

# Durée de l'épreuve : 2h00

## Aucun document autorisé - Calculatrice autorisée

*La notation tiendra compte de la rigueur des raisonnements et de la qualité graphique de la composition.*

*Les résultats doivent être encadrés.*

*Toutes les réponses sont à formuler sur le Document Réponses.*

## EXOLIFT

### Système d'aide à la montée d'échelle au sein d'un parc éolien

Dans une problématique d'entretien du parc éolien, les techniciens sont appelés à monter et descendre plusieurs fois par jour des échelles pouvant mesurer jusqu'à 200 mètres. Les fabricants de treuils et de plateformes suspendues dans le domaine du bâtiment et des travaux publics mettent à profit leur expérience pour concevoir des systèmes autonomes d'aide à la montée.

Ces systèmes permettent aux techniciens de maintenance de profiter d'une aide à la montée et permettent ainsi de réduire les temps d'arrêt des éoliennes.



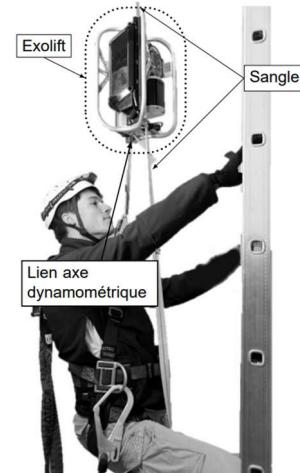
Ce sujet s'intéresse à un système Exolift installé à demeure dans l'éolienne qui s'insère dans la queue de l'éolienne sur consigne du technicien.



#### I. Analyse structurelle

D'une manière générale, l'Exolift utilise le phénomène d'adhérence entre la sangle et un galet motorisé.

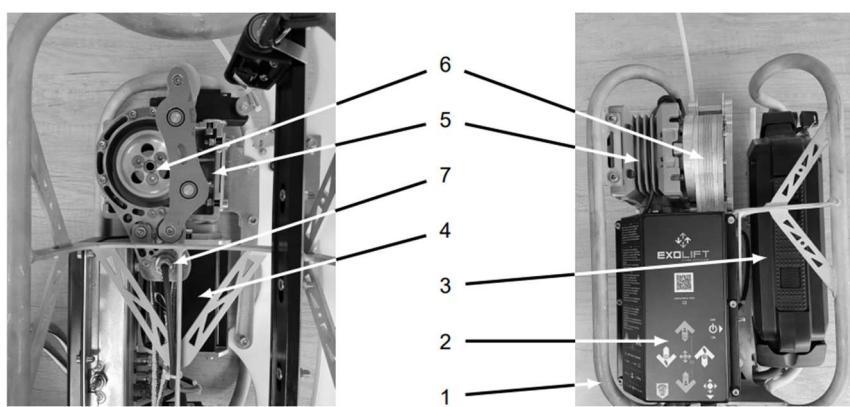
La sangle étant fixée à l'échelle, lorsque le galet va tourner, l'ensemble Exolift va alors se déplacer le long de la sangle et supporter une partie du poids de l'utilisateur à la montée, comme à la descente (figure 1).



**Figure 1** – Technicien équipé de l'ensemble Exolift.

Il est principalement constitué (figure 2) :

- d'un cadre **1**,
- d'un panneau de commande **2**,
- d'une batterie **3**,
- d'un moteur électrique **4**,
- d'un réducteur de vitesse avec renvoi d'angle **5**,
- d'un galet motorisé **6**.

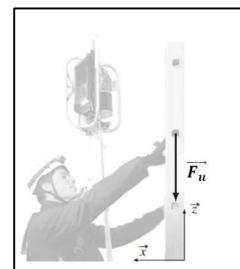


**Figure 2** - À gauche, vue de l'Exolift suivant l'axe du galet (sans la batterie) ; à droite, vue de face avec la batterie.

Le panneau de contrôle/commande **2** permet à l'utilisateur d'obtenir des informations sur l'état du système (par le biais de 5 leds multicolores) et d'envoyer des ordres de commande (consigne de vitesse, monter/descendre via une manette de commande, ...).

