

# BREVET DE TECHNICIEN SUPERIEUR

## ELECTROTECHNIQUE

SESSION 2010

---

### EPREUVE E4.1

Etude d'un système technique industriel

Pré-étude et modélisation

Durée : 4 heures ~ Coefficient : 3

---

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

---

Les parties A1, A2, A3, B, C1, C2 sont indépendantes

---

- 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.

# PRÉSENTATION GÉNÉRALE

## CONTEXTE INDUSTRIEL

### **ENTREPRISE JBM INDUSTRIE**

JBM INDUSTRIE est une entreprise de sous-traitance en mécano-soudure, peinture et montage pour des clients du secteur agricole (KUHN...) et de travaux publics (MANITOU...).

Située à COËX en Vendée, JBM INDUSTRIE a été créée en 1995 et compte à ce jour 70 salariés avec un chiffre d'affaires d'environ 8,2 M€ en 2007. Son site s'étend sur une surface de 17 000 m<sup>2</sup> dont 5 500 m<sup>2</sup> couverts.

L'amélioration de l'outil de production (soudure robotisée) et l'organisation du temps de travail des équipes en 3x8h permettent à l'entreprise d'accroître constamment sa production.

### **FABRICATION DU CHÂSSIS MANITOU POUR ENGIN DE MANUTENTION**

L'entreprise produit quotidiennement 4 à 6 châssis pour le client MANITOU. Ces châssis constituent l'ossature des engins de manutention sur lesquels seront montées ultérieurement la cabine, les roues et la fourche télescopique.

Dans le processus de fabrication de ces châssis, une étape importante consiste à aléser les deux moyeux qui supporteront l'articulation de la fourche télescopique.

Ces deux moyeux doivent respecter rigoureusement les spécifications du client dont l'alignement et l'état de surface.



*Châssis 1233 MANITOU*



*MANITOU*

## PROCESSUS DE FABRICATION DES CHÂSSIS

En journée, les différentes parties des châssis sont montées puis soudées à l'aide d'un robot de soudure automatisé. Lorsque l'ossature est terminée, les châssis sont entreposés à proximité de l'aléuseuse dans l'attente de l'opération d'alésage qui a lieu exclusivement la nuit. Le lendemain, les châssis sont mis en peinture puis envoyés à l'expédition.

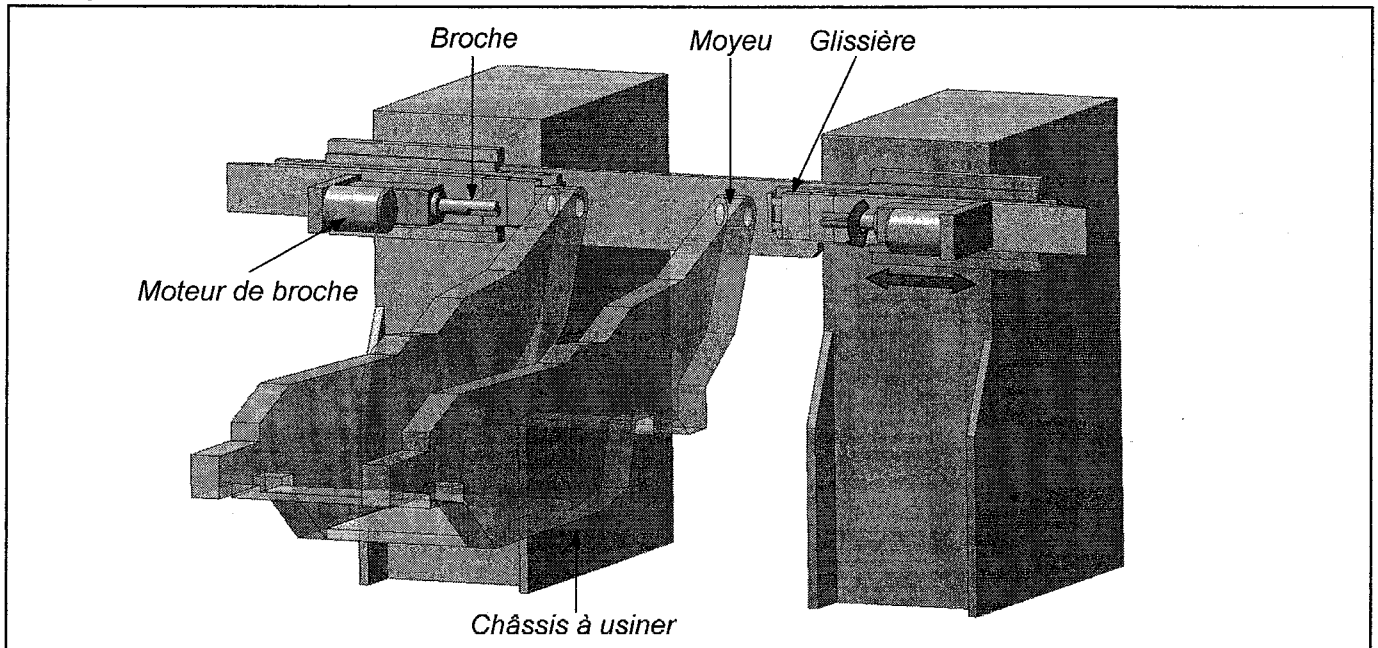
### **ALÉSEUSE 2 TÊTES**

L'usinage des moyeux est réalisé par un système constitué de 2 têtes d'alésage alignées face à face et mues, chacune, par une motorisation électrique et un vérin hydraulique.

L'entraînement en rotation des broches est assuré par des moteurs asynchrones triphasés de **5,5 kW** chacun et les mouvements d'avance et de recul par des vérins hydrauliques.

Actuellement, un seul variateur assure l'entraînement des deux broches à vitesse variable. La commande distincte des deux broches est assurée par jeu de contacteurs placés en aval du variateur. Les moteurs disposent d'une protection thermique individuelle.

Le groupe hydraulique est constitué d'un moteur asynchrone triphasé de 1,1 kW accouplé à deux pompes à cylindrée fixe qui permettent d'alimenter indépendamment les vérins. Le sens et la vitesse de déplacement de chaque broche sont gérés par un distributeur hydraulique associé à un régulateur de débit.



## DESCRIPTION DE L'OPÉRATION D'ALÉSAGE

Tour à tour, l'opérateur positionne, à l'aide d'un pont roulant, les châssis sur le poste d'alésage. Ensuite, il lance le cycle d'usinage qui réalise simultanément l'alésage des deux trous dans l'ordre suivant :

### 1. La phase d'approche

La distance d'approche est de 120 mm. La vitesse de translation des broches est identique pendant les trois phases.

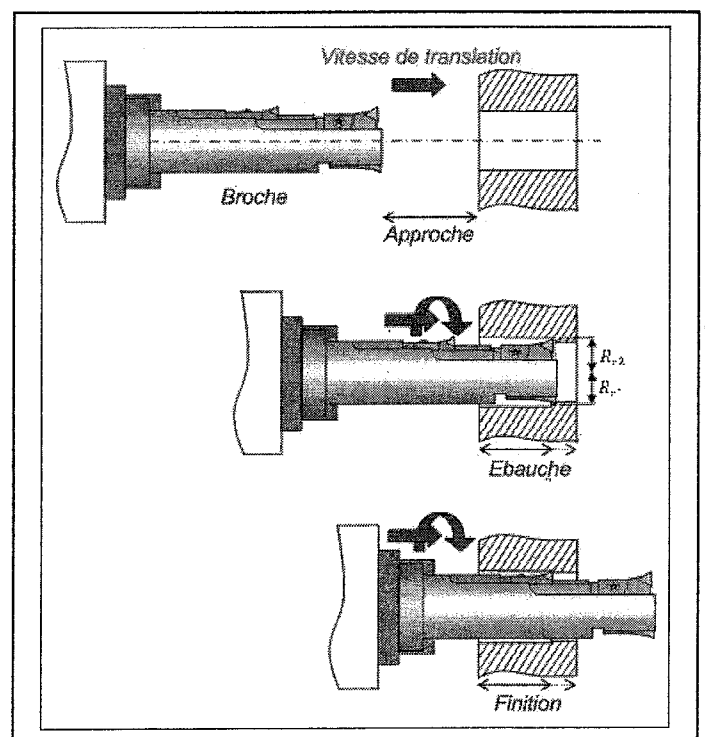
### 2. La phase d'ébauche

L'opération d'ébauche est réalisée avec deux plaquettes légèrement décalées et réglées à des diamètres différents, ce qui améliore le contrôle des copeaux dans les matières exigeantes.

