BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

ÉLECTROTECHNIQUE

SESSION 2009

ÉPREUVE E4.1

LE PONT DE COULÉE 65T DES FONDERIES DE
SAINT GOBAIN P.A.M



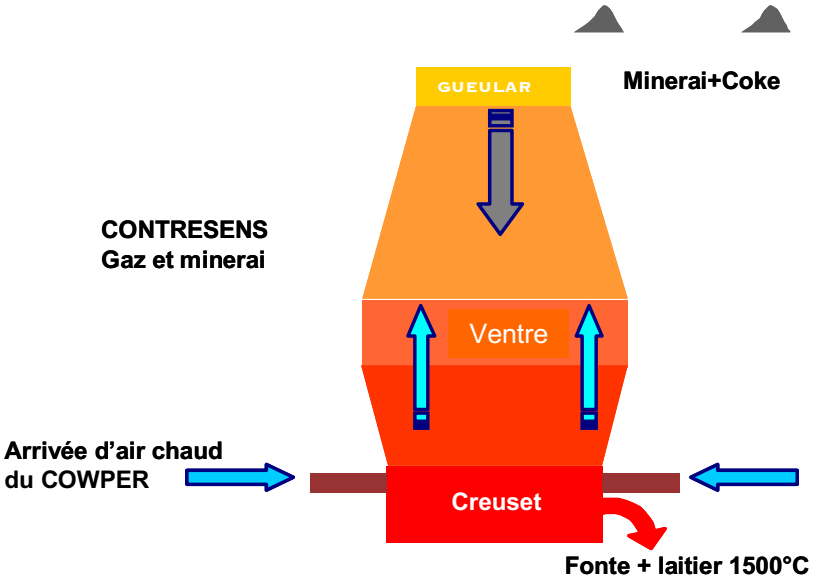
Étude d'un système technique industriel
Pré-étude et modélisation

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

L'usine Saint Gobain PAM fait partie de la branche « canalisation » du groupe Saint Gobain. Elle est spécialisée dans la fabrication de tuyaux et équipements de voirie en fonte ductile.

La fonte est élaborée dans des hauts fourneaux à partir de deux ingrédients principaux :

a. le coke qui sert de combustible et assure l'apport de carbone,
b. le minerai de fer.



Au nombre de trois, les hauts fourneaux HF1, HF2 et HF3 ont chacun une capacité de production de 80 tonnes de fonte grise.
L'usine fonctionne 24h/24 et produit 160 tonnes de fonte par heure.

Une fois la fonte liquide obtenue en sortie du haut fourneau, celle-ci subit différents traitements :

- une correction du taux de carbone, par ajout de ferraille,
- un décrassage, opération qui consiste à retirer le laitier (cendres et résidus de combustion) en suspension sur la fonte liquide,
- une désulfuration par adjonction de chaux,
- après un nouveau décrassage, le stockage dans un mélangeur, four basculant qui permet le maintien en température (environ 1450°C) de la fonte liquide avant expédition vers les zones de production.

