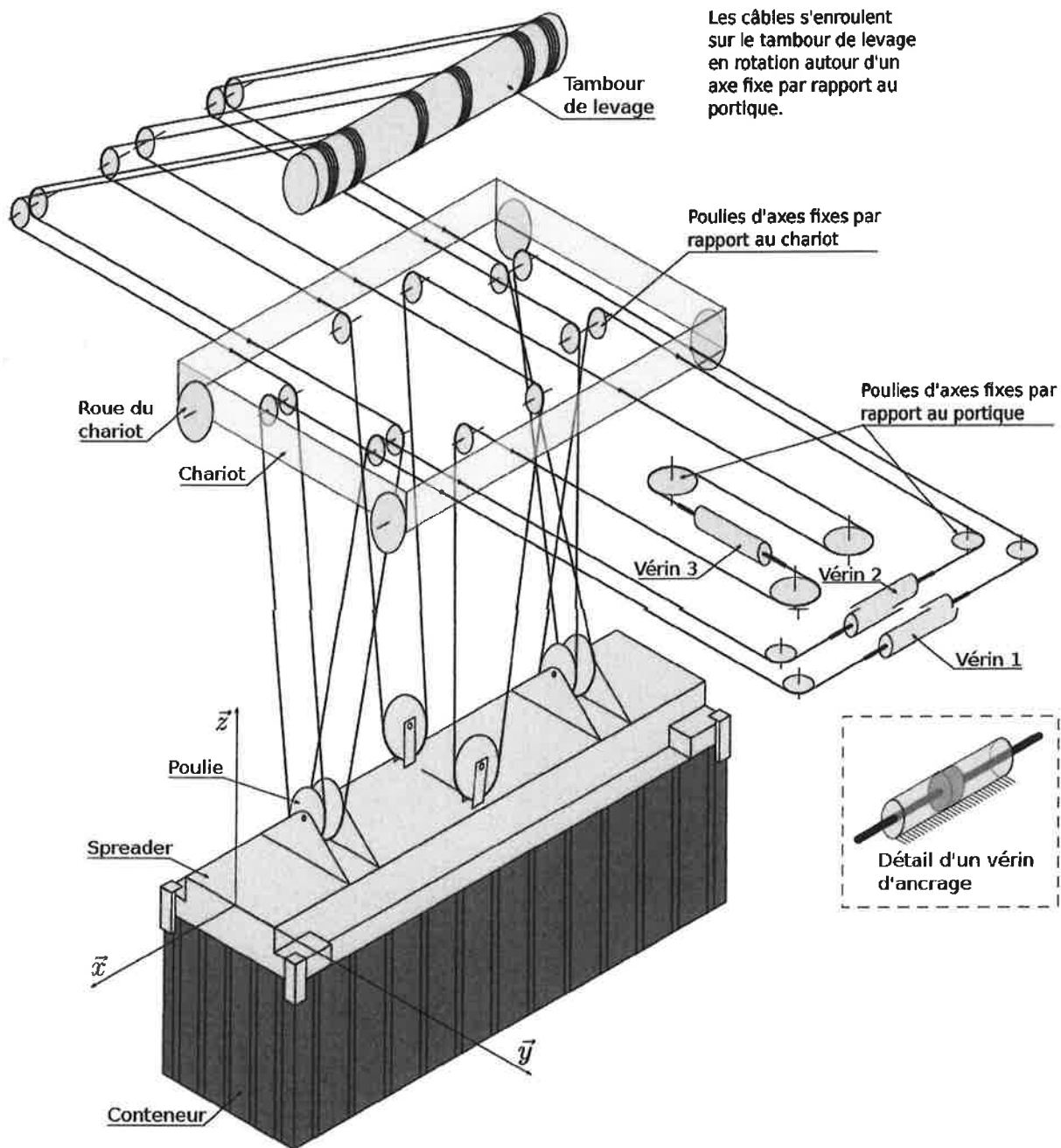


Figure 5 Câblage assurant le mouvement de levage et l'orientation d'un conteneur de 20 pieds

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.