L'Exolift comporte également un axe dynamométrique **7**, permettant de mesurer l'action mécanique de l'utilisateur sur l'Exolift, et un codeur incrémental au niveau de l'arbre du moteur permettant de mesurer la vitesse angulaire du moteur.

Enfin, une option sur l'Exolift permet de le renvoyer à vide en haut ou en bas de l'échelle afin qu'une autre personne puisse l'utiliser. Toutes ces commandes et informations sont traitées par une carte électronique embarquée qui se charge de générer la commande du moteur tout en assurant la sécurité des utilisateurs.



Le diagramme de définition des blocs (figure 3) présente les différents sous-systèmes et composants de l'Exolift. Le diagramme de blocs interne (figure 4) présente l'architecture de l'Exolift ainsi que les flux échangés entre les différents sous-systèmes. Un extrait du cahier des charges est présenté par le diagramme des exigences (voir D6 du Document Réponse).

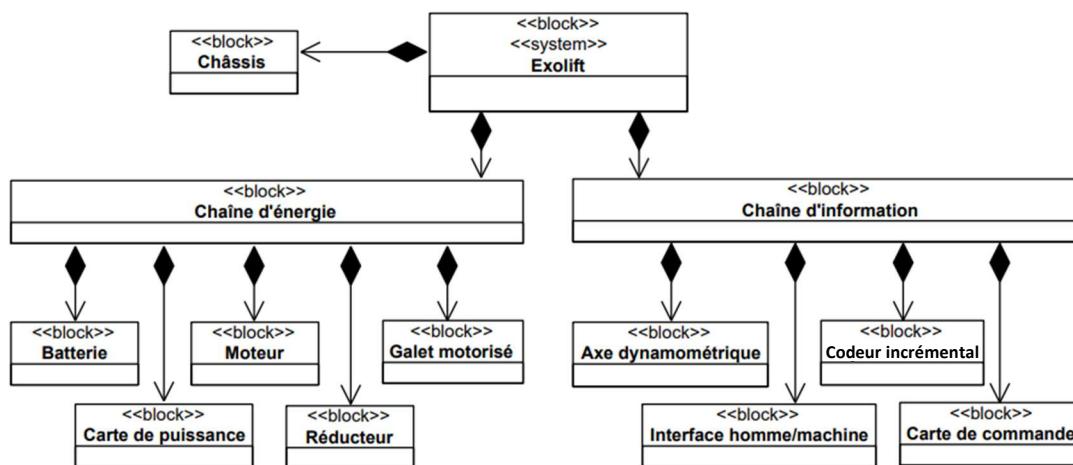


Figure 3 – Diagramme de définition des blocs partiel de l'Exolift.

