

| |
|--|
| BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR ÉLECTROTECHNIQUE |
|--|

Épreuve E4.1

ÉTUDE D'UN SYSTÈME TECHNIQUE INDUSTRIEL
PRÉ-ÉTUDE ET MODÉLISATION

SESSION 2014

—————

Durée : 4 heures
Coefficient : 3

—————

Matériel autorisé :

- Calculatrice à fonctionnement autonome autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16/11/99. L'usage de tout autre matériel ou document est interdit.

Documents à rendre avec la copie :

- Le candidat répondra sur les documents-réponses et sur feuilles de copie. Les documents-réponses sont à rendre agrafés au bas d'une copie.

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Ce sujet se compose de **18** pages numérotées de **1/18** à **18/18**
dont 6 documents-réponses et 1 annexe.

Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.

Utiliser les notations indiquées dans le texte, justifier toutes les réponses, présenter clairement les calculs et les résultats.

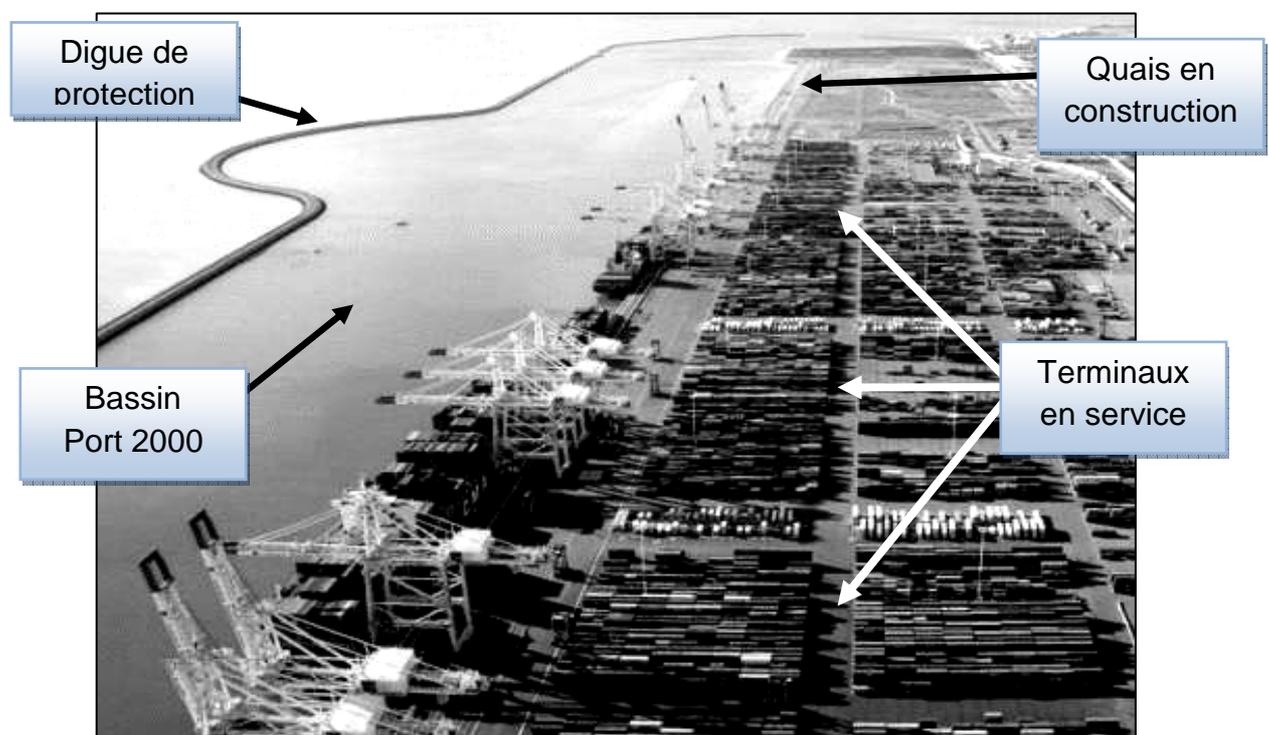
| | | |
|---|----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 1/18 |

L'objet de l'étude est un enrouleur de câble électrique (3 x 5,75 kV) permettant l'alimentation d'un portique sur les quais du port du Havre.

Mise en situation :

Le port du Havre, grand port maritime français, est, en tonnage, le cinquantième port mondial. Sur le plan du trafic de conteneurs, il occupe la première place des ports français avec chaque année plus de 2 millions d'EVP (Equivalent Vingt Pieds, taille standard d'un conteneur).

Souhaitant tripler son activité conteneurs, la société gérante « Grand Port Maritime du Havre » a lancé le grand projet « Port 2000 ». En portant la capacité d'accueil des conteneurs à six millions d'EVP, Le Havre se hisserait ainsi parmi les cinq premiers ports européens.



Construit à l'extérieur du port actuel, en pleine mer, « Port 2000 » offrira des postes de chargement sur un quai d'une longueur totale de 4,2 kilomètres. Chaque poste de chargement a une longueur d'environ 350 m. Abrité par une digue de 6 km de longueur, le bassin de « Port 2000 » peut accueillir les plus grands porte-conteneurs en service.

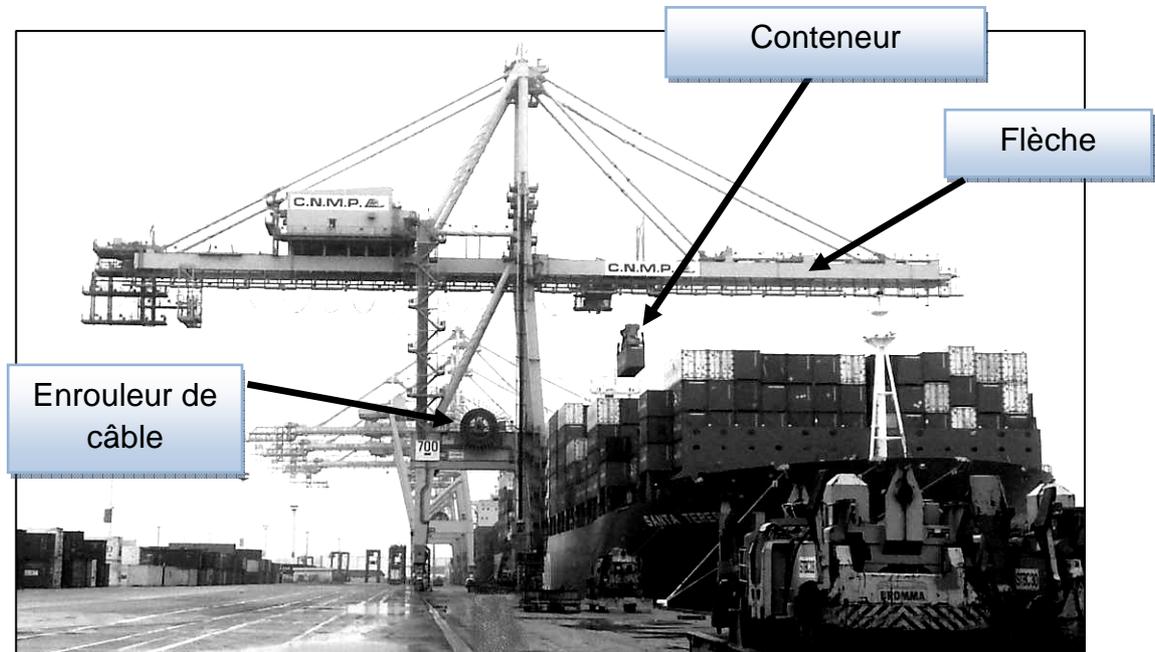
Port 2000 compte aujourd'hui trois terminaux :

