

**Question 10 :** à partir de la masse du contrepoids dans le cas d'un système à double entraînement et brin unique (solution n°1), **vérifier** à l'aide du graphique 4-3 que le cahier des charges est respecté pour ce système de levage. **Calculer** la prépondérance pour ce système de levage.

### Bilan et analyse des solutions

**Question 11 :** **comparer** la vitesse d'enroulement du tambour entre le système de levage à deux brins (solution n°2) et brin unique (solution n°1).

**Question 12 :** à partir des résultats aux questions précédentes, **conclure** en deux lignes maximum quant aux choix du constructeur pour un système à double entraînement et brin unique.

### 4.2. Efforts supportés par les câbles de suspension (4) et les câbles de manœuvre (6)

*Objectif : calculer les efforts supportés par le câble de suspension (4) et le câble de manœuvre (6) dans le cas du système de levage à double entraînement et à brin unique (solution n°1). Vérifier la résistance du câble de suspension (4) et du câble de manœuvre (6) lorsqu'ils subissent ces efforts.*

Pour les questions de 13 à 15 :

- les quatre pylônes sont modélisés par un pylône équivalent ;
- la travée est modélisée par une masse ;
- les quatre contrepoids sont modélisés par une masse équivalente ;
- les quatre systèmes de levage (poulies, câbles) sont modélisés par un système de levage équivalent.

Le client impose un temps de manœuvre de la position basse à la position haute de 11 minutes et une hauteur de manœuvre de 47,166 m. Cette contrainte aboutit au graphe de vitesse suivant :

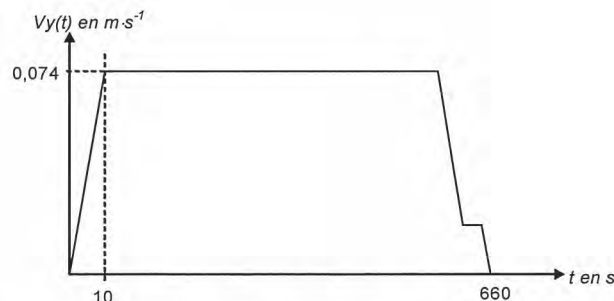


Figure 4-4 : graphe de vitesse pour la manœuvre de la travée en phase de levée

L'étude s'effectue en phase de levée avec pour origine la travée en position basse.

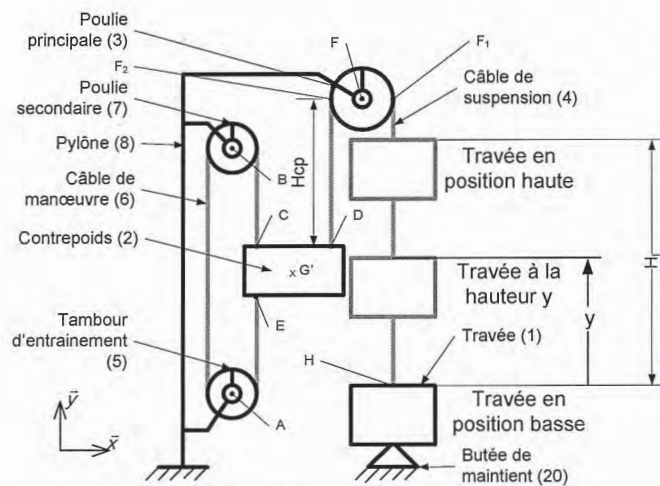


Figure 4-5 : schéma d'étude dynamique

Lors des mouvements de la travée, les actions mécaniques liées aux conditions météorologiques agissant sur la travée sont :

- l'effet du vent, état limite de service (ELS), basé sur une vitesse de vent de  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Le constructeur définit l'état limite ultime (ELU) correspondant à une charge de vent d'une amplitude égale à 150 % de celle du vent à l'état limite de service (ELS) ;
- l'accumulation d'eau (neige et glace) sur la travée qui augmente le poids de celle-ci.

On néglige l'inertie de la poulie principale (3), le frottement des roulements situés entre la poulie principale (3) et le pylône. On effectue l'approximation que la tension dans le câble en  $F_2$  est identique à celle en  $F_1$ .

Données pour la question 13 :