### 3. La phase de finition

L'opération de finition est réalisée par un alésage à une seule plaquette.

À la fin du cycle, l'opérateur contrôle l'alignement et l'état de surface puis évacue le châssis pour laisser la place au suivant.



## ENJEUX & PROBLÉMATIQUES

### **ENJEUX :**

**Assurer la sécurité du personnel opérant sur la machine conformément aux normes en vigueur.**

**Améliorer la productivité par diminution du temps cycle.**

### **PROBLÉMATIQUES**

#### ❖ **Problématique liée à la sécurité de la machine :**

Actuellement, les opérations de surveillance du processus et de débouillage conduisent l'opérateur à s'approcher à proximité de mouvements réputés dangereux comme la rotation des broches.

L'entreprise désire conserver l'ergonomie du poste de travail afin de faciliter la manutention des châssis. La mise en place de barrières matérielles pour empêcher l'accès à la zone dangereuse lors des mouvements dangereux est donc proscrite.

Lors d'un arrêt d'urgence, le moteur, dépourvu de frein électromécanique, s'arrête en roue libre en une dizaine de secondes.

La mise en sécurité de la machine s'accompagne de la réfection complète de la partie commande. Le choix et la mise en œuvre des matériels sont conditionnés par :

- La classification de la catégorie du circuit de commande selon la norme en vigueur ;
- La classification de la catégorie d'arrêt de la machine.

#### ❖ **Problématique liée à la productivité :**

Dans l'état actuel, la vitesse de translation des broches (vitesse lente) est la même quelle que soit la phase du cycle d'usinage : approche, ébauche, finition ou recul.

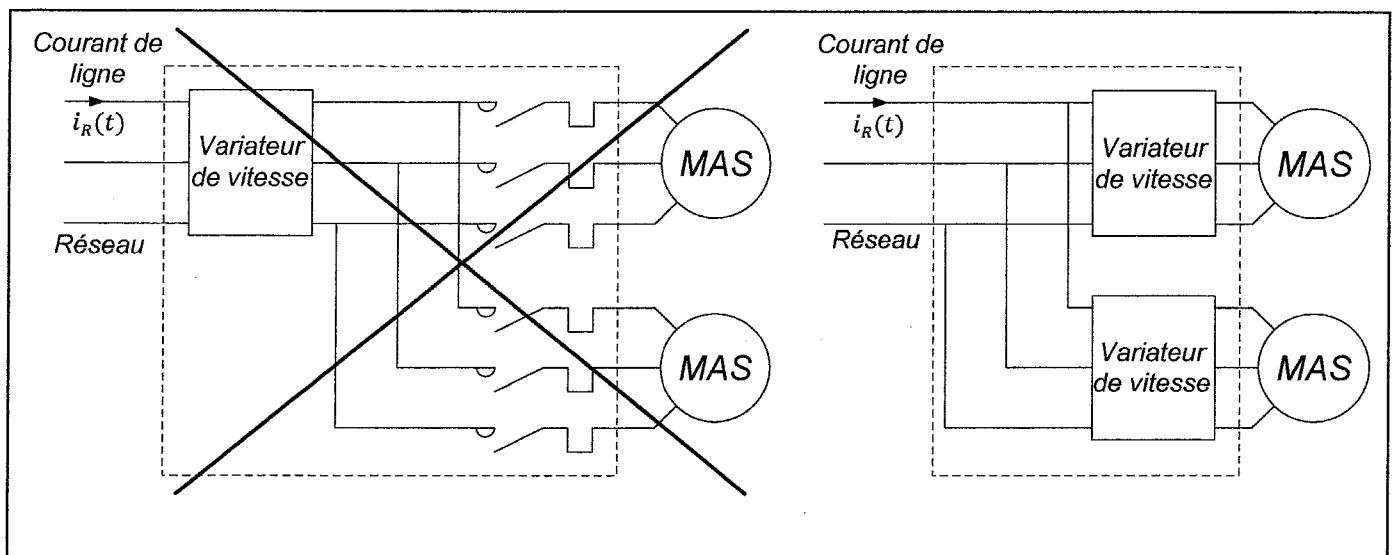
La productivité pourrait être améliorée par l'**augmentation de la vitesse de translation** des broches (*vitesse rapide*) lors des phases d'approche et de recul. Une modification du circuit hydraulique s'impose pour obtenir ce nouveau cycle d'usinage.

D'autre part, une étude préliminaire a permis d'établir que les conditions d'usinage n'étaient pas satisfaisantes et devaient être redéfinies. En effet, l'optimisation des conditions d'usinage devrait permettre **d'augmenter la vitesse** de déplacement des broches (*vitesse lente*) en phases d'ébauche et de finition et ainsi contribuer à l'amélioration de la productivité.

La redéfinition des conditions d'usinage nécessite :

- Le changement de la nuance et du type des plaquettes d'usinage ;
- L'obtention de **fréquence de rotation** des broches différentes selon les phases d'ébauche et de finition ;
- L'utilisation des moteurs de broche au-delà de leurs performances nominales.

Pour exploiter les moteurs au maximum de leurs performances et s'affranchir des problèmes de synchronisation entre les 2 broches, la solution retenue consiste à contrôler individuellement les moteurs de broche par la mise en œuvre de 2 variateurs de vitesse.



Cependant, dans la solution retenue, les harmoniques de courant produits par les variateurs risquent d'engendrer un dépassement du courant de ligne au-delà du courant admissible dans le câble d'alimentation. Auquel cas, il convient de redimensionner la ligne d'alimentation de l'armoire et de sa protection ou de mettre en place un moyen pour réduire les harmoniques de courant.

## A. AMELIORATION DE LA PRODUCTIVITE

### A.1 CARACTERISTIQUES MECANQUES DU SYSTEME DE BROCHE

Deux plaquettes placées sur la broche assurent l'usinage en phase d'ébauche. L'effort de coupe sur la plaquette 1 se modélise par une force  $\vec{F}_{b1}$ , tangente et opposée à la trajectoire de l'outil (voir figure 1). De même, on note  $\vec{F}_{b2}$  la force appliquée sur la plaquette 2. Les normes de ces forces en newtons s'expriment :

$$F_{b1} = a_{pe1} \cdot K_C \cdot \frac{V_a}{N} \text{ et } F_{b2} = a_{pe2} \cdot K_C \cdot \frac{V_a}{N}$$

Avec :

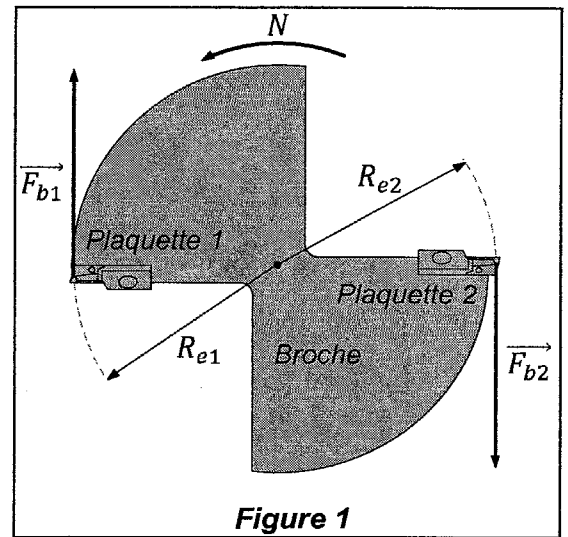
$N = 725 \text{ tr.min}^{-1}$  : la vitesse de rotation de la broche,

$V_a = 40 \text{ mm.min}^{-1}$  : la vitesse de translation de la broche,

$K_C = 5800 \text{ N.mm}^{-2}$  : le coefficient de coupe spécifique,

$a_{pe1} = 1,58 \text{ mm} \cdot \text{tr}$  et  $a_{pe2} = 2,25 \text{ mm} \cdot \text{tr}$  : les profondeurs d'ébauche de chaque outil.