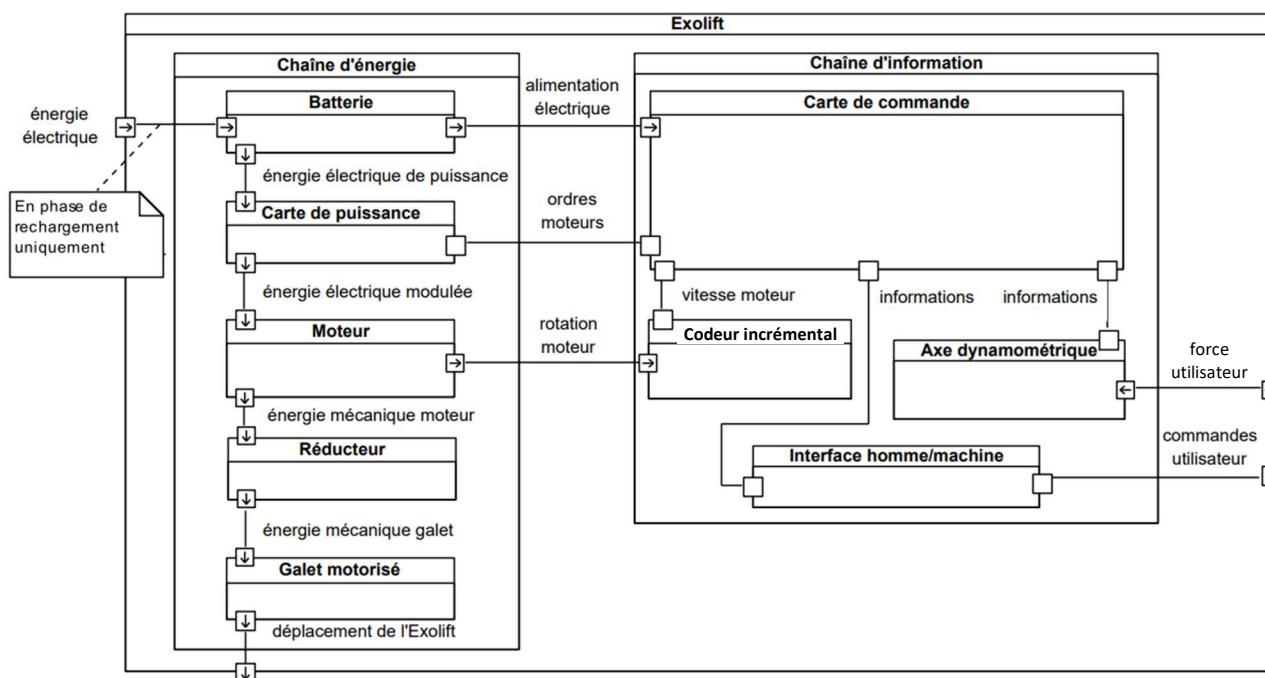


Figure 4 – Diagramme de blocs interne partiel de l'Exolift

**Q1.** Compléter la chaîne fonctionnelle de l'Exolift du Document Réponse en précisant le nom des composants et la nature des flux échangés (I pour information, E pour énergie et M pour matière).

## II. Modélisation de l'asservissement de vitesse de l'Exolift

On donne dans le tableau ci-dessous le modèle de connaissance associé à l'asservissement de vitesse de l'Exolift. Pour les équations des différents modèles de connaissance on supposera que toutes les conditions initiales sont nulles et que  $J$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $K_t$ ,  $K_e$ ,  $K_{cap}$ ,  $K_a$ ,  $K_c$ ,  $K_v$ ,  $K_g$  et  $K_{red}$  sont des coefficients constants.

	Modèle de connaissance
Le <b>réducteur</b> de vitesse est modélisé par un gain pur $K_{red}$ .	$\omega_s(t) = K_{red} \cdot \omega_m(t)$
La loi entrée/sortie cinématique du <b>galet mototisé</b> est modélisable par un gain $K_g$ liant la vitesse angulaire de sortie du réducteur $\omega_s(t)$ à la vitesse de l'exolift $v(t)$	$v(t) = K_g \cdot \omega_s(t)$
La force électromotrice $e_m(t)$ du <b>moteur</b> est couplée à la vitesse de rotation de l'arbre moteur $\omega_m(t)$ grâce à la constante de force électromotrice $K_e$	$e_m(t) = K_e \cdot \omega_m(t)$
L'équation mécanique du <b>moteur</b> tournant à la vitesse angulaire $\omega_m(t)$ permet de lier l'inertie $J$ de l'arbre en rotation au couple moteur $c_m(t)$ et au couple résistant $c_r(t)$ . Le couple résistant $c_r(t)$ est directement lié à la force qu'exerce l'utilisateur sur l'échelle lors de la montée	$J \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = c_m(t) + c_r(t)$ $c_r(t) = K_{red} K_g \cdot f_u(t)$
L'équation électrique au niveau de l'induit du <b>moteur</b> permet de lier la tension $u_m(t)$ , le courant $i_m(t)$ , la résistance de l'induit $R$ et l'inductance de la bobine $L$	$u_m(t) = R \cdot i_m(t) + L \cdot \frac{di_m(t)}{dt} + e_m(t)$
Le couple <b>moteur</b> $C_m(t)$ est couplé à l'intensité $i_m(t)$ dans la bobine du moteur grâce à la constante de couple $K_t$	$c_m(t) = K_t \cdot i_m(t)$
Le <b>codeur incrémental</b> , modélisé par un gain $K_{cap}$ , délivre une tension $u_{mes}(t)$ proportionnelle à la vitesse angulaire du moteur $\omega_m(t)$	$u_{mes}(t) = K_{cap} \cdot \omega_m(t)$
L' <b>interface homme/machine</b> permet d'acquérir la vitesse de consigne notée $v_c(t)$ et de délivrer une tension image $u_c(t)$ à la carte de commande	$u_c(t) = K_a \cdot v_c(t)$
La <b>carte de commande</b> (comparateur+correcteur) permet :	
- de comparer (comparateur) la tension de consigne $u_c(t)$ à la tension de mesure $u_{mes}(t)$ et d'en déduire une tension $\varepsilon(t)$ , image de l'erreur	$\varepsilon(t) = u_c(t) - u_{mes}(t)$
- d'amplifier (correcteur) cette tension $\varepsilon(t)$ en une tension de commande pour la carte de puissance $u(t)$	$u(t) = K_c \cdot \varepsilon(t)$
La <b>carte de puissance</b> délivre au moteur une tension $u_m(t)$ proportionnelle à la tension de commande $u(t)$	$u_m(t) = K_v \cdot u(t)$