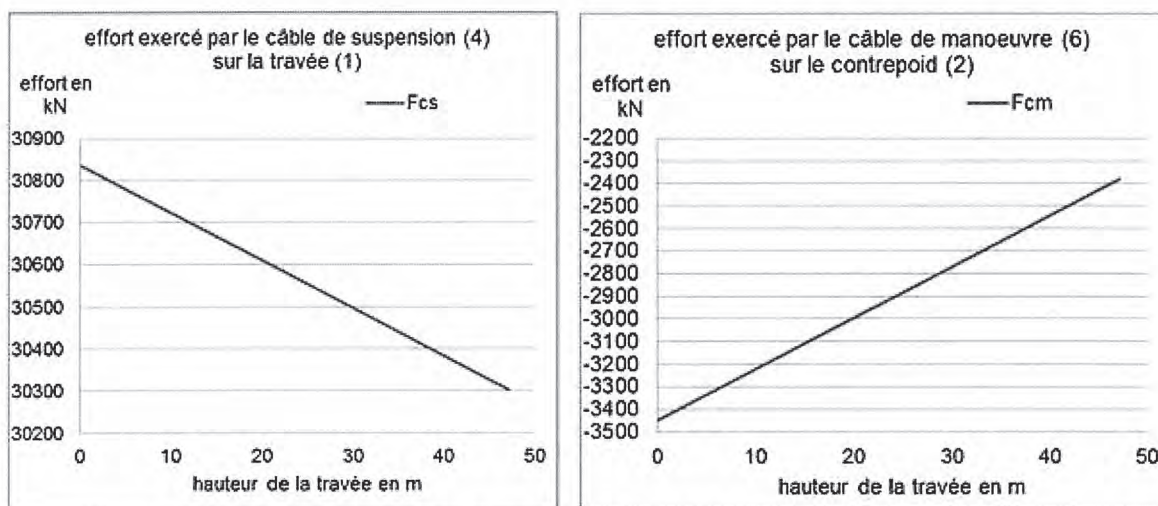
système à double entraînement et à brin unique - document technique DT2	
hauteur de la travée en mètre	$y$
action du vent descendant sur la travée pendant la phase de levée appliquée au centre de gravité G de la travée (1) avec $\vec{F}_{velu \rightarrow 1} = -F_{velu} \vec{y}$ .	$F_{velu} = 1677,5 \text{ kN}$
action de l'eau sur la travée appliquée au centre de gravité G de la travée (1) avec $\vec{F}_{eau \rightarrow 1} = -F_{eau} \vec{y}$	$F_{eau} = 490,5 \text{ kN}$
force de frottement due au guidage de la travée (1) appliquée au point G avec $\vec{F}_{fgt \rightarrow 1} = -F_{fgt} \vec{y}$	$F_{fgt} = 50 \text{ kN}$
poids du câble de suspension (4) entre les points D et $F_2$ au centre de masse de la longueur de câble $DF_2$ avec $\vec{P} = -P_{ccp} \cdot \vec{y}$	$P_{ccp} = 101,7 \text{ kN}$
poids du câble de suspension (4) entre les points H et $F_1$ au centre de masse de la longueur de câble $HF_1$ avec $\vec{P} = -P_{ct} \cdot \vec{y}$	$P_{ct} = 637,7 \text{ kN}$
accélération de pesanteur avec $\vec{g} = -g \cdot \vec{y}$	$g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Hypothèses pour la question 13 :

- la travée est en phase de montée ;
- la travée est positionnée à une hauteur  $y = 0$  m ;
- on néglige l'accélération de la travée durant la phase de démarrage.

**Question 13 :** en isolant l'ensemble {travée (1) + câble HF<sub>1</sub>} et dans un deuxième temps l'ensemble {contrepois (2) + câble DF<sub>2</sub>}, **calculer** l'effort  $F_{cs}$  exercé par le câble de suspension (4) sur la travée (1) et l'effort  $F_{cm}$  exercé par le câble de manœuvre (6) sur le contrepois (2) lors de la phase de démarrage.

**Question 14 :** **comparer** les écarts entre les résultats de la simulation réalisée sans négliger l'accélération de la travée durant la phase de démarrage (graphique 4-6) et les résultats de la question précédente. **Conclure** sur la pertinence des hypothèses de l'étude.



Graphique 4-6 : simulation des efforts  $F_{cs}$  et  $F_{cm}$  en fonction de la hauteur de la travée

Données pour la question 15 :

données du câble de suspension (4) et du câble de manœuvre (6)	
contrainte normale à la section du câble de suspension (4)	$\sigma_4$
contrainte normale à la section du câble de manœuvre (6)	$\sigma_6$
limite élastique des câbles	$R_e = 1200$ MPa
diamètre des brins des câbles	$D_c = 76$ mm
coefficient de sécurité	$K = 5$
nombre de brins du câble de suspension (4) pour le système de levage équivalent	$N_s = 40$
nombre de brins du câble de manœuvre (6) pour le système de levage équivalent	$N_{ma} = 4$

**Question 15 :** à partir des tensions exercées sur les câbles de suspension (4) et les câbles de manœuvre (6) lors de la phase d'accélération, **calculer** les contraintes  $\sigma_4$  et  $\sigma_6$  soumises respectivement à ces câbles. **Vérifier** que ces câbles résistent aux tensions qui leur sont appliquées sans subir de déformation permanente en prenant en compte le coefficient de sécurité  $K$ .

### 4.3. Chaîne d'énergie du système de manœuvre de la travée

*Objectif : exprimer le couple du moteur d'entraînement (9) en fonction des paramètres de la chaîne d'énergie de manœuvre de la travée et des efforts exercés sur le câble de manœuvre (6).*

L'étude se fera en phase de levée. Le pont est constitué de deux chaînes d'énergies de manœuvre (voir figure 3-1, figure 3-2 et figure 4-7) relatives au levage (et descente) de la travée comprenant chacune :

- un moteur d'entraînement (9) ;
- un réducteur primaire (10) ;
- deux réducteurs secondaires (11) ;
- deux tambours d'entraînement (5).

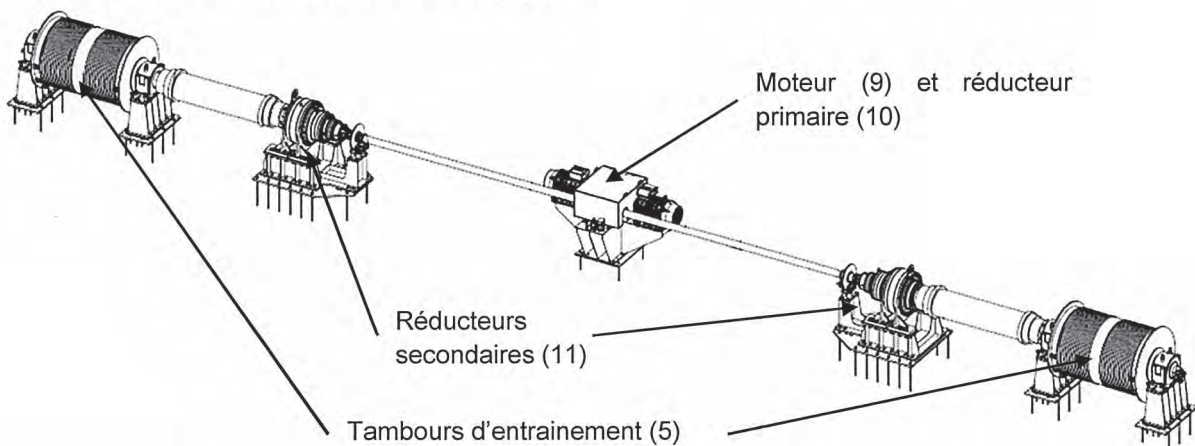


Figure 4-7 : une chaîne d'énergie de manœuvre relative au levage (et descente) de la travée