La plaquette 1 est positionnée à un rayon  $R_{e1} = 32,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  de l'axe de rotation et la plaquette 2 à un rayon  $R_{e2} = 34,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .



**A.1.1** Calculer  $F_{b1}$  et  $F_{b2}$ .

**A.1.2** Calculer le moment  $C_{b1}$  de la force  $\vec{F}_{b1}$  et le moment  $C_{b2}$  de la force  $\vec{F}_{b2}$  par rapport à l'axe de rotation de la broche.

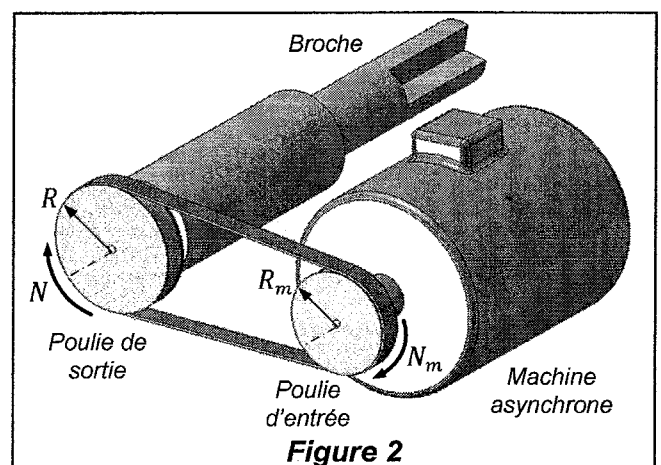
**A.1.3** Déduire de la question précédente que le moment du couple résistant  $C_b$  exercé par les forces  $\vec{F}_{b1}$  et  $\vec{F}_{b2}$  sur la broche vaut 41,6 Nm.

**A.1.4** Calculer la puissance mécanique  $P_b$  qu'il est nécessaire de transmettre à la broche.

La transmission de puissance entre la broche et la machine asynchrone de 5,5 kW est assurée par un ensemble poulies/courroie représenté figure 2, dont le rendement vaut  $\eta = 0,85$ . On suppose que la courroie est parfaitement tendue. On note  $N_m$  la vitesse de rotation en  $\text{tr.min}^{-1}$  de la machine asynchrone. On a :

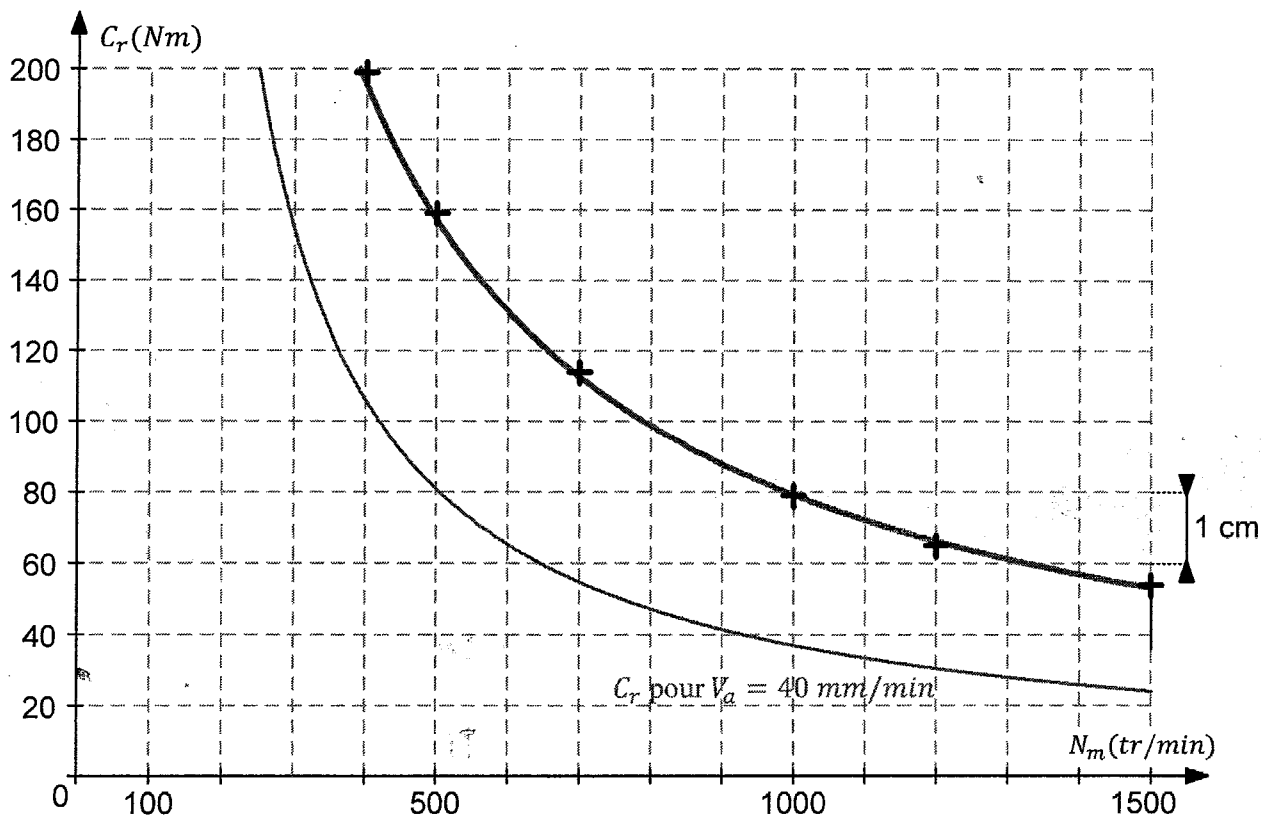
$R_m = 80 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  : le rayon de la poulie d'entrée,

$R = 100 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  : le rayon de la poulie de sortie.



- A.1.5** Exprimer  $r$  le rapport de réduction de l'ensemble poulies/courroie tel que  $N = r.N_m$  en fonction de  $R$  et de  $R_m$ . Calculer  $r$ .
- A.1.6** Calculer la vitesse de rotation  $N_m$  de la machine asynchrone.
- A.1.7** Calculer la puissance mécanique utile  $P_u$  de la machine asynchrone.
- A.1.8** À partir des résultats précédents, vérifier que le moment du couple résistant  $C_r$  exercé sur l'arbre de la machine asynchrone est proche de 39 Nm.