- le Terminal de France, équipé de 10 portiques sur 1050 mètres de quai ;
- le Terminal Porte Océane, équipé de 4 portiques sur 700 mètres de quai ;
- le Terminal TNMSC, équipé de 7 portiques sur 1400 mètres de quai.

| | | |
|---|-----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPPEM | Page : 2/18 |

Présentation d'un portique :

Un portique est un appareil de levage utilisé dans le port pour le chargement ou le déchargement des porte-conteneurs. Il est constitué d'une structure se déplaçant parallèlement au quai et d'une flèche sur laquelle se déplace un chariot de levage. On observe ci-dessous l'enrouleur de câble, objet de l'étude.



Compte tenu des capacités importantes des porte-conteneurs, plusieurs portiques participent simultanément à leur déchargement.

Ci-dessous, six portiques travaillent au déchargement du « Jules Verne » qui, avec ses 53 mètres de large et 396 mètres de long, est capable de transporter jusqu'à 16.000 conteneurs.

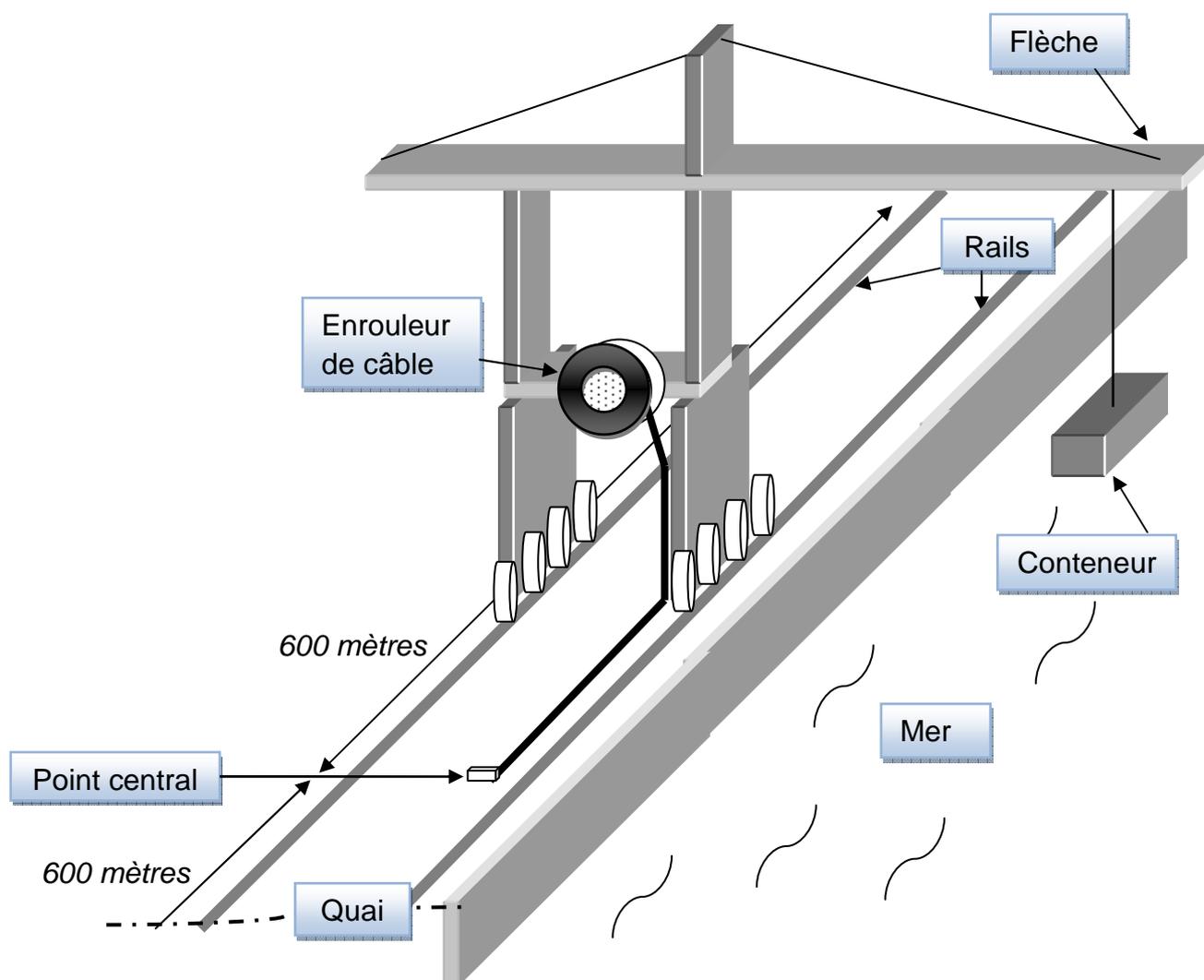
Les portiques doivent se déplacer le long du quai, de quelques mètres pour atteindre la prochaine rangée de conteneurs, ou de plusieurs centaines de mètres pour accéder aux autres postes de chargement.



L'alimentation du portique est électrique. Un « enrouleur de câble » est chargé d'enrouler ou de dérouler ce câble au cours des translations du portique.

| | | |
|---|-----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPPEM | Page : 3/18 |

Présentation de l'enrouleur de câble de l'étude



Le câble d'alimentation haute tension (3 x 5,75 kV) du portique est raccordé en un point central du poste de chargement.