Données pour les questions 16 et 17 :

chaîne d'énergie de manœuvre valeurs numériques sur le document technique DT 4	
vitesse maximale de la travée (1) en phase de levée	$V_{max} = 0,074 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
diamètre du tambour d'entraînement (5)	$D_t$
rendement total dû au fléchissement du câble de manœuvre (6)	$\eta_c = 0,98$
rendement d'un tambour (5) de la chaîne d'énergie de manœuvre	$\eta_t$
rapport de réduction du réducteur secondaire (11)	$R_2$
rendement total du réducteur secondaire (11)	$\eta_{R2}$
rapport de réduction du réducteur primaire (10)	$R_1$
rendement total du réducteur primaire (10)	$\eta_{R1}$
fréquence de rotation du moteur (9)	$N_m$
facteur de surdimensionnement de la chaîne d'énergie	$f = 1,16$

**Question 16 :** à partir de la vitesse maximale de la travée (1) et de la fréquence de rotation du moteur (9), **calculer** le rapport de réduction total,  $R_{tot}$ , de la chaîne d'énergie du système de manœuvre de la travée. **Calculer** le rapport de réduction,  $R_2$ , du réducteur secondaire (11).

**Question 17:** à partir des données de la chaîne d'énergie du système de manœuvre, **calculer** le rendement total,  $\eta_{tot}$ , de cette chaîne d'énergie.

Pour la suite de l'étude, on utilise les données suivantes :

- rapport de réduction du réducteur secondaire (11)  $R_2 = \frac{1}{60}$  ;
- rendement total d'une chaîne d'énergie du système de manœuvre  $\eta_{tot} = 0,88$  ;
- l'effort total du câble de manœuvre (6) sur la masse équivalente du contrepoids (2) est modélisé par une force  $\vec{F}_{cm} = F_{cm} \vec{y}$  ;
- le pont est constitué de deux chaînes d'énergies de manœuvre identiques.

**Question 18: exprimer**  $C_m$ , le couple moteur (9), en fonction de  $F_{cm}$ ,  $D_t$ ,  $R_{tot}$ ,  $\eta_{tot}$  et  $f$ .

#### 4.4. Moteur d'entraînement (9)

*Objectif : choisir le moteur d'entraînement (9) répondant aux conditions d'utilisations du cahier des charges.*

L'étude est réalisée en début de levage avec un vent descendant. Les conditions d'utilisation du moteur d'entraînement (9) établies dans le cahier des charges du cabinet d'architecte sont :

- condition 1, le couple utile maximal du moteur d'entraînement (9)  $C_{mmax}$  est estimé à 200% de son couple nominal dans le cas d'un vent à l'état limite de service (ELS) ;
- condition 2, le couple nominal du moteur d'entraînement (9)  $C_{mn}$  correspond à son couple nominal sans le coefficient de surdimensionnement  $f$  dans le cas d'un vent à l'état limite de service (ELS).

Les différents efforts supportés par les câbles de manœuvre (6) pour différents états du vent sont les suivants.

Effort total des câbles de manœuvre (6) sur les contrepoids (2) $F_{cm}$ en kN		Vent de levage	
		Vitesse du vent 12 m.s <sup>-1</sup>	
		Début de levage	Fin de levage
Vent ascendant	ELS	2861,2	2351,1
	ELU	3292,8	2517,8
Vent descendant	ELS	3116,2	2606,1
	ELU	3675,4	2920

Figure 4-8 : effort total supporté par les câbles de manœuvre (6) en fonction des différents états du vent sur la travée (1)

**Question 19 :** calculer le couple moteur utile maximal répondant à la condition 1. Parmi les moteurs proposés dans le document technique DT5, **donner** les moteurs répondant à l'exigence de la condition 1.

**Question 20 :** calculer le couple moteur nominal répondant à la condition 2. Parmi les moteurs proposés dans les documents techniques DT5, **donner** les moteurs répondant à l'exigence de la condition 2.

**Question 21 :** conclure quant aux choix du moteur d'entraînement (9).

#### 4.5. Variateur de vitesse

*Objectif :* choisir le variateur de vitesse répondant aux conditions d'utilisations du cahier des charges.

Indépendamment des résultats précédents, le moteur d'entraînement (9) choisi pour la suite de l'étude sera le moteur WEG 132 kW du document technique DT5.

Le choix du variateur s'appuie sur le courant fourni par celui-ci. Ce courant devra être au moins égal au courant nécessaire au moteur au moment du couple de charge maximum.

Le couple de charge maximal  $C_{MElu}$  supporté par le moteur correspond à l'état de vent descendant limite ultime (ELU),  $C_{MElu} = 1479,7 \text{ N}\cdot\text{m}$ .

**Question 22 :** calculer la fréquence de rotation du champ tournant du moteur choisi par le constructeur. **Calculer** le glissement de ce moteur.

**Question 23 :** à partir du couple de charge maximal  $C_{MElu}$ , **calculer** la puissance utile que devra fournir ce moteur. **Calculer** l'intensité absorbée par ce moteur.