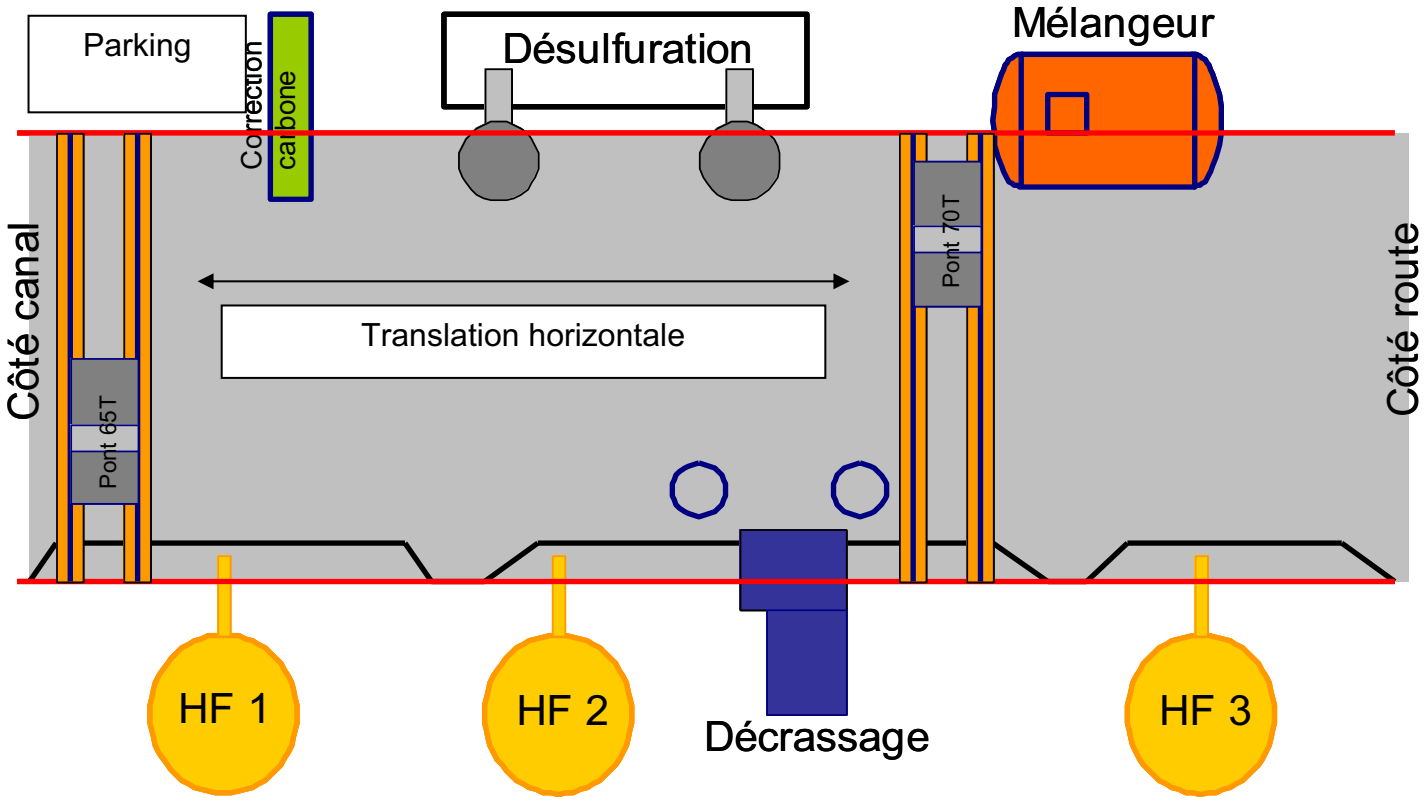
L'ensemble de ces opérations est assuré dans la halle de coulée. La manutention de la fonte liquide se fait dans des poches, à l'aide de deux ponts de coulée, d'une capacité de levage respective de 65T pour l'un et de 70 T pour l'autre.



Chaque poche pèse environ 60T, dont 40T de fonte.

L'étude portera sur le mouvement de translation horizontale du pont de coulée de 65T comme l'indique le plan ci-dessous.

Plan de la halle de coulée.



Enjeux de l'étude

Bien qu'obsolètes, les technologies employées sur le pont sont éprouvées et maîtrisées par le service de maintenance. Elles sont garantes d'une disponibilité maximale du pont de coulée. Cependant, pour pérenniser la production sur le site, il est primordial de moderniser cet outil en répondant à deux enjeux majeurs :

- **Limiter les dépenses énergétiques liées à l'utilisation du pont de coulée.**
- **Limiter les coûts de maintenance du pont de coulée, tant du point de vue mécanique qu'électrique.**

La problématique sera donc la suivante :

Remplacer les moteurs asynchrones à rotor bobiné existants par deux moteurs à cage.
Assurer les séquences de démarrage et de freinage des moteurs par un variateur de vitesse électronique.

Les contraintes :

La modernisation de la chaîne de conversion d'énergie ne doit en rien altérer les performances actuelles du pont de coulée.
La disponibilité du pont de coulée doit rester la préoccupation majeure de cette étude.

Chaque partie A1, A2, A3, B1, … est indépendante des autres. Cependant, certains renseignements utiles ne sont pas systématiquement répétés dans chaque partie.