Le portique dispose d'une réserve de 600 mètres de câble pour se déplacer de part et d'autre de ce point central (soit 1200 mètres de quai accessible pour un portique).

| | | |
|---|----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 4/18 |

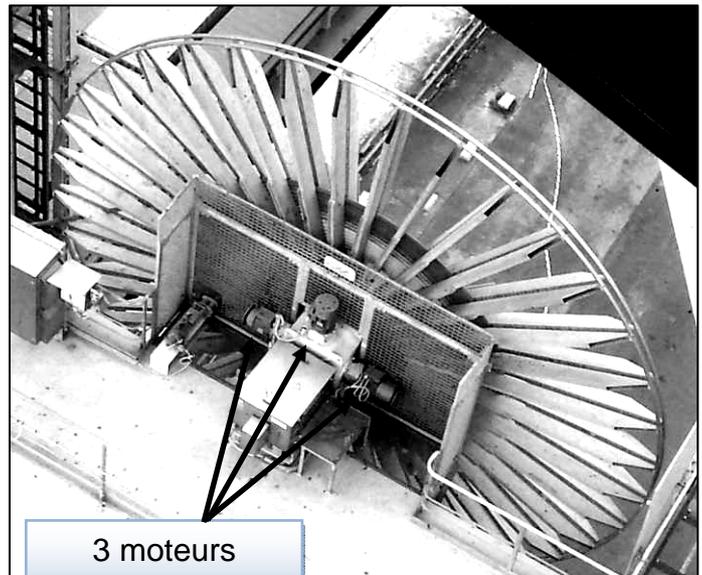
Entre le portique et le point central, le câble est simplement posé sur le sol.

L'enrouleur a un diamètre intérieur de 2,50 mètres et un diamètre extérieur de 7,50 mètres.

L'enrouleur est entraîné par un réducteur mécanique associé à trois moteurs électriques.

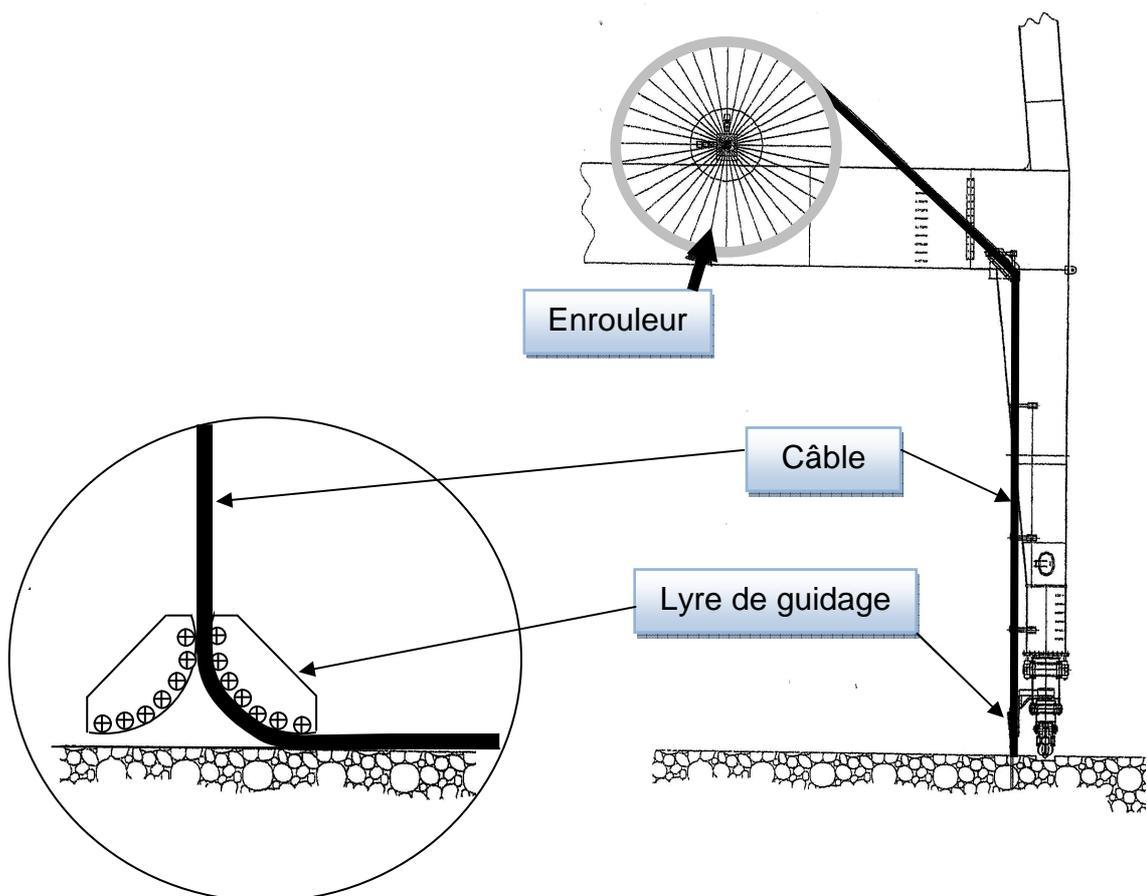
L'utilisation de 3 moteurs permet de répartir le couple exercé sur les pignons du réducteur.

Ces 3 moteurs sont pilotés par un seul variateur.



3 moteurs d'entraînement

L'axe de l'enrouleur se trouve à une hauteur de 21,5 mètres par rapport au sol. Le guidage du câble est décrit par les croquis ci-dessous :



| | | |
|---|----------------------|--------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 5/18 |

Enjeu

Le port du Havre souhaite augmenter son activité dans le domaine du trafic des conteneurs.

En vue de limiter l'augmentation des coûts de maintenance, il met en place une politique cherchant à maintenir un niveau de fiabilité tout en limitant les stocks de pièces détachées de ses portiques de déchargement.

Toute rénovation d'équipement se fera dans un souci d'uniformisation afin de limiter le nombre de références et de constructeurs.

Problématiques

Sur toute une génération d'enrouleurs, les moto-variateurs ne sont plus fabriqués.

Afin d'anticiper leurs remplacements, il sera nécessaire de faire d'une part l'étude du dimensionnement de ces moto-variateurs et d'autre part d'en choisir les références constructeurs.

Il est envisagé de superviser à distance ces variateurs.