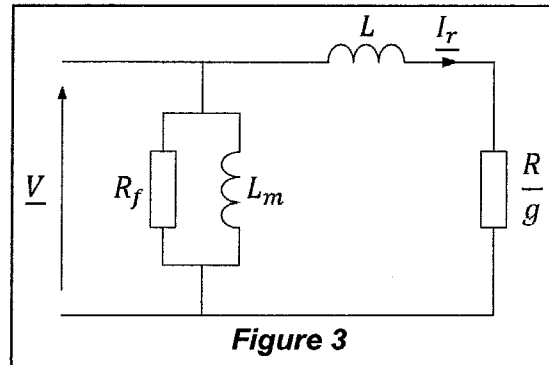
Afin de contribuer à améliorer la productivité, on souhaite augmenter la vitesse d'avance lors de l'usinage. Sur la courbe ci-dessous est représentée en trait épais l'évolution de la caractéristique  $C_r(N_m)$  du moment du couple résistant appliqué au moteur asynchrone lorsque la vitesse d'avance est  $V_a = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .



- A.1.9** À l'aide de ce document, déterminer la puissance utile  $P'_u$  que doit fournir le moteur asynchrone pour permettre cette amélioration de la productivité. Le moteur est-il correctement dimensionné ?

## A.2 CARACTERISTIQUE MECANIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Chaque machine asynchrone entraînant une broche possède 3 paires de pôles. On rappelle, ci-dessous (*figure 3*), le schéma équivalent d'une phase de cette machine en régime permanent sinusoïdal, où  $\underline{V}$  est le nombre complexe associé à la tension simple du réseau.  $R$  est la résistance d'un enroulement rotorique ramenée au stator, elle vaut  $0,54 \Omega$ .



La machine asynchrone est pilotée par un variateur à commande en  $\frac{V}{f} = 4,6V \cdot \text{Hz}^{-1}$  constant, où  $f$  est la fréquence des courants statoriques (de pulsation  $\omega$ ) et  $V$  la valeur efficace de la tension simple du réseau.

**Dans l'ensemble du problème, on néglige les pertes mécaniques de la machine.**

**A.2.1** Dans les conditions de fonctionnement de la machine, on considère que  $L\omega$  est très inférieur à  $\frac{R}{g}$ . Exprimer  $I_r$ , la valeur efficace du courant  $\underline{I_r}$  en fonction de  $V$ ,  $R$  et du glissement  $g$ .

**A.2.2** En déduire l'expression de la puissance électromagnétique  $P_{em}$  de la machine en fonction de  $V$ ,  $R$  et  $g$ .

**A.2.3** Rappeler la définition du glissement  $g$  en fonction de la vitesse de synchronisme  $N_s$  et de la vitesse de rotation  $N_m$  de la machine.

**A.2.4** Montrer que le moment du couple électromagnétique s'exprime :

$$C_{em} = K \cdot (N_s - N_m) \quad \text{avec} \quad K = \frac{3 \cdot p^2}{120 \cdot \pi \cdot R} \cdot \left(\frac{V}{f}\right)^2$$

où  $N_s$  et  $N_m$  sont exprimées en  $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ .

**A.2.5** Vérifier que  $K = 2,81 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{tr}^{-1} \cdot \text{min}$ .

**A.2.6** Calculer  $N_s$  pour une fréquence des courants statoriques  $f = 46 \text{ Hz}$ .

**A.2.7** Pour  $f = 46 \text{ Hz}$ , tracer  $C_{em}$  en fonction de  $N_m$  sur le *document réponse 1*.

**A.2.8** Sur ce même *document réponse 1* est fourni le tracé du moment du couple résistant  $C_r$  appliqué au moteur asynchrone pour une vitesse d'avance  $V_a = 40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Déterminer les coordonnées  $[C_{em0}; N_{m0}]$  du point de fonctionnement du système en l'état initial.



### A.3 AMELIORATION DE LA VITESSE D'AVANCE

Afin d'améliorer la productivité, on souhaite augmenter la vitesse de translation des broches lors de la phase d'approche. Ce déplacement étant assuré par des vérins hydrauliques, nous allons étudier les modifications à apporter à l'alimentation en huile de ces derniers.

**Préambule :** Compte tenu des vitesses réduites de déplacement du fluide dans ce problème, nous négligerons l'énergie cinétique de ce dernier. Dans ce cas, pour un fluide allant d'un point A vers un point B, le théorème de Bernoulli s'exprime :

$$p_B - p_A + \rho \cdot g \cdot (z_B - z_A) = \frac{P_h}{Q} - \Delta p_{AB}$$

$p_A$  et  $p_B$  : la pression en pascals au point A et au point B ;

$z_A$  et  $z_B$  : l'altitude respective du point A et du point B ;

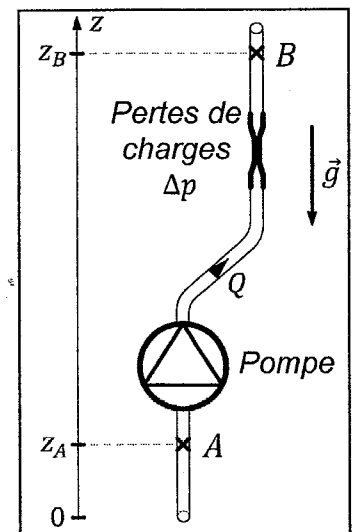
$P_h$  : la puissance hydraulique en watts de la pompe (nulle, si il n'y a pas de pompe entre A et B) ;

$Q$  : le débit en  $m^3 \cdot s^{-1}$  de la pompe ;

$\Delta p_{AB}$  : la chute de pression liée aux pertes de charges entre A et B ;

$\rho$  : la masse volumique du fluide, égale pour l'huile à  $850 \text{ kg} \cdot m^{-3}$  ;

$g$  : l'accélération de la pesanteur, égale à  $9,81 \text{ m} \cdot s^{-2}$ .



Dans ce problème, l'huile est considérée comme un fluide incompressible et la pression atmosphérique est égale à  $p_0 = 1.10^5 \text{ Pa}$ .

La mise en translation des deux ensembles broche/moteur est assurée par deux vérins identiques. Sur la figure 4 est représenté le schéma hydraulique d'un de ces vérins.

La chambre 1 du vérin possède une section  $S_1 = 31.10^{-4} \text{ m}^2$  et la chambre 2 une section  $S_2 = 25.10^{-4} \text{ m}^2$ .

Le distributeur 1D assure l'alimentation en huile du vérin et donc la mise en mouvement de la tige.

Le régulateur de débit permet d'imposer un débit de  $0,124 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  dans la chambre 1 du vérin.

La vitesse de translation correspondant à ce réglage est de  $40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