**Question 24 :** à partir des données du document technique DT6, **conclure** quant au choix du variateur répondant à la contrainte du cahier des charges.

### 5. Commande dynamique de la travée mobile

*Objectif :* commander la travée du pont sans solliciter de vibrations dues à la flexibilité de la structure et des câbles de suspension.

Un essai est réalisé sur la structure en appliquant un échelon d'amplitude  $h = 20 \text{ mm}$ . La réponse temporelle est représentée sur la figure 5-1.

**Question 25 :** identifier, à l'aide de la figure 5-1, la fonction de transfert  $T_s(p)$  associée à la réponse temporelle liant la hauteur réelle  $h_s(t)$  de la travée et la hauteur indiquée par les capteurs  $h(t)$  et **déterminer** les valeurs numériques de la période  $T_0$ , du gain statique  $k$  ainsi que du facteur d'amortissement  $\xi$ .

$$T_s(p) = \frac{h_s(p)}{h(p)} = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot p + \omega_0^2}$$

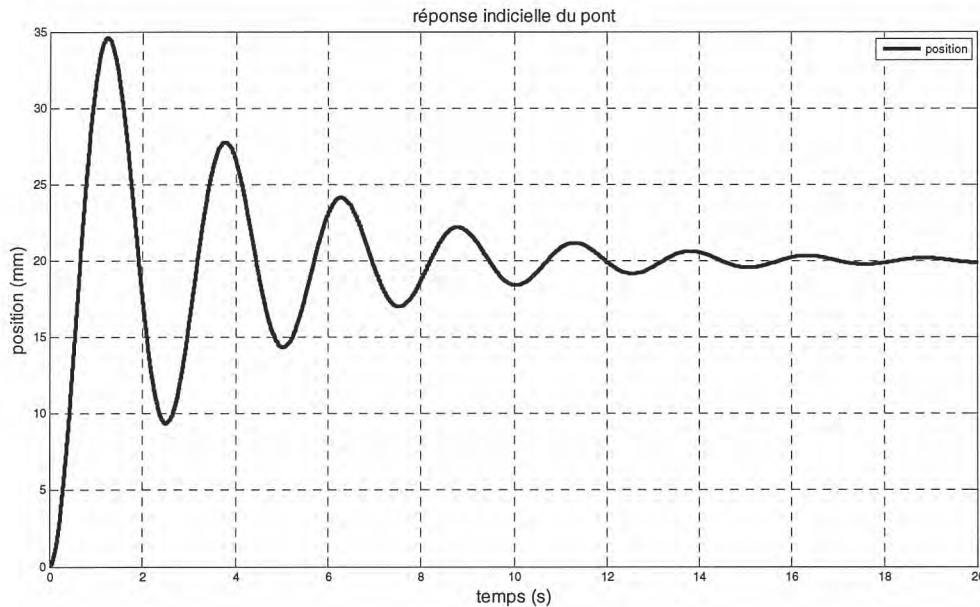


Figure 5-1 : essai vibrations

La travée doit monter sur une hauteur de  $H_{max} = 47,166$  m, la phase d'accélération a une durée de  $T_f = 10$  s, cette durée est identique pour le freinage. Le temps de manœuvre de la position basse à la position haute est de  $T_{max} = 11$  min. Il est indispensable d'éviter les vibrations dues à une commande trop brutale. Pour éviter les vibrations de la travée, nous sommes contraints d'imposer la trajectoire de la travée, c'est-à-dire de contrôler l'accélération du mouvement d'élévation et de descente.

**Question 26 :** compte tenu des valeurs imposées par le constructeur, **donner** sur la figure 5-2a, 5-2b et 5-2c du document réponse DR1, les profils de l'accélération, de la vitesse et de l'élévation de la travée.

La commande de la travée va se faire à partir d'une trajectoire imposée par l'accélération. Pour mettre en place l'algorithme de l'asservissement de position de la hauteur de la travée, il est nécessaire d'établir les fonctions de transfert des différents constituants de la chaîne d'énergie.

On suppose qu'à l'échelle de temps de la trajectoire imposée, la relation entre la commande en couple des moteurs de levage et la force de levage exercée par les câbles est un gain pur de valeur  $C_V$ . Pour établir la relation entre la vitesse d'élévation de la travée  $V(t)$  et la force d'élévation exercée par les moteurs au travers

des câbles  $F(t)$ , le frottement des parties mécaniques est négligé, et seule la masse de la travée est prise en compte.

**Question 27 :** calculer la valeur de  $C_V$ , exprimer la fonction de transfert  $T_V(p) = \frac{V(p)}{F(p)}$  et exprimer  $T_p(p) = \frac{h(p)}{V(p)}$ , relation entre la vitesse  $V$  et la position de la travée  $h$  (mesurée au travers des capteurs absolus)

La commande en position est proposée sur la figure 5-3.

**Question 28 :** exprimer, à partir du schéma-bloc, la fonction de transfert  $T(p) = \frac{h(p)}{\Gamma_{ref}(p)}$  entre la position indiquée par les capteurs absolus  $h$  et l'accélération référence  $\Gamma_{ref}$ .