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 $\vec{OE} = y_{ch}(t) \vec{y}_0$ 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 $\vec{G}_3F = h_3 \vec{z}_3$ où $h_3 = 2,5$ m ; la matrice d'inertie du solide 3 s'écrit

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

- 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 $\vec{R}(M_D \rightarrow 1) = F \vec{y}_0$;

- On rappelle que la masse d'un chariot de levage, notée m_1 , est de 27 tonnes.
- On vous fournit sur l'annexe différentes informations utiles pour la suite (les figures de calculs...)

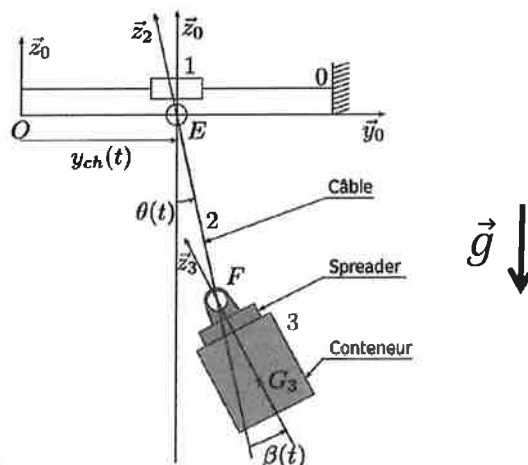


Figure 9 Paramétrage du mouvement de direction de la grue et du conteneur dans le plan (y_0, z_0)

Travail à effectuer

Q1 : **Compléter** le graphe des liaisons du document réponses 1(DR1)

Q2 : **Déterminer** $\overrightarrow{\Omega}_{3/0}$; le **noter** sur DR1

Q3 : **Déterminer** $\overrightarrow{V}_{G3 \in 3/R0}$ l'exprimer sous sa forme la plus simple sur DR1 puis **vérifier** que son expression dans la base b_2 est :

$$\overrightarrow{V}_{G3 \in 3/R0} = [\dot{y}_{ch} \cos\theta + l_2 \dot{\theta} + h_3(\dot{\theta} + \dot{\beta}) \cos\beta] \vec{y}_2 + [-\dot{y}_{ch} \sin\theta + h_3(\dot{\theta} + \dot{\beta}) \sin\beta] \vec{z}_2$$

Q4 : **Calculer** le double des énergies cinétiques des solides 1,2 et 3 , les **noter** sur DR1, puis **écrire** le double de l'énergie cinétique du système $\{E\} = \{1 + 2 + 3\}$ notée : $2T_{E/R0}$ sur DR1.

Q5 : D'après le tableau de l'annexe concernant les différents coefficients énergétiques, **déterminer** les trois coefficients énergétiques non nuls. Les **noter** sur DR1.

Q6 : Etant donné qu'il y a trois paramètres cinématiques et que nous gardons un paramétrage compatible avec les liaisons, nous avons trois équations de Lagrange notées :

$$L_{y_{ch},E/R0} ; L_{\theta,E/R0} \text{ et } L_{\beta,E/R0}$$

On vous donne les deux dernières sans contre partie (eh oui ! Noël n'est pas si loin ;-), soient :

$$\begin{aligned} L_{\theta,E/R0} \rightarrow & m_3 * (l_2 * \cos\theta + h_3 * \cos(\theta + \beta)) \ddot{y}_{ch} \\ & + [m_3 * (l_2^2 + h_3^2 + 2 * h_3 * l_2 * \cos\beta) + A_3] \ddot{\theta} \\ & + [m_3 * (h_3^2 + h_3 * l_2 * \cos\beta) + A_3] \ddot{\beta} - m_3 * h_3 * l_2 \\ & * \sin\beta * (\dot{\beta}^2 + 2 * \dot{\theta} \dot{\beta}) + m_3 * g \\ & * (l_2 * \sin\theta + h_3 * \sin(\theta + \beta)) = 0 \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned} L_{\beta,E/R0} \rightarrow & m_3 * h_3 * \cos(\theta + \beta) * \ddot{y}_{ch} \\ & + [m_3 * (h_3^2 + h_3 * l_2 * \cos\beta) + A_3] \ddot{\theta} + [m_3 * h_3^2 + A_3] \ddot{\beta} \\ & + m_3 * h_3 * l_2 * \sin\beta * \dot{\theta}^2 + m_3 * g * h_3 * \sin(\theta + \beta) = 0 \end{aligned}$$