**Q2.** Appliquer la transformée de Laplace sur les différentes équations du modèle de connaissance. Compléter la 2<sup>ème</sup> colonne du document réponses.

**Q3.** Déduire de la question précédente les schémas blocs élémentaires correspondant à chacune des équations du modèle de connaissance. Compléter la 3<sup>ème</sup> colonne du document réponses en dessinant chacun des schémas-blocs élémentaires (bloc avec variable d'entrée + variable de sortie + fonction de transfert) correspondant à chaque équation.

**Q4.** Compléter le schéma-blocs complet de l'asservissement de vitesse de l'Exolift. Indiquer toutes les variables entre blocs et le nom des constituants sous les blocs.

**Q5.** Comment choisir le gain de l'interface homme-machine  $K_a$  pour que la vitesse de sortie soit correctement asservie sur la vitesse de consigne.

On considèrera cette condition remplie pour la suite.

### III. Comportement dynamique de la motorisation de l'Exolift

**Q6.** Déterminer l'expression de la fonction de transfert boucle fermée **en poursuite** du moteur :

$$H_{m1}(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)} \Big|_{F_u(p)=0} \text{ en fonction de } K_t, K_e, J, L \text{ et } R.$$

**Q7.** Montrer que cette fonction de transfert peut se mettre sous la forme d'un système du deuxième ordre

$$H_{m1}(p) = \frac{K_1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0}p + \frac{1}{\omega_0^2}p^2} \text{ où } K_1, \xi_1 \text{ et } \omega_1 \text{ sont trois constantes à déterminer. Donner les unités de } K_1, \xi_1 \text{ et } \omega_1.$$

**Q8.** Déterminer l'expression de la fonction de transfert boucle fermée **en régulation** du moteur :

$$H_{m2}(p) = \frac{\Omega_m(p)}{F_u(p)} \Big|_{U_m(p)=0} \text{ en fonction de } K_t, K_e, J, L, R, K_{red} \text{ et } K_g.$$

**Q9.** Montrer que cette fonction de transfert peut se mettre sous la forme d'un système du deuxième ordre

$$H_{m2}(p) = K_2 \cdot \frac{1 + \tau \cdot p}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0}p + \frac{1}{\omega_0^2}p^2} \text{ où } K_2 \text{ et } \tau \text{ sont des constantes à déterminer. Donner les unités de } K_2 \text{ et } \tau.$$

*NB : on fera apparaître sur la copie les manipulations/simplifications du schéma-blocs afin d'exprimer cette fonction de transfert.*

**Q10.** Exprimer alors  $\Omega_m(p)$  en fonction de  $H_{m1}(p)$ ,  $H_{m2}(p)$ ,  $U_m(p)$  et  $F_u(p)$ .

On s'intéresse à la phase d'utilisation de l'Exolift durant laquelle le technicien gravit l'éolienne en gravissant les différents barreaux de l'échelle. Il tire alors sur l'échelle afin de passer d'un barreau à l'autre.