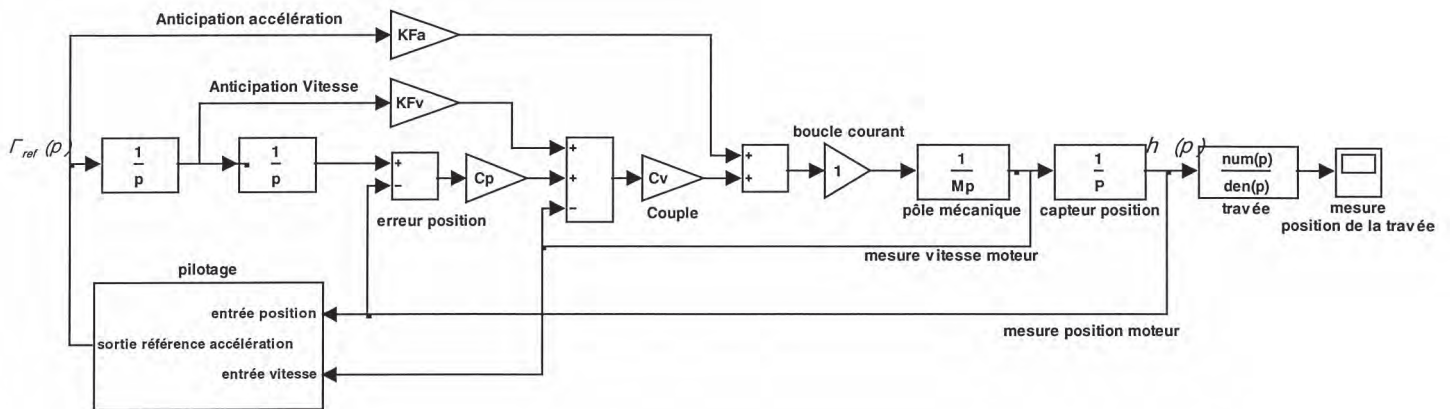


Figure 5-3 – asservissement en position du pont

On admet que pour une période d'accélération ou de freinage de l'ordre de  $T_f \geq 4 \cdot T_0$  il n'y a pas de vibration sur la travée avec :

$$T(p) = \frac{h(p)}{\Gamma_{ref}(p)} = \frac{1}{p^2} \cdot \frac{C_p \cdot C_V + K_{FV} \cdot C_V \cdot p + K_{Fa} \cdot p^2}{C_p \cdot C_V + C_V \cdot p + M \cdot p^2}$$

**Question 29 :** indiquer les valeurs des coefficients  $K_{Fa}$  et  $K_{Fv}$  pour que la fonction de transfert puisse se simplifier sous la forme  $T(p) = \frac{h(p)}{\Gamma_{ref}(p)} = \frac{1}{p^2}$ .

L'algorithme du pilotage de l'accélération est représenté à la figure 5-6, les organes de test sont représentés par un interrupteur à la figure 5-4 :



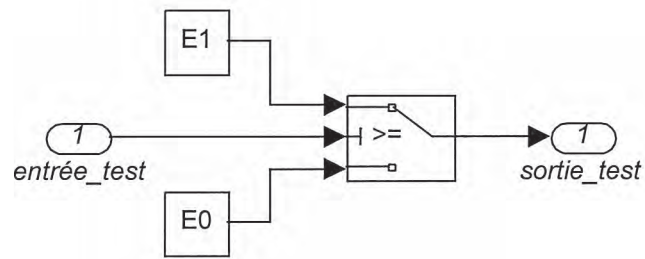


Figure 5-4 : organe de test

la sortie du test est  $sortie\_test = E0$  si  $entrée\_test < 0$   
 la sortie du test est  $sortie\_test = E1$  si  $entrée\_test \geq 0$

**Question 30 :** expliciter le fonctionnement de l'algorithme du pilotage de l'accélération figure 5-6 à partir de l'accélération représentée sur la figure 5-5.