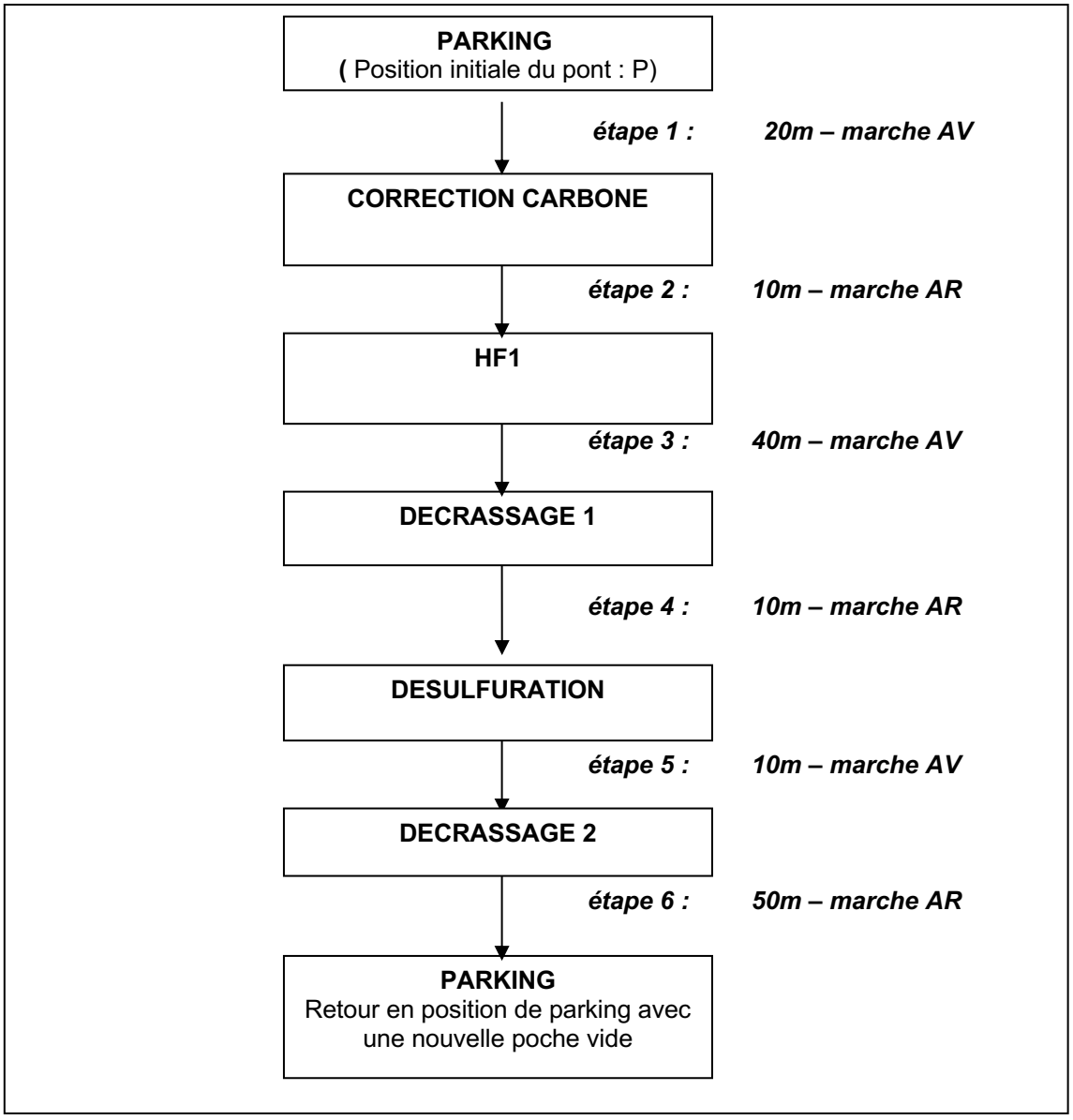
Étude de la solution actuelle

A. Étude de la chaîne cinématique : détermination des performances mécaniques nécessaires au déplacement du pont

Données :

- masse totale du pont roulant en charge : M_p =90 tonnes
- vitesse de translation du pont : V_p = 60m.min^{-1}

FIGURE 1 : Distances parcourues par le pont roulant dans la halle de coulée pour un cycle de production de fonte



A.1. Détermination de la durée d'un cycle de déplacement en translation

Pour évaluer la consommation énergétique du pont roulant de coulée lors des déplacements en translation horizontale, on se propose de calculer la durée totale d'un cycle de production de fonte.
On s'intéresse à l'étape 1 du mouvement du pont roulant ; le profil de vitesse est conforme au graphe ci-dessous.

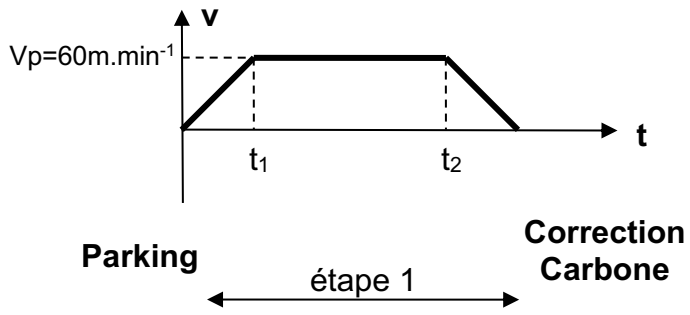


FIGURE 2 : Vitesse de translation du pont au cours du temps

Les phases d'accélération et de freinage ont des durées égales à 7 secondes dans la solution actuelle. La distance parcourue par le pont lors de chaque étape est précisée sur la figure1.