Les objectifs de cette étude sont donc de :

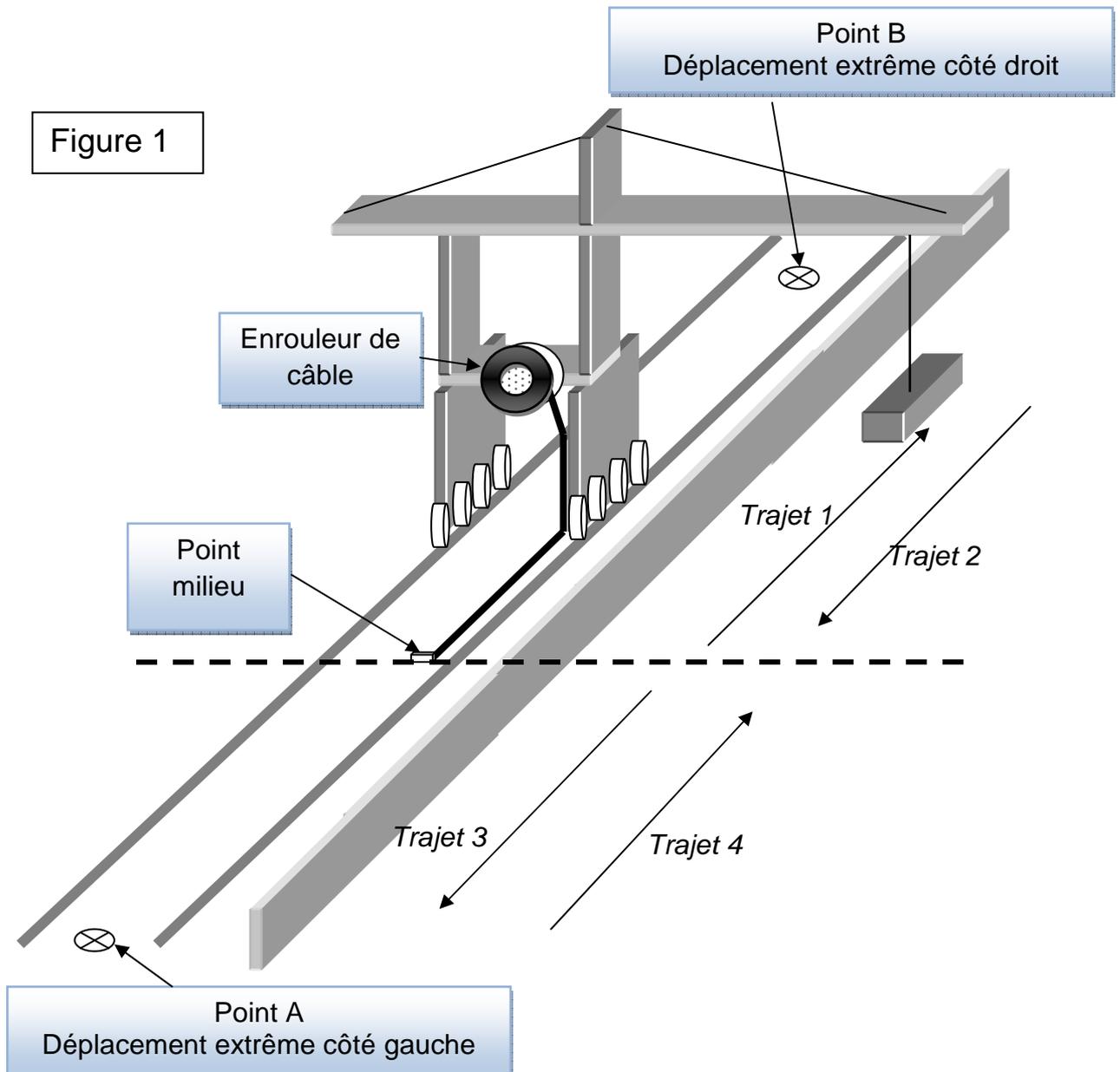
- dimensionner le moto-variateur en respectant les contraintes du cahier des charges de l'enrouleur ;
- choisir une référence pour chacun de ces moteurs en respectant les contraintes d'uniformisation du parc ;
- choisir une référence pour le (ou les) variateur(s) en respectant les contraintes d'uniformisation ;
- ajouter un équipement qui permettra de paramétrer à distance les variateurs.

| | | |
|---|----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 6/18 |

PARTIE A : Étude des contraintes en couple et vitesse imposées par l'enrouleur.

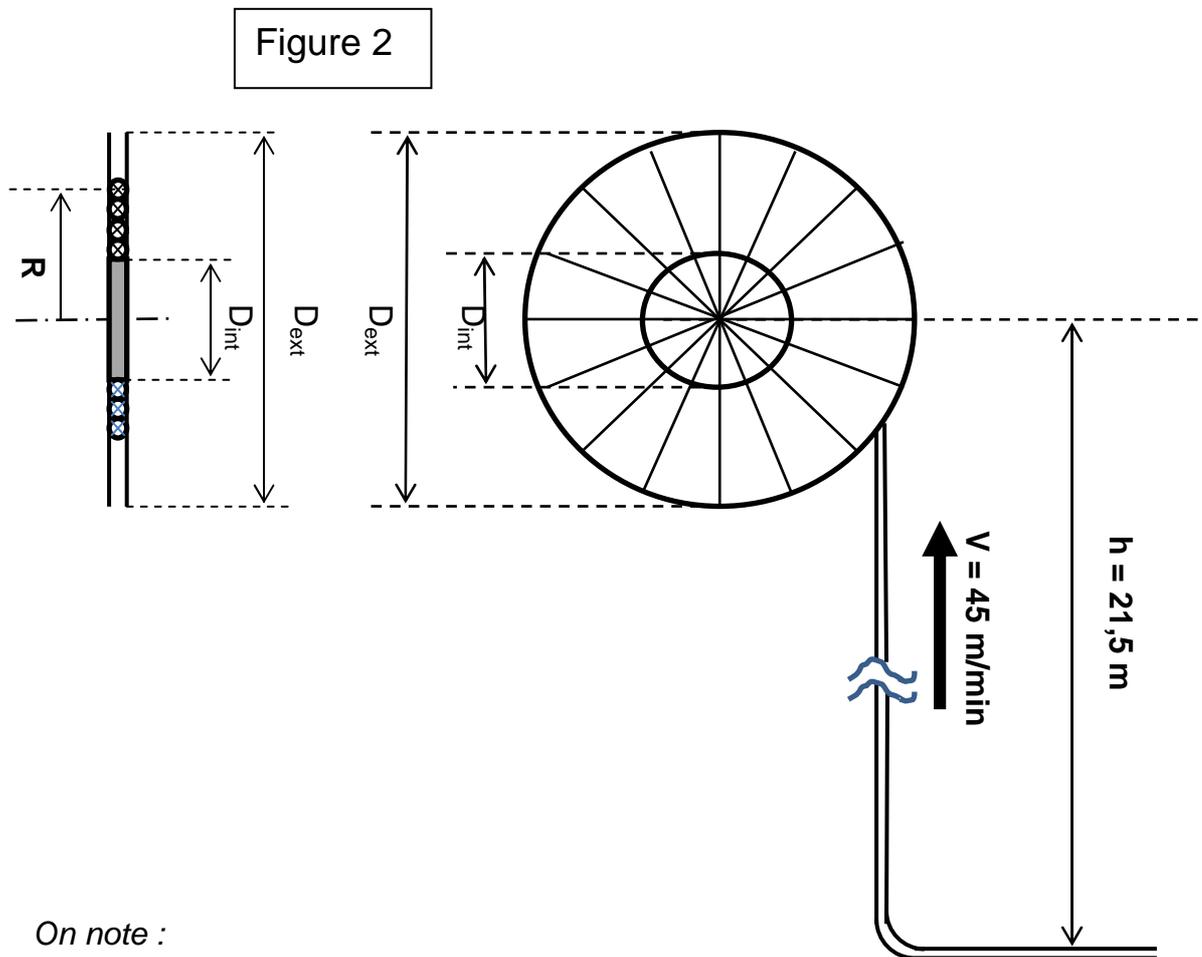
Dans cette étude, on souhaite déterminer les plages de variation de la vitesse de rotation et du couple à fournir au tambour en fonction des contraintes imposées par le câble et le déplacement du portique.