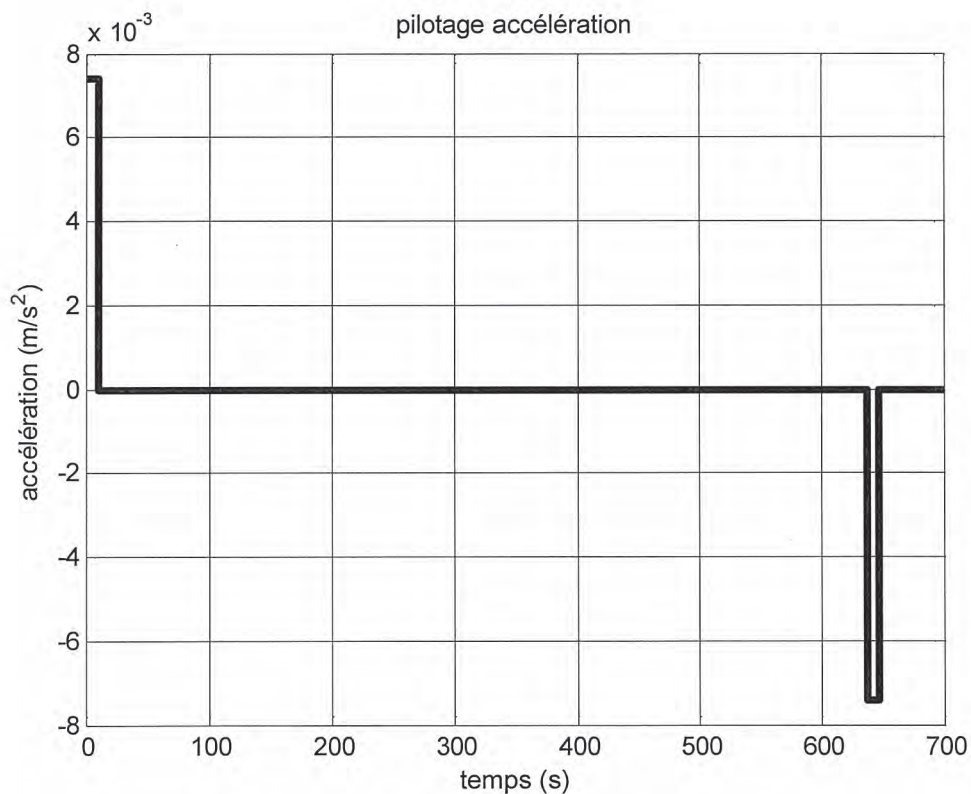


Figure 5-5 : simulation du pilotage de l'accélération

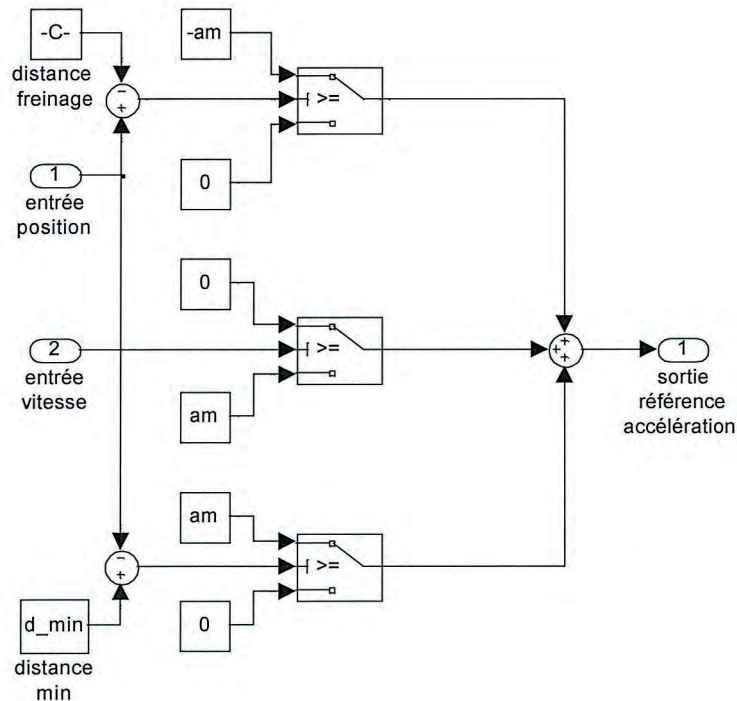


Figure 5-6 : algorithme du pilotage de l'accélération.

## 6. Codeur absolu multitours

Objectif : analyser le guidage travée – pylônes et vérifier la résolution du codeur gérant l'altitude des quatre coins de la travée afin de contrôler la montée de la travée en évitant un décalage d'altitude des quatre coins de celle-ci.

### 6.1. Analyse du guidage

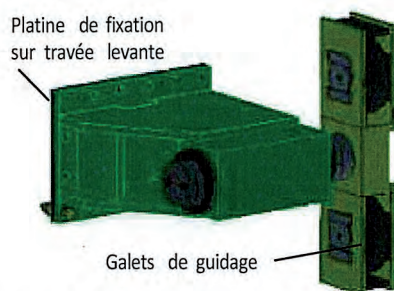


Figure 6-1 : guidage longitudinal

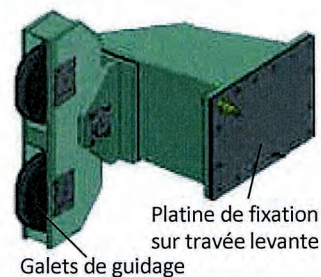


Figure 6-2 : guidage transversal

La travée (1) est positionnée lors de ses mouvements par des guidages transversaux et longitudinaux représentés figures 6-1, 6-2 et 6-3.

Les guidages sont répartis de la manière suivante (figure 6-3) :

- dans le pylône 1 aval (P1) présence d'un unique guidage longitudinal ;

- dans le pylône 2 amont (P2) présence d'un guidage longitudinal et d'un guidage transversal ;
- dans le pylône 3 aval (P3) absence de guidage ;
- dans le pylône 4 amont (P4) présence d'un unique guidage transversal ;
- les contacts entre les roues 10a et 11a et les rails de guidage ou les surfaces sont modélisées par des liaisons ponctuelles parfaites.

**Question 31 :** à partir des figure 6-1, figure 6-2, et figure 6-3, **proposer** une liaison modélisant les guidages de la travée réalisés pour chaque pylône (1, 2 et 4). En **déduire** la liaison équivalente liant la travée à l'ensemble des pylônes. **Justifier** l'absence de guidage entre la travée et le pylône 3 aval (P3) en vous appuyant sur une étude succincte de l'isostatisme ou de l'hyperstatisme de la liaison équivalente entre la travée et les pylônes.