On vous demande donc de **vérifier** (Noël a ses limites !!) sur feuille de copie que la première équation de Lagrange est :

$$L_{y_{ch}, E/R_0} \rightarrow (m_1 + m_3)\ddot{y}_{ch} + m_3 * [l_2 * (\ddot{\theta} \cos\theta - \dot{\theta}^2 \sin\theta) + h_3 * ((\ddot{\theta} + \ddot{\beta}) \cos(\theta + \beta) - (\dot{\theta} + \dot{\beta})^2 \sin(\theta + \beta))] = F$$

Exploitation des équations de Lagrange.

Q7 : **Nommer** ces équations et **citer** leur intérêt ? **Répondre** sur DR2.

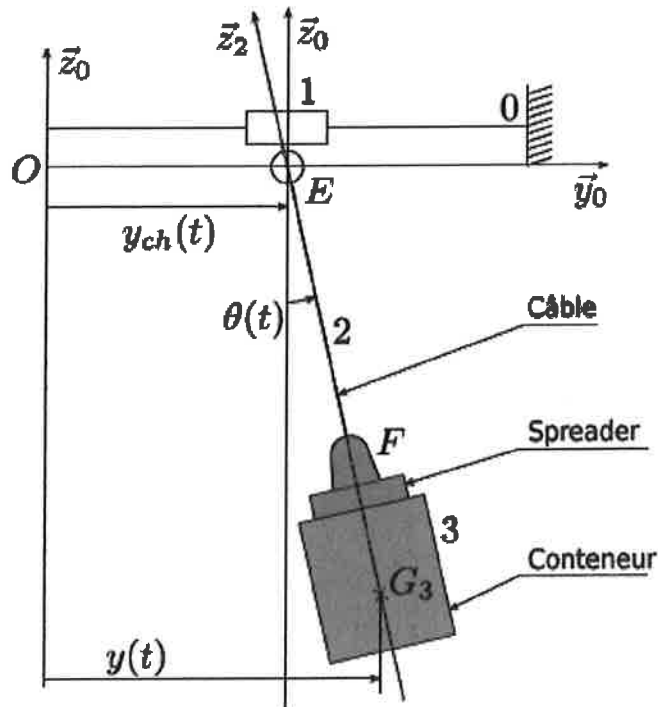
Q8 : **Rechercher** les différents équilibres paramétriques mathématiquement possibles en **complétant** le tableau du document réponses2 (DR2) puis **entourer** ceux qui sont possibles physiquement (●* : 2 est un câble !!).

Q9 : On se propose de linéariser les équations de Lagrange autour de la position d'équilibre :

$y_{ch} = y_{ch_0} = qcq$; $\theta_0 = 0$ et $\beta_0 = 0$; pour cela, vous poserez : $y_{ch} = y_{ch_0} + \varepsilon_{y_{ch}}$; $\theta = \theta_0 + \varepsilon_\theta$ et $\beta = \beta_0 + \varepsilon_\beta$; **déterminer** ces trois équations linéarisées. Les **écrire** sur DR2

Q10 : avec les valeurs numériques fournies et une première évaluation des paramètres cinématiques, on s'aperçoit que le paramètre ε_β et ses dérivées n'ont quasiment aucune influence sur les deux autres paramètres cinématiques $\varepsilon_{y_{ch}}$ et ε_θ . On peut donc négliger l'équation en ε_β et simplifier nos deux autres équations en posant dans celles-ci : $\varepsilon_\beta = \dot{\varepsilon}_\beta = \ddot{\varepsilon}_\beta = 0$ et $L = l_2 + h_3$. De plus, on peut vérifier que A_3 est négligeable devant :

$m_3(l_2 + h_3)^2$. On obtient alors la figure ci-après :



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

Réécrire ces deux équations linéarisées et simplifiées en *tenant compte des remarques précédentes*, sur DR2.