On décompose, comme représentés ci-dessous, les déplacements du portique en 4 phases suivant son sens de déplacement et suivant sa position par rapport au point milieu.



| | | |
|---|----------------------|--------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 7/18 |

On rappelle que le câble électrique est enroulé de telle manière que toutes les spires soient superposées, comme illustré sur la partie gauche de la figure 2.



On note :

- D_{ext} , le diamètre extérieur du tambour (7,50 m)
- D_{int} , le diamètre intérieur du tambour (2,50 m)
- R , le rayon d'enroulement
- h , hauteur de l'axe de l'enrouleur par rapport au sol (21,5 m)

- $D_{câble}$, le diamètre du câble électrique (57,0 mm)
- m_L , la masse linéique du câble ($8,02 \text{ kg.m}^{-1}$)
- L , Longueur totale de câble électrique (600 m)

- v , vitesse du câble ($45,0 \text{ m.min}^{-1}$)
- $\Omega_{tambour}$, vitesse de rotation du tambour (rad.s^{-1})
- $C_{tambour}$, le moment du couple sur l'axe du tambour
- g , constante de pesanteur ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$)

| | | |
|---|----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 8/18 |

A.1. Détermination de la plage de variation de vitesse de rotation du tambour.

A.1.1. Calculer le rayon minimum R_{\min} d'enroulement des spires de câble sur le tambour.

Indiquer sur votre copie, en utilisant les notations de la figure 1 (point A, point milieu ou point B), les positions du portique correspondant à cet état d'enroulement.

A.1.2. Lorsque la totalité du câble est enroulée, l'enrouleur comporte 40 spires. Vérifier que les dimensions du tambour permettent d'enrouler la totalité de ces 40 spires.

A.1.3. Le rayon maximum R_{\max} d'enroulement des spires de câble sur le tambour est $R_{\max} = 3,53$ m.

Indiquer sur votre copie, en utilisant les notations de la figure 1, les positions du portique correspondant à cet état d'enroulement.

La vitesse de déplacement du portique le long du quai est supposée constante et égale à 45 mètres par minute. Cela impose que la vitesse linéaire d'enroulement ou de déroulement du câble soit aussi de 45 mètres par minute.

La vitesse de rotation du tambour devra donc s'adapter à cette contrainte tout au long du déplacement.

A.1.4. Lorsque le rayon d'enroulement augmente, comment la vitesse angulaire de rotation évolue-t-elle ?

A.1.5. En déduire les vitesses angulaires de rotation maximale $\Omega_{\text{Tambour max}}$ et minimale $\Omega_{\text{Tambour min}}$ du tambour (en rad.s^{-1}). On utilisera pour cela les valeurs de rayons R_{\min} et R_{\max} obtenues aux questions A.1.1. et A.1.3. et on complétera la première colonne du document réponse 1 page 17.

| | | |
|---|----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 9/18 |

A.2. Étude de la puissance au niveau du tambour.

Dans une première approche, en négligeant les frottements, on peut considérer que le seul effort de rotation qui s'exerce sur le tambour est le moment du couple résultant du poids du câble suspendu à enrouler.

A.2.1. Montrer que la masse du câble suspendu est $m = 172 \text{ kg}$.

La puissance nécessaire au niveau du tambour, notée P_{tambour} , pour enrouler le câble est donnée en fonction de g , m et v , par la relation :

$$P_{\text{tambour}} = m g v$$

A.2.2. Calculer cette puissance P_{tambour} pendant l'enroulement du câble.

A.2.3 Montrer que cette puissance est constante au cours de l'enroulement.

A.2.4. Montrer que l'expression du moment du couple au niveau du tambour est

$$C_{\text{tambour}} = m.g.R$$

A.2.5 Comment évolue le moment du couple au niveau du tambour lors de l'enroulement ?

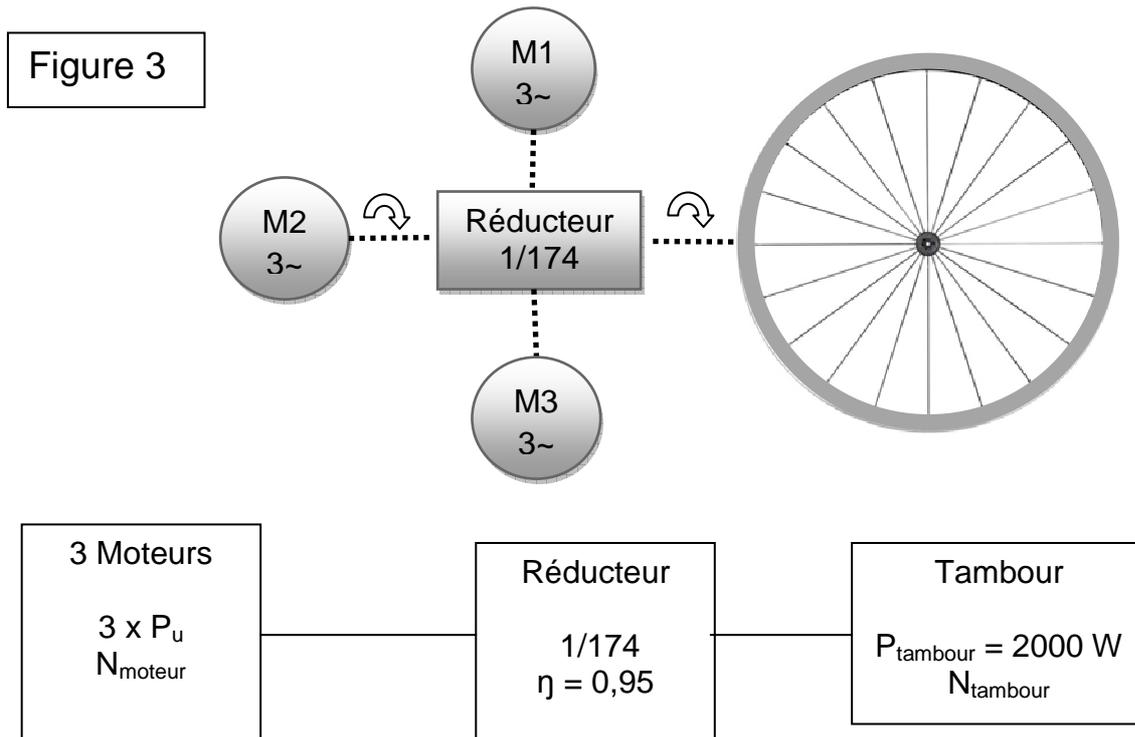
A.2.6 Calculer les valeurs extrêmes du moment du couple au niveau du tambour et compléter le document réponse 1 page 17.