A.1.1. Calculer l'accélération a du pont, en $m.s^{-2}$, sur l'intervalle (0 ; t_1) sachant que la vitesse en régime établi est de 60 $m.min^{-1}$.
A.1.2. En déduire que la distance d_a parcourue par le pont pendant une phase d'accélération est de 3,5m.
A.1.3. Calculer la distance d_f parcourue lors du freinage.
A.1.4. En déduire la distance d_p parcourue à vitesse constante lors de l'étape 1.
A.1.5. Calculer la durée (t_2-t_1) de la phase à vitesse constante de l'étape 1.
A.1.6. On considère que les durées de démarrage et de freinage sont les mêmes pour chaque étape du cycle figure 1, en marche avant comme en marche arrière. Remplir le tableau du document réponse n°1 permettant de calculer la durée de chaque étape.
A.1.7. On ne tient pas compte des durées de travail pendant lesquelles le pont roulant ne se déplace pas en translation horizontale. Calculer la durée T d'un cycle complet de translation.

A.2. Performances en régime établi : puissance et couple des moteurs de translation

Le déplacement du pont roulant est assuré par deux moteurs (un pour chaque rail de guidage). On donne, figure 3, le schéma simplifié de la transmission associée à chacun des deux moteurs :

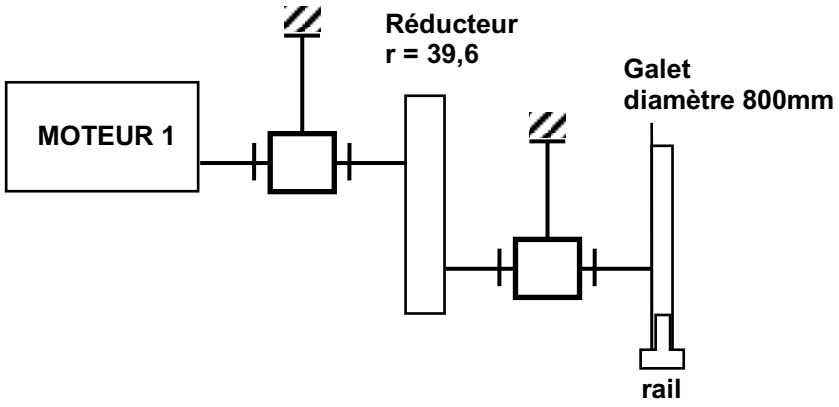


FIGURE 3 : schéma simplifié de la transmission associée à un moteur

A.2.1. La vitesse linéaire de déplacement du pont roulant est v_p = 60 m.min^{-1}. Calculer la vitesse angulaire Ω_G de rotation des galets en rad.s^{-1}, le diamètre des galets étant d_G = 800 mm.

A.2.2. Déterminer la vitesse angulaire Ω_M de rotation du moteur compte tenu du rapport de réduction r = Ω_M/Ω_G = 39,6 du réducteur.

A.2.3. L'effort nécessaire pour vaincre la résistance au roulement est donné par : F = e M_p g_P ; (e : résistance au roulement; g_P : accélération de la pesanteur; M_p en kg).
Calculer F en prenant e = 0,004 et g_p = 9,81 m.s^{-2}.

A.2.4. L'effort F étant équitablement réparti sur les deux moteurs, calculer le moment du couple T_G exercé sur un seul galet moteur.

A.2.5. En déduire la puissance de traction P_G nécessaire au niveau d'un galet moteur.

A.2.6. Le rendement de la transmission étant η = 94% , calculer la puissance de traction P_M nécessaire au niveau d'**un moteur**.

A 2.7. Quel est le moment du couple moteur T_M nécessaire à la traction ?

A.3. Performances dynamiques : couple de démarrage

Le moment d'inertie équivalent ramené sur l'arbre **d'un des moteurs** est J = 4,6 kg.m². La charge oppose à chaque moteur un couple résistant Tr = 19 Nm constant. La vitesse de rotation est de 945 tr.min^{-1} en régime établi.

A.3.1. Ecrire la relation fondamentale de la dynamique s'appliquant à l'arbre d'un des moteurs de translation.

A.3.2. Calculer le moment du couple de démarrage Td du moteur si la phase de démarrage a une durée de 7s.