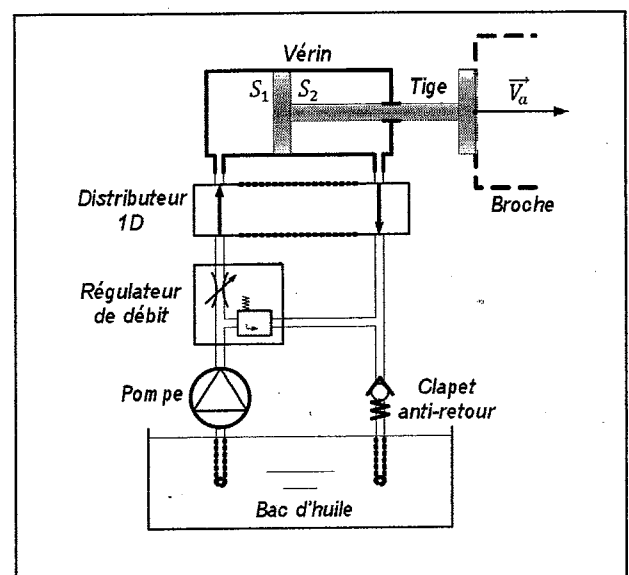


Figure 4

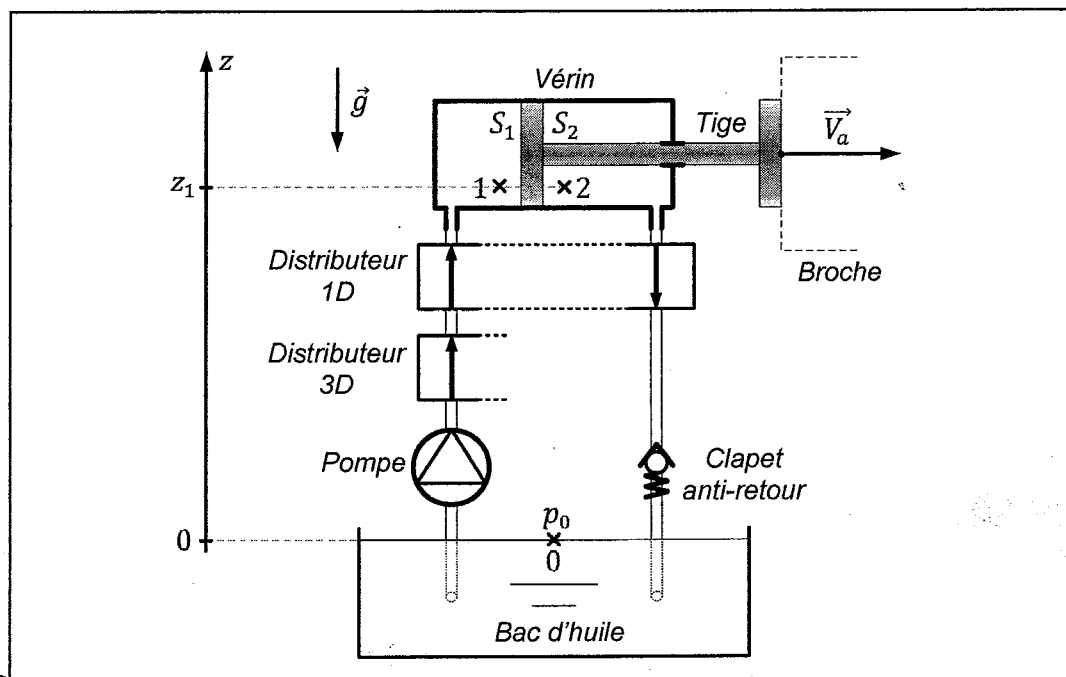
Afin d'augmenter la vitesse de translation de la broche lors de la phase d'approche, on shunte le régulateur de débit à l'aide d'un distributeur 3D (voir figure 5).

Le débit de la pompe est  $Q_1 = 6,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

On note  $p_1$  et  $p_2$  respectivement la pression au point 1 et au point 2. L'altitude du point 0 est prise comme référence, telle que  $z_0 = 0 \text{ m}$ , ainsi le vérin est à une altitude  $z_1 = z_2 = 2 \text{ m}$ .

Les pertes de charges pour une circulation de l'huile du point 2 au point 0 correspondent à une chute de pression égale à  $\Delta p_{20} = 15 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .

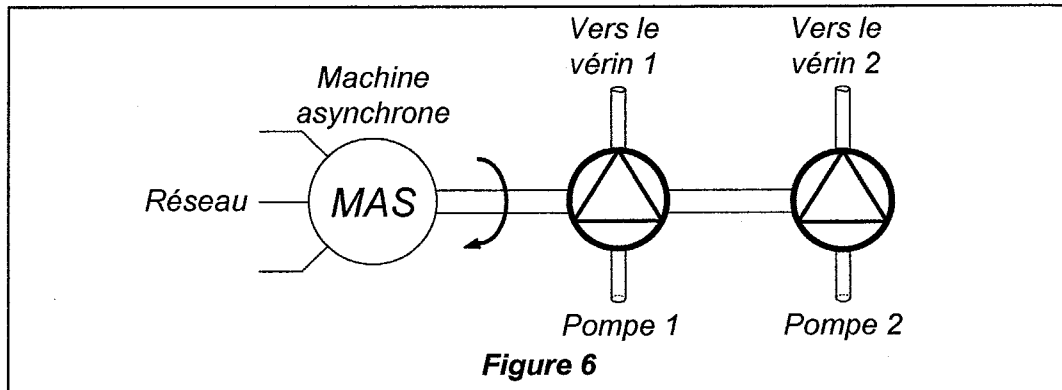
Du point 0 au point 1, la chute de pression liée aux pertes de charges dans les distributeurs et le circuit hydraulique vaut  $\Delta p_{01} = 12 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .



**Figure 5 : Circuit hydraulique pour augmenter la vitesse de translation en phase d'approche**

- A.3.1** Calculer (en  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) la vitesse de translation  $V_a$  de la broche obtenue avec ce nouveau mode de fonctionnement. On rappelle que  $Q_1 = V_a S_1$ .
- A.3.2** Appliquer le théorème de Bernoulli au fluide allant du point 2 au point 0. Montrer que la pression  $p_2$  vaut  $15,8 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .
- A.3.3** Donner la relation qui existe entre  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $S_1$  et  $S_2$ . Montrer que  $p_1$  vaut  $12,8 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .
- A.3.4** Appliquer le théorème de Bernoulli à l'huile allant du point 0 au point 1. Calculer la puissance hydraulique  $P_h$  de la pompe.

L'ensemble des deux pompes est entraîné par une machine asynchrone d'une puissance nominale de 1,1 kW, tel que représenté *figure 6*. On suppose que chaque pompe possède un fonctionnement identique et un même rendement de 60%.



**A.3.5** Calculer la puissance utile  $P_u$  que la machine asynchrone doit fournir. Ce moteur est-il convenablement dimensionné ?

## B. MISE EN SECURITE DE LA MACHINE

Sur un cycle de fonctionnement, les broches atteignent la vitesse de rotation la plus élevée lors de la phase de finition. Ainsi, en cas d'arrêt d'urgence du système (suite par exemple à une intrusion dans la zone de sécurité), c'est durant cette phase que les contraintes pour stopper les broches sont les plus importantes.

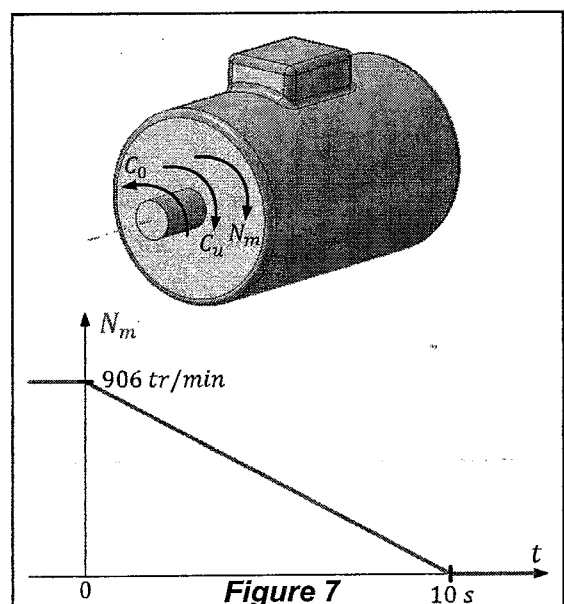
La machine asynchrone entraînant une broche exerce un moment de couple utile  $C_u$  sur l'arbre d'entrée (voir figure 2). Les frottements secs exercent sur ce même arbre un moment de couple  $C_0 = 0,5 \text{ Nm}$ . On note  $J$  le moment d'inertie du système ramené sur l'arbre de la machine.

**B.1** Appliquer le principe fondamental de la dynamique sur l'arbre de la machine, on notera  $\Omega_m$  la vitesse angulaire de rotation de la machine exprimée en  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Dans le fonctionnement initial, la machine s'arrêtait en roue libre ( $C_u = 0 \text{ Nm}$ ). Le profil d'évolution de la vitesse est représenté *figure 7*.