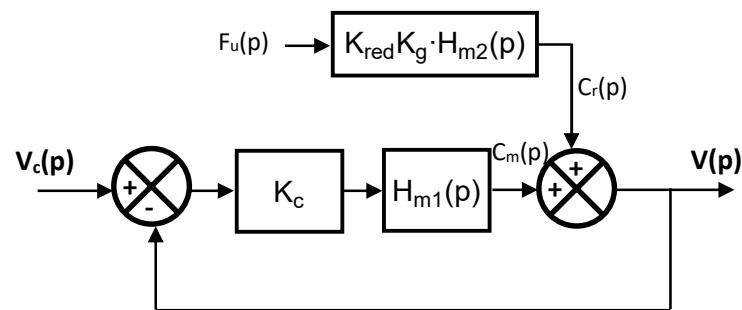
Afin d'étudier l'impact de la force  $f_u(t)$  qu'il exerce sur le système, on modélise celle-ci par une rampe de pente  $F_0$ .

**Q11.** Représenter graphiquement  $f_u(t)$  et exprimer  $F_u(p)$  en fonction de  $F_0$ .

**Q12.** Déterminer et quantifier l'effet de cette force sur la vitesse angulaire du moteur en régime permanent.

**Q13.** Conclure sur la nécessité d'asservir en vitesse l'Exolift en précisant les phénomènes physiques engendrés par la valeur déterminée à la question précédente.

Le schéma-blocs établi dans la partie II peut se mettre sous la forme à retour unitaire ci-dessous (pour  $K_v K_{cap} = 1$ ) :



Pour la suite, on négligera la force exercée par l'utilisateur :  $F_u(p) = 0$  et on retiendra l'expression littérale de

$$H_{m1}(p) = \frac{K_1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0}p + \frac{1}{\omega_0^2}p^2}.$$

**On donne un extrait du cahier des charges lié à cet asservissement de vitesse :**

Fonction	Critères	Niveaux
Réguler la vitesse de l'Exolift	Précision	Pour une consigne de vitesse en échelon : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erreur statique nulle</li> </ul>
	Rapidité	L'accélération ressentie par l'utilisateur doit être inférieure à 0,5g où g est l'accélération de la pesanteur.
	Dépassemets	D1% < 10%

**Q14.** Déterminer l'expression de la fonction de transfert  $H_V(p) = \frac{V(p)}{V_c(p)} \Big|_{F_u(p)=0}$  en fonction de  $K_c$ ,  $K_1$ ,  $\xi$  et  $\omega_0$ .

**Q15.** Déterminer l'expression de l'erreur statique de cet asservissement de vitesse en fonction de  $K_c$ ,  $K_1$  et  $V_{c0}$ .

Dans l'optique de satisfaire l'exigence de précision du cahier des charges, on décide d'implanter un correcteur intégral dans l'unité de commande.

Le modèle de connaissance de la carte de commande est alors modifié et la tension de commande  $u(t)$  de la carte de puissance est alors  $U(p) = \frac{K_c}{p} \cdot \varepsilon(p)$ .

**Q16.** Justifier l'appellation « correcteur intégral ».

**Q17.** Exprimer la fonction de transfert corrigée  $H_{VC}(p) = \frac{V(p)}{V_c(p)} \Big|_{F_u(p)=0}$  et montrer que ce correcteur permet de satisfaire à l'exigence de précision du cahier des charges pour un échelon de vitesse en consigne.

Le graphique du document réponses Q18. montre l'évolution de la vitesse  $v(t)$  de l'Exolift pour une vitesse de consigne en échelon réglée sur la position 5 de l'interface homme/machine (vitesse max) et un réglage de  $K_c = 1$ .

**Q18.** En justifiant votre réponse en faisant apparaître les tracés utiles sur le document réponses, vérifier si ce réglage est adapté vis-à-vis des exigences du cahier des charges.