| | | |
|---|----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 10/18 |

PARTIE B : Dimensionnement et commande des machines asynchrones.

On souhaite, dans cette partie, déterminer les caractéristiques des trois moteurs électriques. On rappelle que l'utilisation de trois moteurs permet de répartir le couple exercé sur les pignons du réducteur. Les trois moteurs sont identiques et tournent à la même vitesse.

Chaîne cinématique de l'enrouleur



En prenant en compte les pertes de puissance dues à la lyre de guidage du câble et en majorant la tension exercée par le tambour pour éviter un mou de câble pendant l'enroulement, on considérera par la suite que la puissance nécessaire à l'enroulement du tambour est égale à 2000 Watts, on imposera les vitesses de rotation du tambour maximale $N_{T_{\text{max}}} = 5,7 \text{ tr.min}^{-1}$ et minimale $N_{T_{\text{min}}} = 2 \text{ tr.min}^{-1}$.

On note :

- N_{moteur} , la vitesse de rotation des moteurs (tr.min^{-1})
- k , le rapport de transmission du réducteur ($k = \Omega_{\text{tambour}}/\Omega_{\text{moteur}}=1/174$)
- η , le rendement du réducteur (0,95)
- P_u , la puissance utile d'un moteur
- C_u , le moment du couple utile d'un moteur

| | | |
|---|----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 11/18 |

B.1. Dimensionnement des machines asynchrones.

B.1.1. Déterminer (en tr.min^{-1}) les extremums de vitesse de rotation des moteurs.

B.1.2. Quelle sera la puissance délivrée par chacun des trois moteurs ?

B.1.3. En déduire la plage de variation du moment du couple utile C_u pour **un** moteur.

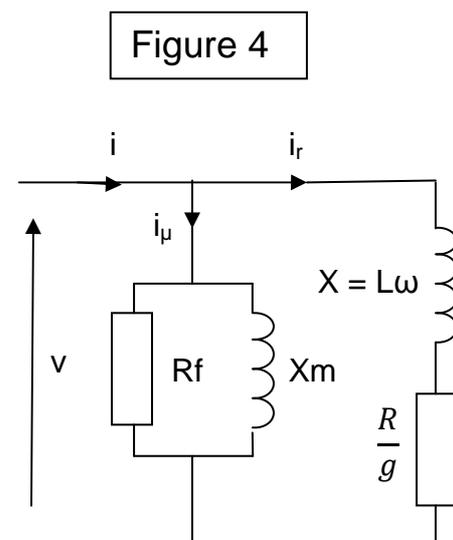
B.2. Expression du moment du couple électromagnétique.

Cette partie concerne l'étude d'une des 3 machines asynchrones entrainant l'enrouleur. La machine asynchrone est alimentée par un variateur triphasé dont la fréquence de sortie est variable. L'onduleur fonctionne en Modulation de Largeur d'Impulsion, le rapport V/f étant conservé constant.

Caractéristiques de la machine asynchrone :

- *Machine asynchrone triphasée, rotor à cage*
- *8 pôles*
- *Alimentation nominale 230 V / 400 V – 50 Hz*
- *Les pertes joule statoriques, les pertes fer rotoriques et les pertes mécaniques sont négligées.*
- *La machine est couplée en étoile.*

On donne figure 4, le modèle équivalent pour une phase de la machine asynchrone :



Rf : représente les pertes fer
Xm : réactance magnétisante du stator
X : réactance totale de fuite de flux
 ω : pulsation électrique
R : résistance du rotor ramenée au stator, $2,69 \Omega$
g : glissement

| | | |
|---|-----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPPEM | Page : 12/18 |

La machine asynchrone doit pouvoir fonctionner sur une grande plage de vitesse, de 350 tr.min^{-1} à 990 tr.min^{-1} . Elle fonctionne à puissance utile constante $P_u = 700 \text{ W}$.

B.2.1. Exprimer, à partir des informations de la figure 4, la valeur efficace I_r de l'intensité en fonction de V , R , L , ω et g .

La puissance P_{tr} transmise au rotor est donnée par :

$$P_{tr} = \frac{3 R}{g} I_r^2$$

B.2.2. Montrer que l'on peut exprimer le moment du couple électromagnétique C_{em}

de cette façon :
$$C_{em} = \frac{3 R}{g \cdot \Omega_s} \frac{V^2}{(L\omega)^2 + \left(\frac{R}{g}\right)^2}$$

B.2.3. Montrer que, lorsque g est faible, on peut négliger un terme et on peut alors écrire :
$$C_{em} = \frac{3 \cdot p^2}{60 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R} \left(\frac{V}{f}\right)^2 (n_s - n)$$
 ; les vitesses étant exprimées en tr.min^{-1} .

B.2.4. En déduire que lorsque g est faible et que le rapport V/f est maintenu constant, le moment du couple électromagnétique évolue linéairement en fonction de la vitesse de rotation :
$$C_{em} = K \cdot (n_s - n)$$

Montrer que $K = 1 \text{ N.m.min.tr}^{-1}$.

B.3. Étude de la commande de la machine asynchrone.