**B.2** Calculer la quantité  $\frac{d\Omega_m}{dt}$  lors de cette phase de décélération.

**B.3** En déduire que la valeur du moment d'inertie est  $J = 52,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ .

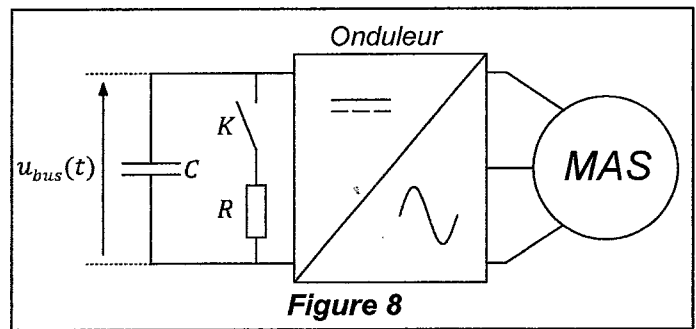


On désire maintenant obtenir le profil de vitesse proposé **document réponse 2**.

- B.4** Calculer la quantité  $\frac{d\Omega_m}{dt}$  lors de cette nouvelle phase de décélération.
- B.5** Calculer le moment du couple utile  $C_u$  correspondant à cette phase de décélération.
- B.6** Sur le *document réponse 2*, tracer la courbe  $C_u$  en fonction du temps.
- B.7** Rappeler l'expression de la puissance utile  $P_u$  fournie par la machine asynchrone. En déduire le tracé de  $P_u$  en fonction du temps sur le *document réponse 2*.
- B.8** Indiquer le mode de fonctionnement de la machine asynchrone lors de cette phase.
- B.9** Calculer la puissance maximale  $P_m$  à dissiper (on négligera les pertes de la machine).

Pour ce faire, on associe à chaque variateur de broche une résistance de freinage  $R = 60\Omega$  (*figure 8*).

En début de freinage, à la fermeture de l'interrupteur K, la tension du bus continu vaut  $u_{bus}(t) = 600V$ .



- B.10** Calculer la puissance  $P_R$  dissipée dans la résistance R en début de freinage.
- B.11** Comparer  $P_R$  et  $P_m$ . La résistance de freinage est-elle correctement dimensionnée ?

## C. ALIMENTATION ELECTRIQUE DE LA MACHINE

### C.1 ETUDE DE LA PROTECTION CONTRE LES SURINTENSITES

L'installation électrique de l'aléuseuse est raccordée au réseau triphasé 400 V – 50 Hz. La protection de l'ensemble était assurée initialement par des fusibles de 32 A. Les éléments raccordés sont (*figure 10*) :

- La machine asynchrone entraînant les deux pompes hydrauliques et consommant un courant d'intensité  $i_m(t)$ .
- L'alimentation des circuits auxiliaires, consommant un courant d'intensité  $i_a(t)$ .
- Les deux variateurs d'entraînement des broches consomment des courants non-sinusoïdaux supposés d'intensités identiques  $i_v(t)$ . Le tableau ci-contre fournit la valeur efficace des harmoniques significatifs de cette intensité  $i_v(t)$ . Ainsi, son fondamental  $i_{v1}(t)$  s'exprime comme suit :

Rang $k$	$I_{vk}$ (A)
1	10,6
5	9,5
7	8,9
11	7
13	6,2
17	4,2
19	3

$$i_{v1}(t) = \hat{I}_{v1} \cdot \sin(\omega \cdot t) \text{ avec } \hat{I}_{v1} = 15A$$

**Figure 9 : Valeur efficace des harmoniques du courant  $i_v(t)$**

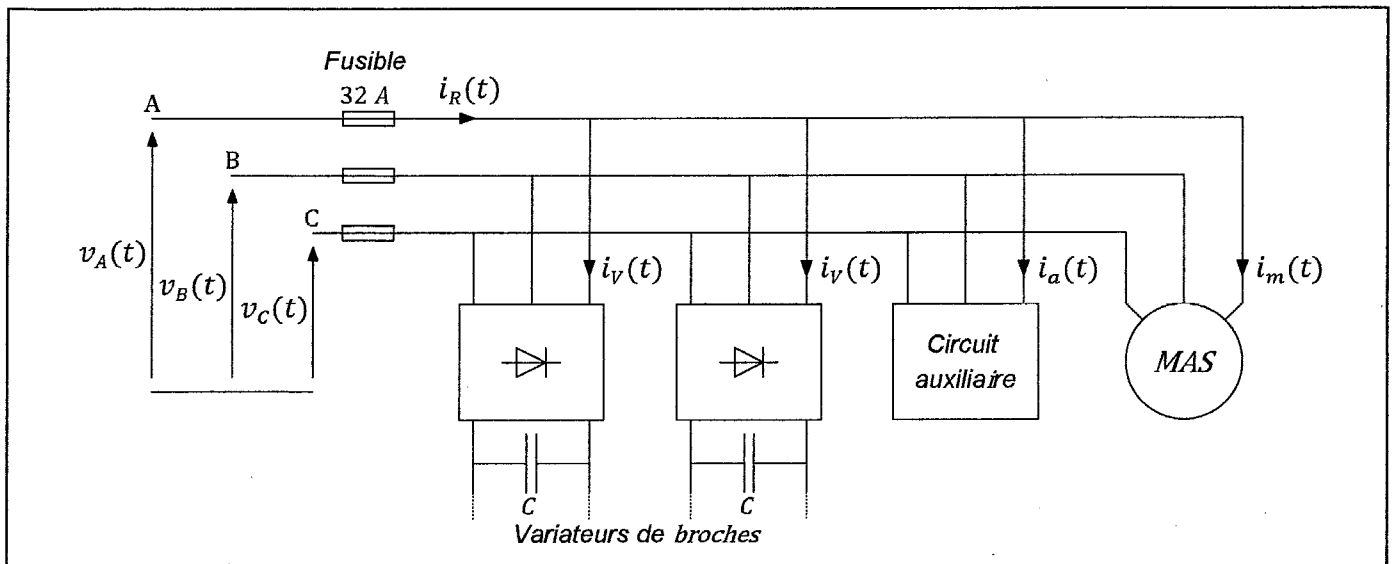


Figure 10

**Dans la suite du problème, on néglige les courants  $i_a(t)$  et  $i_m(t)$**

- C.1.1** Exprimer l'intensité  $i_R(t)$  en fonction des intensités des courants consommés par les différents éléments.
- C.1.2** Calculer la valeur efficace  $I_V$  de l'intensité  $i_V(t)$ . On utilisera la relation de Parseval où l'on se limitera au rang 19 :

$$I_V = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{V_k}^2}$$

- C.1.3** Calculer le taux de distorsion harmonique  $\tau$  du courant  $i_V(t)$ . On rappelle l'expression :

$$\tau = \frac{\sqrt{I_V^2 - I_{V1}^2}}{I_{V1}}$$

Comparer ce résultat à la valeur de  $\tau$  obtenue pour un signal purement sinusoïdal. D'où provient dans le montage la production d'harmoniques ?

- C.1.4** Calculer la valeur efficace  $I_R$  de l'intensité  $i_R(t)$ . Les fusibles initialement installés restent-ils correctement dimensionnés ?

## C.2 INFLUENCE DE LA STRUCTURE DU VARIATEUR SUR LES COURANTS DE LIGNE

Pour chaque variateur, on ajoute en sortie du pont redresseur (PD3), une bobine d'inductance  $L$ , dont la valeur est suffisante pour que le courant  $I_s$  puisse être considéré comme continu et son intensité égale à  $12,6A$  (voir *figure 11*). Dans l'étude suivante, on considère les diodes comme parfaites.