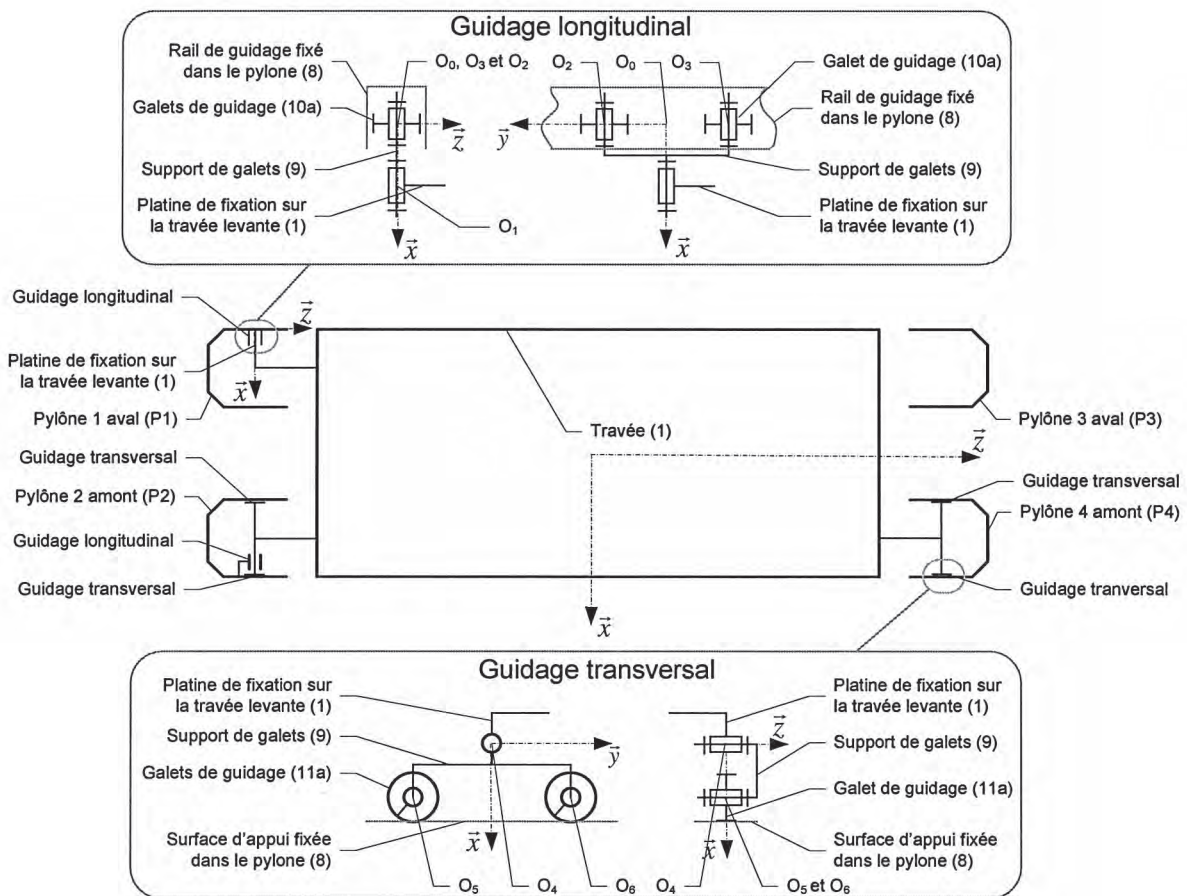


Figure 6-3 : représentation du guidage de la travée par les pylônes

## 6.2. Vérification de la précision du codeur

Quatre codeurs absolus multitours série MHM5 sont disposés sur les quatre poulies principales (3) en interface avec la travée levante permettant de mesurer directement l'altitude de chacun des quatre coins de la travée.

Ce système permet de mesurer en permanence la position de la travée afin de la maintenir sur un plan horizontal durant son déplacement.

Les seuils d'inclinaison déclenchant les sécurités de l'ouvrage sont de  $0,2^\circ$  lors d'un arrêt normal (niveau 1) et de  $0,27^\circ$  lors d'un arrêt de sécurité (niveau 4).

Données pour les questions 32 et 33 :

résolution du codeur	13 bits
diamètre des poulies principales	4 m
longueur de la travée	117 m
hauteur de levée de la travée	47,17 m

**Question 32 :** calculer le défaut d'altitude de la travée pour les deux seuils d'inclinaison. **Exprimer** la conséquence d'un décalage d'altitude des quatre coins de la travée sur le levage du pont.

**Question 33 :** calculer la résolution minimale du codeur afin de détecter un défaut d'altitude de 400 mm. **Calculer** le nombre minimal de tours du codeur pour contrôler la hauteur de la levée. **Valider** le codeur choisi par le constructeur en fonction des données du document technique DT7.

## 7. Communication entre les éléments pour la levée du pont

La fiabilité des informations repose sur la connaissance en temps réel de la position de la travée levante lors de la phase de montée. L'automate programmable industriel de levée (APIL) compare les informations des codeurs situés sur les tambours d'entraînement (5) et des codeurs situés sur les poulies principales (3) de la travée pour en déduire la hauteur instantanée.

Les choix des composants et leur architecture assurent la fiabilité des informations et leur authenticité.

### 7.1. Le codeur BEI DEACOD

*Objectif : vérifier la fiabilité des informations issues des codeurs tambours d'entraînement (5) et des poulies principales (3) au poste de commande pour ne pas confondre une erreur du système de mesure avec un défaut sur la levée du pont.*

Les codeurs PHU9 utilisés sur les tambours sont montés en prise directement sur le tambour d'entraînement (5). Le codeur doit être capable de mesurer 1 mm de déplacement de la travée.

**Question 34 :** à l'aide du document technique DT7, **déterminer** la précision minimale et donc le nombre de pistes que doit avoir le codeur fixé sur le tambour. **Justifier** le choix du constructeur en donnant la précision du codeur du constructeur.

Un message d'alerte est envoyé au conducteur lorsque sur un même pylône il y a un écart de plus de 800 mm entre les informations données par le codeur de poulie

principale (3) et le codeur de tambours d'entraînement (5). À chaque message d'alerte, le conducteur immobilise le pont. Pour des questions de sécurité, les deux codeurs commencent leur incrémentation à 10 tours, soit à l'impulsion 81 920.

**Question 35 :** le codeur de poulie envoie une impulsion de valeur 100 352 à l'automate programmable de commande. **Calculer** la hauteur du pont pour cette valeur. Sachant qu'au même moment le codeur tambour envoie la valeur 100 570. **Déterminer** l'action du conducteur.

Les informations issues des codeurs sont envoyées à l'automate programmable industriel de levée (APIL) avec le protocole CANopen qui se situe en couche 7 « application » dans l'architecture des couches.

Une trame de communication du codeur après une écoute sur le réseau secondaire a été extraite lors des essais du pont. Le protocole est décrit en annexe dans le document technique DT8.