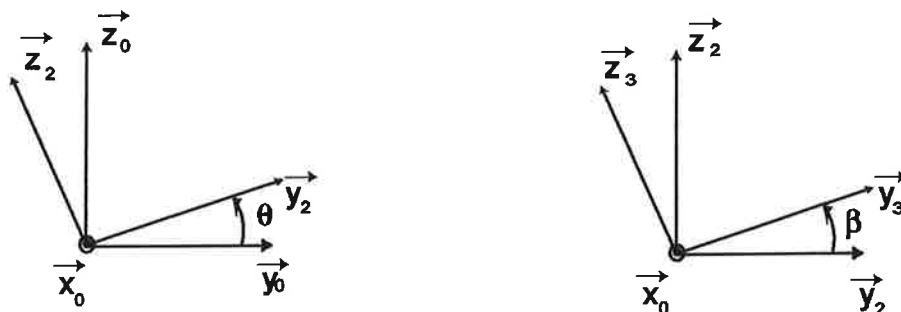
Q11: en posant comme vecteur d'état $X = \begin{bmatrix} \epsilon_{y_{ch}} \\ \epsilon_{\theta} \end{bmatrix}$, compléter, sur DR2, les matrices masse et raideur. Entourer les termes de couplage et les nommer.

C'est à partir de ces deux équations qu'on va pouvoir contrôler la position du conteneur $y(t)$, (i.e le ballant du conteneur) définie sur le modèle simplifié ci-dessus, en fonction de Y_{ch} et θ . Mais cela est une autre histoire...

FIN,

Bon intersemestre !

figures de calculs



Changement de bases

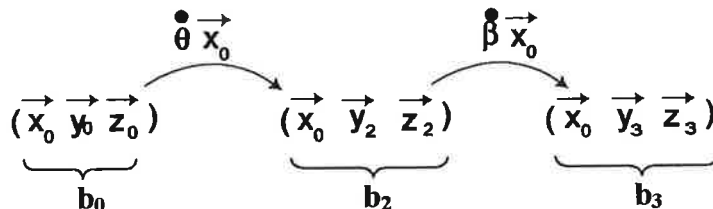
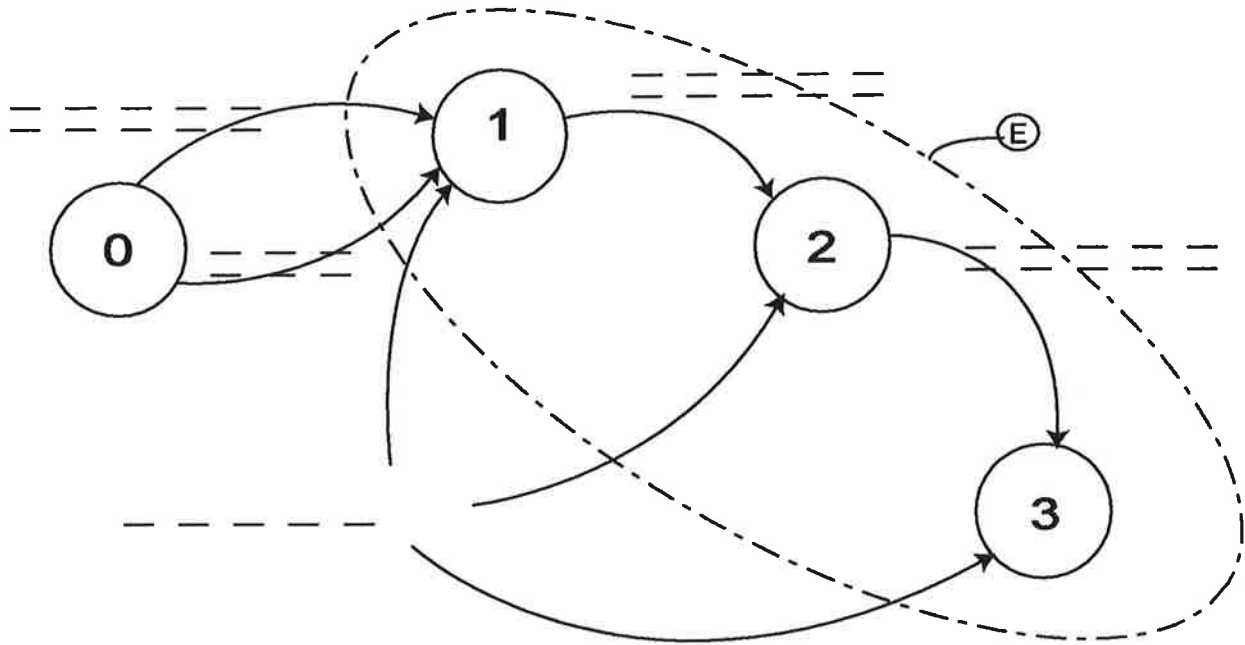