Nous souhaitons prédéterminer certains paramètres du variateur de vitesse, notamment la plage de fréquence à autoriser. Pour cela, on trace la caractéristique nominale de la machine ($f = 50 \text{ Hz}$) puis on utilise les propriétés de l'alimentation à $V/f = \text{constante}$ pour placer les différents points de fonctionnement de la machine.

La relation $C_{em} = 1 \cdot (n_s - n)$ reste vraie pour toute la partie B.3.

B.3.1. Tracé de la caractéristique nominale de la machine asynchrone.

B.3.1.1. Déterminer, exprimée en tr.min^{-1} , la vitesse de synchronisme nominale n_s de la machine.

| | | |
|---|-----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPPEM | Page : 13/18 |

B.3.1.2. En vous aidant de la caractéristique tracée sur le document réponse 2, page 17, déterminer la valeur du moment du couple électromagnétique pour une vitesse de 750 tr.min^{-1} .

B.3.2. Plage de fonctionnement en enroulement.

Certaines caractéristiques du fonctionnement de la machine asynchrone en phase d'enroulement sont imposées :

- *Enrouleur plein : $N_{min} = 350 \text{ tr.min}^{-1}$; $Cem_{max} = 19 \text{ N.m}$*
- *Enrouleur vide : $N_{max} = 990 \text{ tr.min}^{-1}$;*

B.3.2.1. Sur le document réponse 2, page 17, placer le point de fonctionnement E_p correspondant à une phase d'enroulement, tambour plein.

B.3.2.2. Sur ce même document, tracer la caractéristique $Cem = f(n)$ de la machine asynchrone passant par E_p .

B.3.2.3. Déterminer la vitesse de synchronisme n_{sep} .

B.3.2.4. Calculer la fréquence f_{ep} des tensions que devra fournir le variateur pour cette phase d'enroulement tambour plein.

On cherche ensuite à déterminer la fréquence f_{ev} des tensions que devra fournir le variateur lors d'une phase d'enroulement tambour vide.

B.3.2.5. Sur le document réponse 2, page 17, placer le point de fonctionnement E_v correspondant à une phase d'enroulement, tambour vide.

B.3.2.6. En déduire la nouvelle vitesse de synchronisme n_{sev} (en tr.min^{-1}) et la fréquence f_{ev} .

| | | |
|---|----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 14/18 |

PARTIE C : Étude des grandeurs électriques en entrée du variateur.

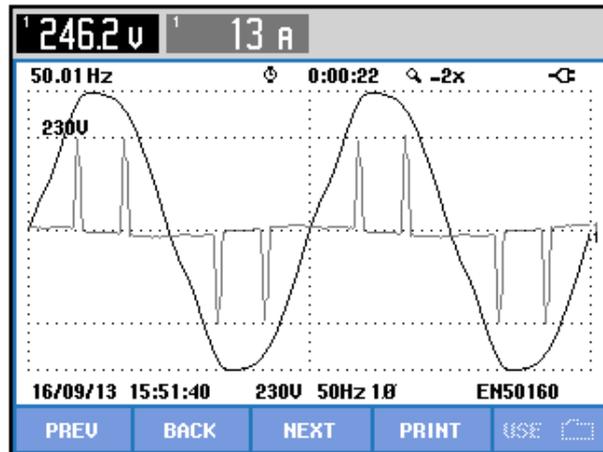
On se propose d'étudier les grandeurs électriques en entrée du variateur alimentant les trois moteurs. Des relevés de tension et de courant sur une seule phase en entrée du variateur sont fournis en annexe 1 page 16 et permettront de répondre aux questions suivantes.

Dans toute cette partie, on raisonnera sur une seule phase en entrée du variateur.

- C.1 Déterminer la puissance active consommée et la puissance apparente.
- C.2 Calculer le facteur de puissance. Retrouver sa valeur sur l'annexe 1.
- C.3 Donner le facteur de déplacement ($\cos \Phi$). Tracer sur le document réponse 3 page 18 l'allure approximative du fondamental du courant d'entrée. Ces deux résultats paraissent ils en cohérence ?
- C.4 Donner la valeur du taux de distorsion harmonique du courant.
- C.5 Donner la valeur maximale de l'intensité du courant.
- C.6 Déterminer la valeur efficace du fondamental du courant.
- C.7 Justifier le fait que cette installation consomme une puissance déformante.

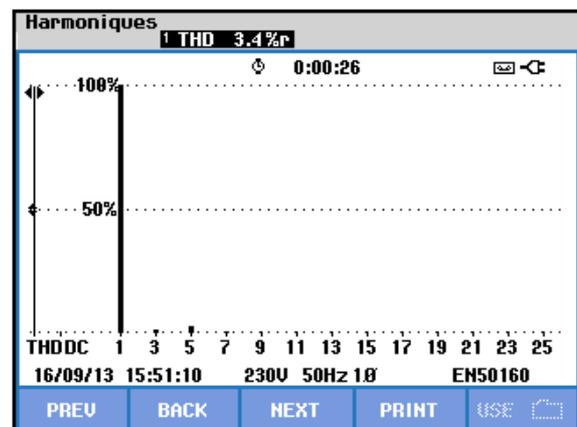
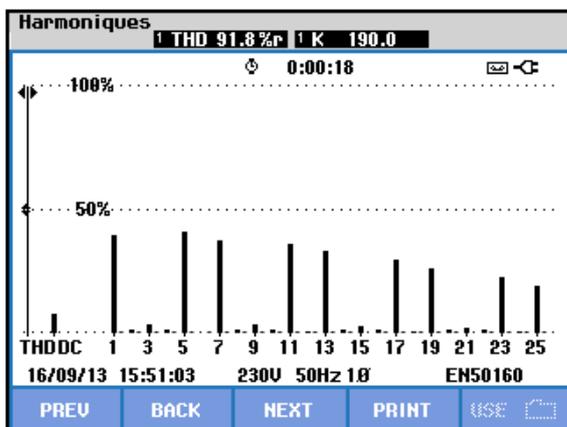
| | | |
|---|----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 15/18 |

Annexe 1



| Volts/Amp/Hertz | | |
|--|-------|----------------|
| L1 | | |
| U _{rms} | 246.1 | 1.1 |
| U _{pk} | 344.2 | 2.6 |
| CF | 1.40 | OL |
| Hz | 50.00 | |
| L1 | | |
| A _{rms} | 13 | 0.2 |
| A _{pk} | 59 | 0.2 |
| CF | 4.53 | OL |
| 16/09/13 15:50:30 230V 50Hz 1Ø EN50160 | | |
| PREV | BACK | NEXT PRINT USE |

| Puissance et énergie | | |
|--|-------|----------------|
| FULL L1 | | |
| kW | 1.2 | 1.2 |
| kVA | 3.2 | 3.2 |
| kVAR | 2.9 | 2.9 |
| PF | 0.38 | 0.38 |
| Cosφ | 0.95 | |
| A _{rms} | 13 | |
| L1 | | |
| U _{rms} | 246.4 | |
| 16/09/13 15:50:09 230V 50Hz 1Ø EN50160 | | |
| PREV | BACK | NEXT PRINT USE |