0000	02 1a 11 f5 86 67 e8 39	df 93 1c c2 08 00 45 00	.....g.9 .....E.
0010	00 2a bf 4c 00 00 80 01	20 fb ac 1c 01 13 ac 1c	.*.L.... .....
0020	01 40 08 00 a8 88 b9 48	ae 3b 43 41 50 45 54 5f	.@.....H .;CAPET_
0030	53 49 49 5F 32 30 31 34		SII_2014

Figure 7-1 : extrait de trame Ethernet

**Question 36 :** retrouver, grâce à la trame de la figure 7-1, à partir de quel élément a été réalisé la requête et donner l'information recherchée. Donner le type IP de la trame Ethernet 2. Vérifier que la longueur du datagramme IP de la trame correspond à celui inscrit dans la trame.

**Question 37 :** énumérer les paramètres qui seraient modifiés si l'on lisait les données sur le réseau principal et non plus sur le réseau redondant. Justifier l'utilisation d'un réseau redondant.

Le réseau redondant est lu et utilisé en même temps que le réseau principal, mais avec un temps de décalage dû au temps de transport de l'information. Un mauvais choix technique peut mettre le pont en défaut.

Données pour la question 38 :

vitesse de transmission dans la fibre optique	$3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
vitesse de transmission dans le cuivre	$2,26 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
débit moyen de la fibre optique	$D_{\text{fibre}} = 1000 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$
débit moyen un réseau cuivré composé d'une paire torsadée	$D_{\text{cuivre}} = 2 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$
distance entre les deux automates de gestion APIG	550 m

**Question 38 :** déterminer les durées nécessaires pour recevoir, à l'extrémité du câble, le dernier octet d'un paquet de 256 octets dans un câble en fibre optique et dans un câble en cuivre torsadé. On néglige la perte de débit due à la longueur des câbles. **Comparer** les résultats obtenus et **justifier** l'utilisation de la fibre optique en fonction des résultats obtenus avec l'utilisation paramétrée sur les codeurs.

## 7.2. Le réseau de communication

*Objectif :* vérifier que la structure du réseau est adaptée à la manœuvre de la travée.

La communication entre chaque élément du système est gérée avec un réseau local. Le réseau possède trois types de supports de transmission qui sont la fibre optique, les câbles Ethernet et les câbles cuivres CanOpen.

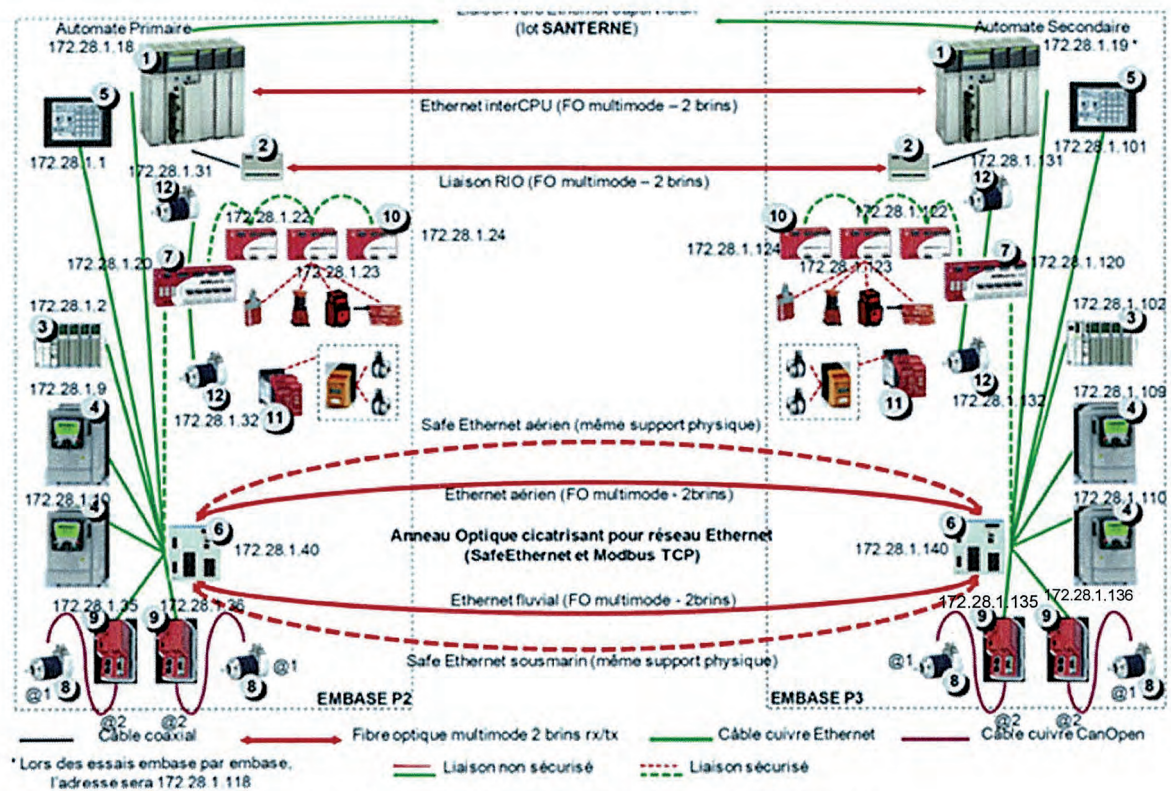


Figure 7-2 : structure du réseau de levée du pont

détail des éléments de la figure 7-2	
1- API redondant	7- automates de sécurité
2- convertisseur coaxial / optique	8- codeurs absolus multitours
3- ilot E/S TOR 5 (tout ou rien)	9- passerelle Ethernet/CANopen
4- variateur de vitesse asynchrone	10- module d'extension E/S
5- terminal graphique tactile	11- module de sécurité Préventa
6- switch	12- codeurs absolus multitours