Tableau des différents coefficients énergétiques :

Actions mécaniques externes	Actions mécaniques internes	Coefficients énergétiques associés
pes → 1		$Q_{q_i, pes \rightarrow 1 / R_0} = 0$
pes → 2		$Q_{q_i, pes \rightarrow 2 / R_0} = 0$
pes → 3		$Q_{q_i, pes \rightarrow 3 / R_0} \neq 0$
F → 1		$Q_{q_i, F \rightarrow 1 / R_0} \neq 0$
0 → 1		$Q_{q_i, 0 \rightarrow 1 / R_0} = 0$
	1 ↔ 2	$Q_{q_i, 1 \leftrightarrow 2} = 0$
	2 ↔ 3	$Q_{q_i, 2 \leftrightarrow 3} = 0$

ANNEXE

Q1 : Graphe des liaisons à compléter



Q2 : expression de la vitesse angulaire

$$\vec{\Omega}_{3/0} = \underline{\hspace{10em}}$$

Q3 : expression de la vitesse sous sa forme la plus simple

$$\vec{V}_{G3\epsilon3/R_0} = \underline{\hspace{15em}}$$

Q4 : expressions des doubles des énergies cinétiques

$$2T_{1/R_0} = \underline{\hspace{10em}} \quad 2T_{2/R_0} = \underline{\hspace{10em}}$$

$$2T_{3/R_0} = \underline{\hspace{15em}}$$

$$2T_{E/R_0} = \underline{\hspace{15em}}$$

Q5 : expressions des coefficients énergétiques

$$Q_{\theta, pes \rightarrow 3/R_0} = \underline{\hspace{15em}}$$

$$Q_{\beta, pes \rightarrow 3/R_0} = \underline{\hspace{10em}} \quad Q_{y, F \rightarrow 1/R_0} = \underline{\hspace{10em}}$$

NOM :

DR1

Q7 : Noms des équations de Lagrange trouvées : _____

Leur intérêt : _____

Q8 : tableau des équilibres paramétriques mathématiquement puis physiquement possibles à compléter.

$y_{ché}$	$\theta_é$	$\beta_é$
<i>quelconque</i>	0	0
<i>quelconque</i>		
<i>quelconque</i>		
<i>quelconque</i>		

Q9 : équations linéarisées

$L_{linéy,E/R0} \rightarrow$ _____

$L_{liné\theta,E/R0} \rightarrow$ _____

$L_{liné\beta,E/R0} \rightarrow$ _____

Q10 : *nouvelles équations linéarisées et simplifiées*

$L_{linéy,E/R0} \rightarrow$ _____

$L_{liné\theta,E/R0} \rightarrow$ _____

Q 11 : écriture matricielle

$$\left[\quad \quad \right] \begin{bmatrix} \ddot{y}_{ch} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \left[\quad \quad \right] \begin{bmatrix} \epsilon_{ych} \\ \epsilon_{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \end{bmatrix}$$

Noms des termes de couplage : _____

NOM :

DR2