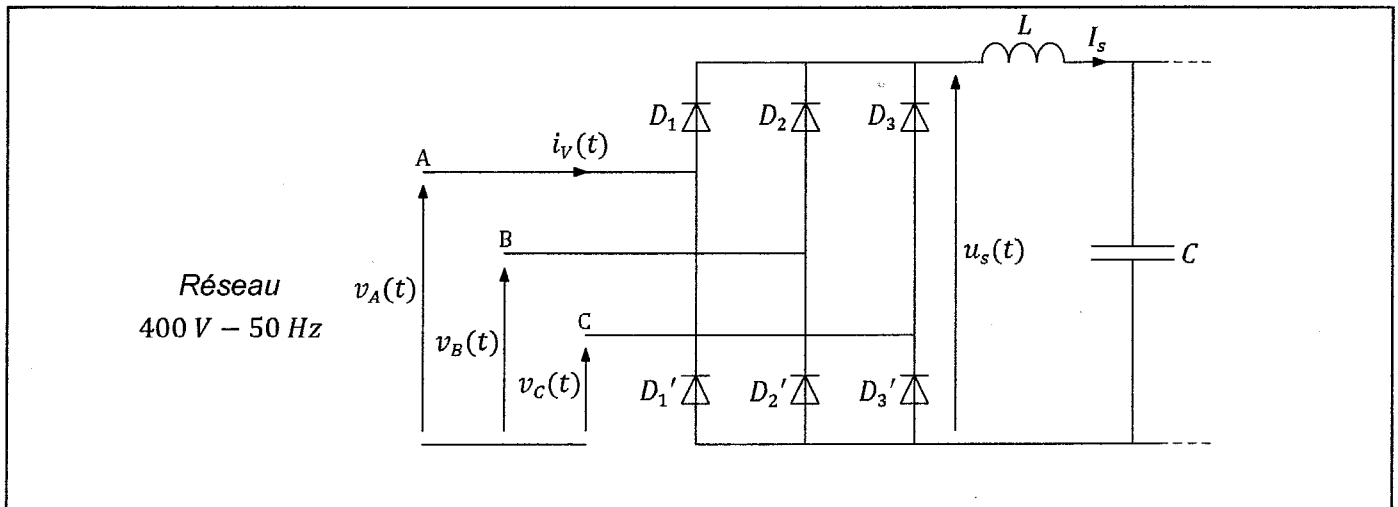


Figure 11 : Structure d'entrée d'un variateur

C.2.1 Sur le *document réponse 3*, indiquer les diodes passantes.

C.2.2 Sur le *document réponse 3*, tracer  $u_s(t)$  la tension en sortie du pont redresseur.

On rappelle que la tension moyenne  $U_s$  en sortie d'un pont PD3 s'exprime :

$$U_s = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot V}{\pi} \text{ où } V \text{ est la valeur efficace de la tension simple du réseau}$$

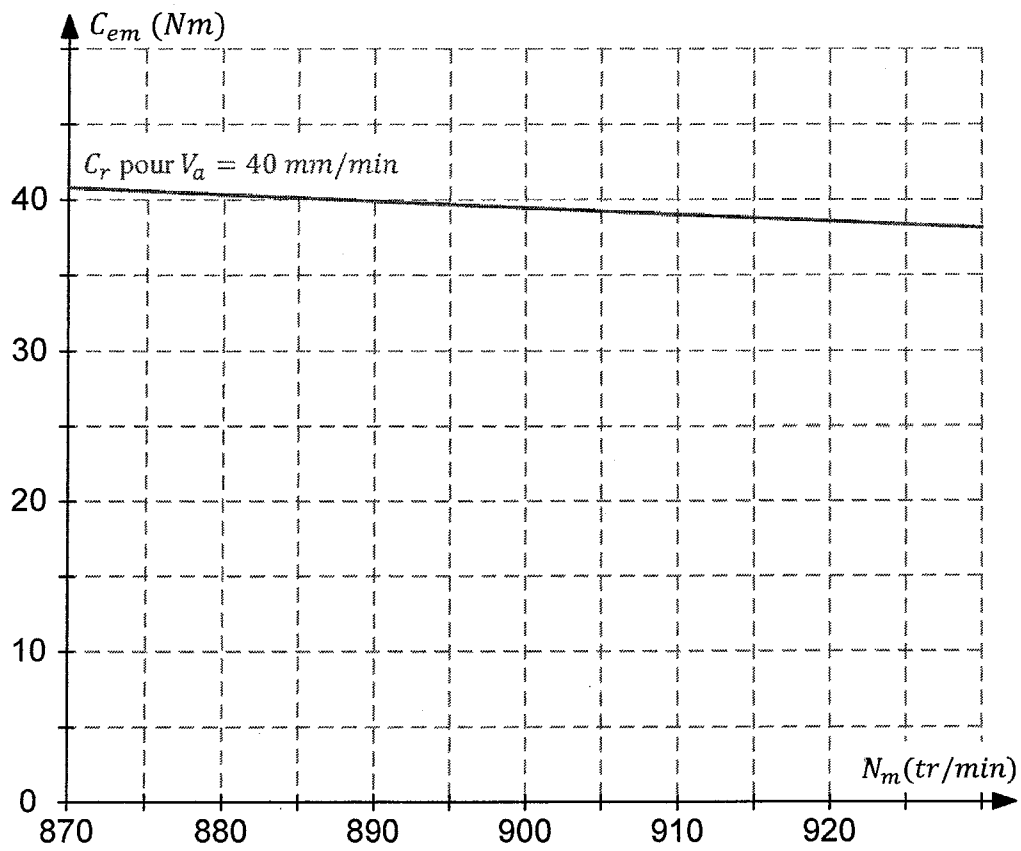
C.2.3 Calculer  $U_s$ .

C.2.4 Sur le *document réponse 3*, tracer l'allure du courant  $i_v(t)$ .