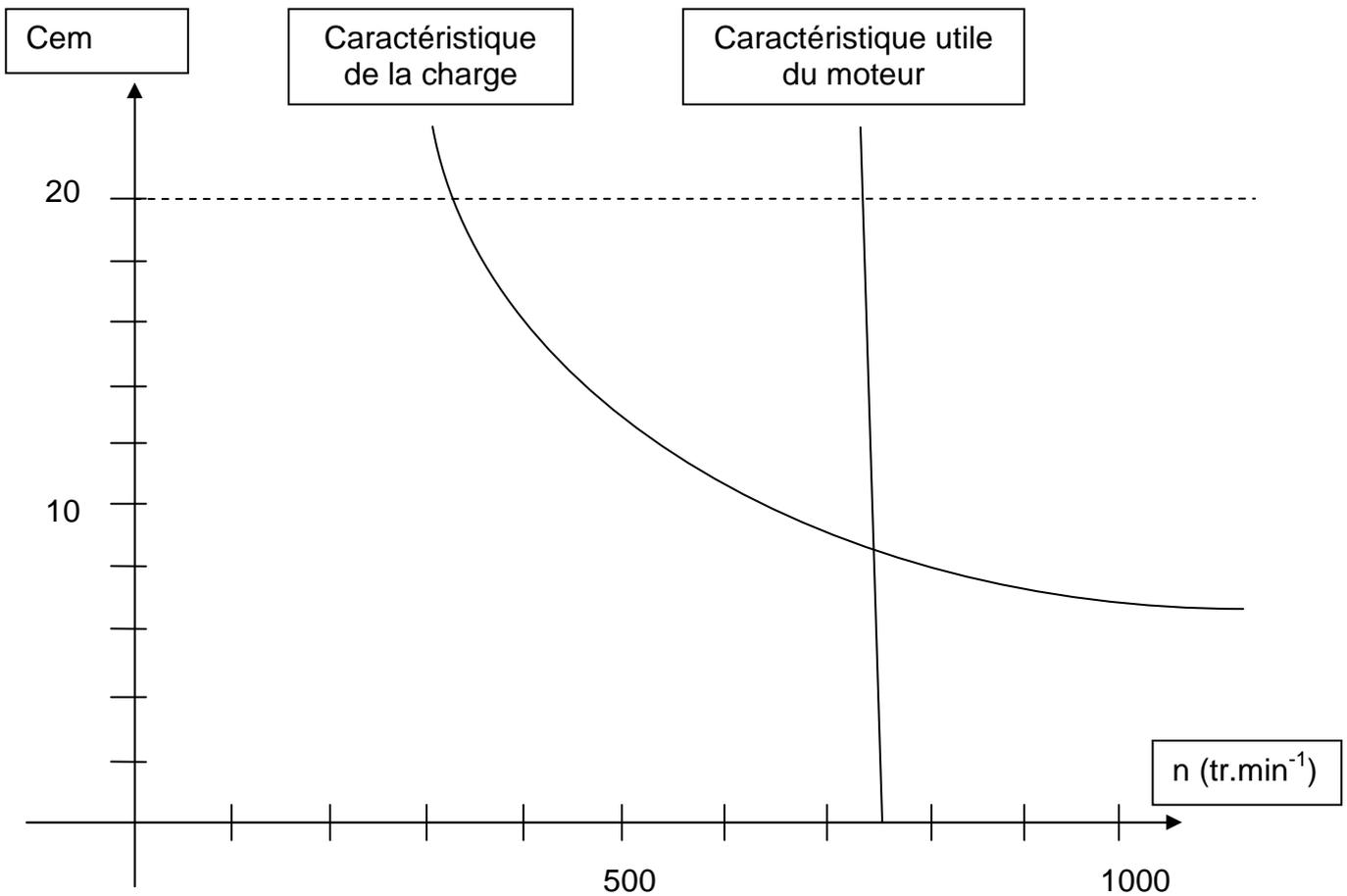


DOCUMENT RÉPONSE 1

Inscrire dans le tableau ci-dessous vos résultats aux questions A.1.5, A.2.2 et A.2.6.

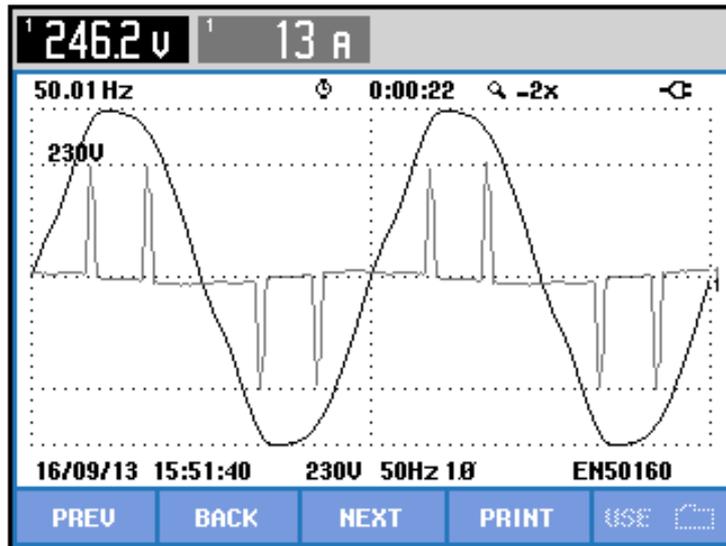
| | Vitesse de rotation du tambour $\Omega_{\text{tambour}}(\text{rad.s}^{-1})$ | Puissance au niveau du tambour moteur $P_{\text{tambour}}(\text{W})$ | Moment du couple au niveau du tambour $C_{\text{tambour}}(\text{N.m})$ |
|-----------------|---|---|---|
| Enrouleur plein | | | |
| Enrouleur vide | | | |

DOCUMENT RÉPONSE 2



| | | |
|---|----------------------|-----------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM | Page : 17/18 |

DOCUMENT RÉPONSE 3



| | |
|---|----------------------|
| BTS ÉLECTROTECHNIQUE | Session 2014 |
| Épreuve E4.1 : Étude d'un système technique industriel : Pré-étude et modélisation | Code : 14NC-EQPEM |
| | Page : 18/18 |