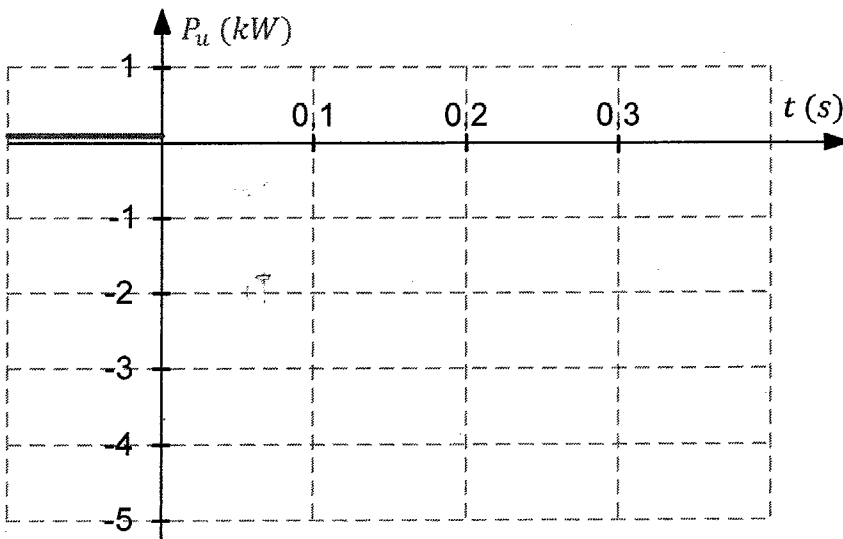
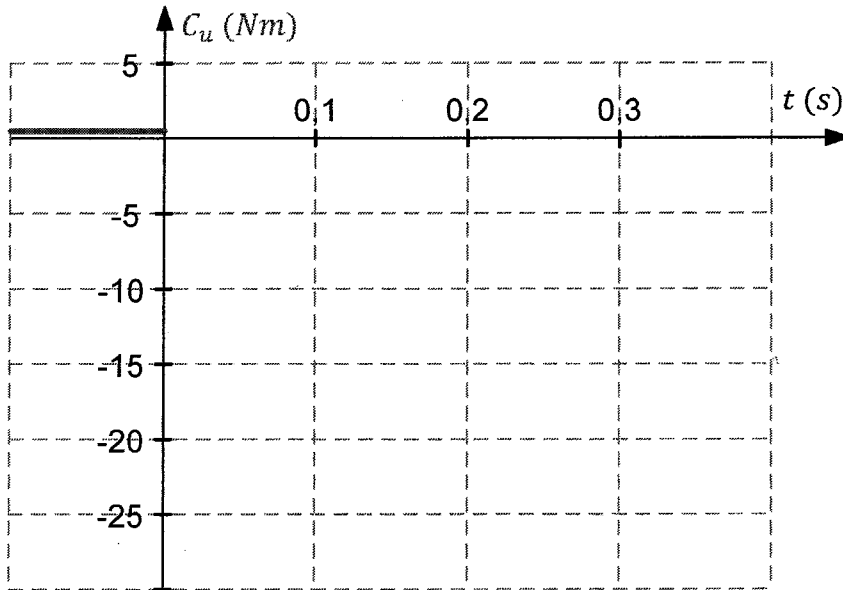
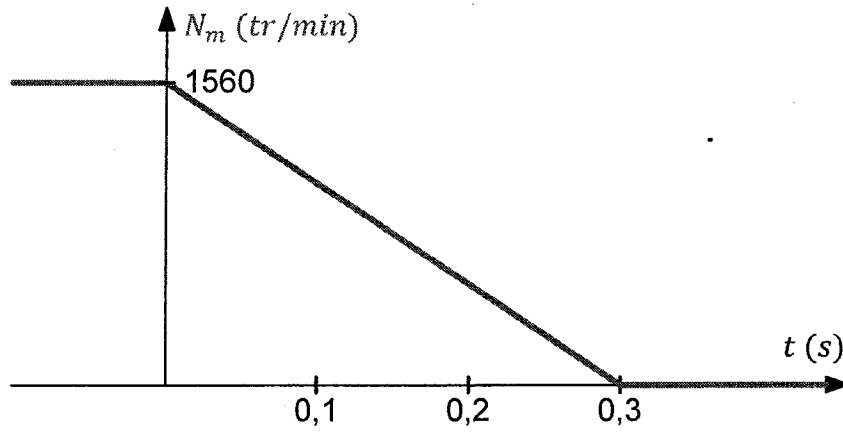
C.2.5 Calculer la puissance active  $P_s$  en sortie du pont redresseur. En déduire la puissance active  $P_v$  fournie par le réseau au variateur.

C.2.6 Sur le *document réponse 3*, tracer l'allure du fondamental  $i_{v1}(t)$  du courant  $i_v(t)$ . En déduire le déphasage  $\varphi_{v1}$  entre  $v_A(t)$  et  $i_{v1}(t)$ .

C.2.7 Déduire des questions précédentes la valeur efficace  $I_{v1}$  du fondamental  $i_{v1}(t)$ .

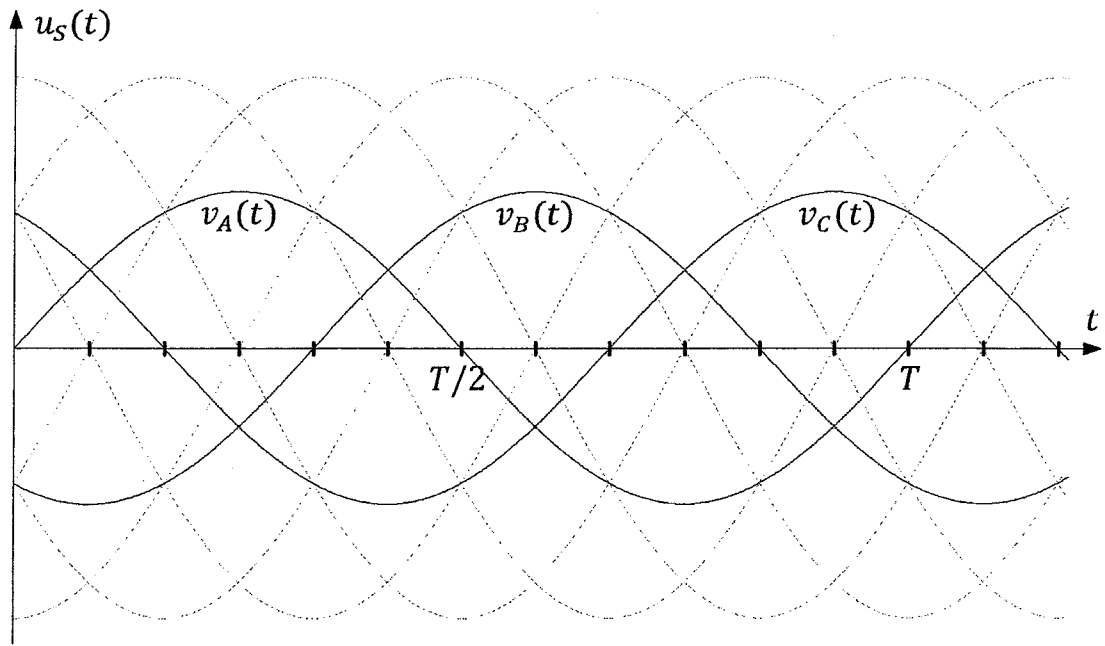


**Document réponse 1**

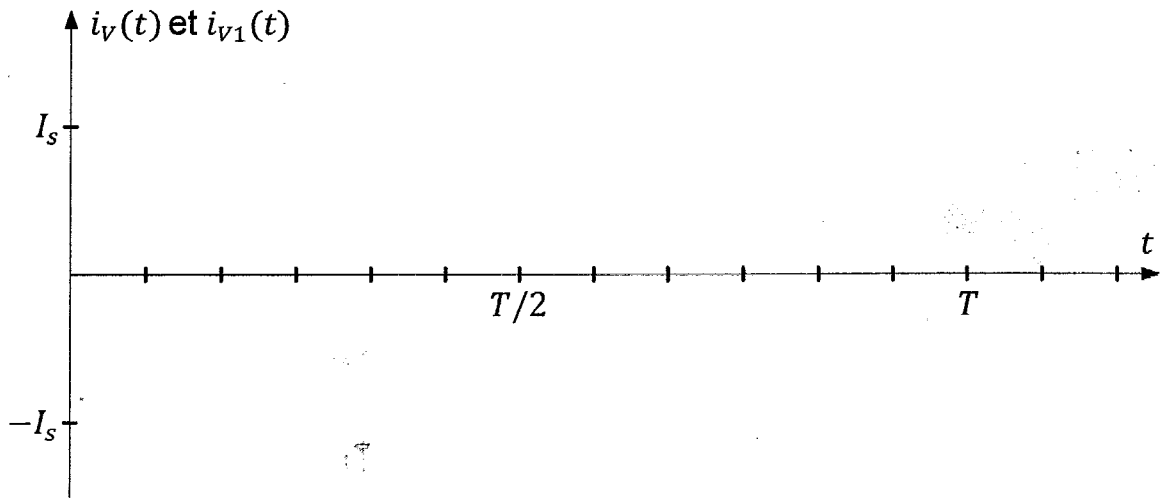


Document réponse 2





$D_1, D_2, D_3$	
$D_1', D_2', D_3'$	



Document réponse 3