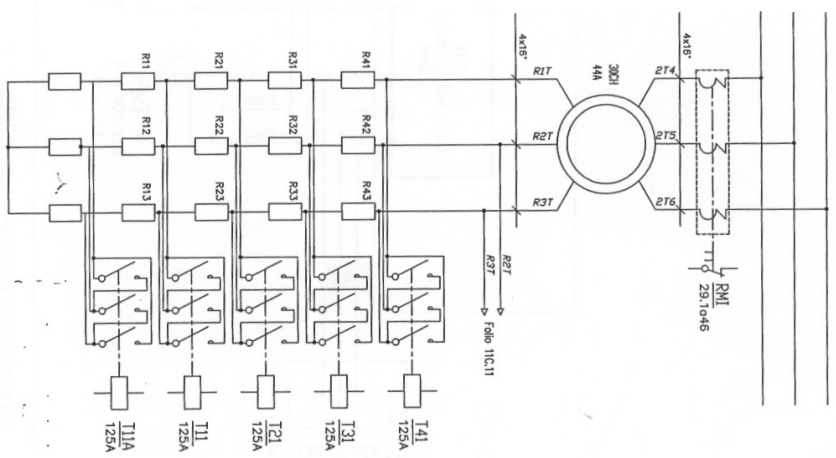
A.3.3. Lors de la modification du système actuel, on envisage de réduire de moitié les durées de démarrage. Que devient la valeur de Td si on décide de fixer la durée de démarrage à 3,5s ?

B. Étude énergétique de la solution actuelle

Les deux moteurs du mouvement de translation étudié sont à rotor bobiné. Des résistances sont insérées en série avec le rotor lors des phases de démarrage et de freinage de manière à limiter les couples (pour éviter le patinage des galets sur les rails) ainsi que les courants d'appel.

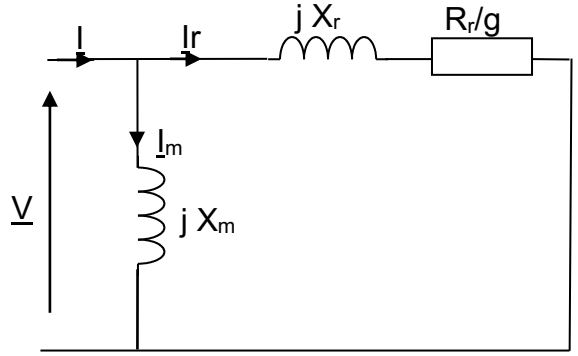
FIGURE 4 :

Schéma du démarreur rotorique associé à un moteur de translation horizontale



B.1. Démarrage et freinage du moteur

Le schéma suivant sera utilisé pour modéliser chaque phase du moteur asynchrone pour différents régimes de fonctionnement établi. Ce modèle est ramené du côté stator. La tension V a une valeur efficace V = 230V et une fréquence de 50 Hz. I est le courant de ligne.



On donne : X_m = 7,6 Ω à 50 Hz
X_r = 0,033Ω à 50 Hz.

La résistance R_r représente la résistance équivalente d'une phase rotorique, ramenée côté stator. Selon les phases de fonctionnement, R_r peut prendre différentes valeurs comme l'indique le tableau suivant :

Début de démarrage	Rr = 17Ω
Régime établi	Rr = 4 Ω
Début de freinage en contremarche	Rr = 17Ω

B.1.1. Calculer la pulsation de synchronisme Ωs en rad/s.

B.1.2. Exprimer la valeur efficace du courant Ir en fonction des éléments Rr,g Xr et V du schéma équivalent par phase.

B.1.3. Calculer les valeurs efficaces de Ir :

B.1.3.1. au démarrage (g=100%)

B.1.3.2. au moment où l'on débute le freinage en contremarche (g=200%).

B.1.4. Étude du couple :

B.1.4.1. Exprimer le moment du couple électromagnétique Tem du moteur en fonction de Rr, Ir g et Ωs.

B.1.4.2. Calculer les valeurs de Tem au démarrage et au freinage.

Pour éviter les problèmes de patinage des galets sur les rails, le moment du couple électromagnétique doit rester inférieur à 200 Nm. Pour que la durée de démarrage puisse passer à td = 3,5s, il est nécessaire de prendre Rr =10Ω au démarrage comme au freinage.

B.1.5. Calculer les moments des couples de démarrage et de freinage pour td = 3,5s.

B.1.6. Cette solution convient-elle ?

B.2. Étude des moteurs de translation en régime établi

On se propose de vérifier que le dimensionnement des moteurs de translation peut être revu à la baisse pour le régime établi. On souhaite également déterminer la puissance perdue par chaque moteur pour ce régime établi.

On négligera les pertes mécaniques et magnétiques ainsi que les pertes par effet Joule au stator. On s'intéresse à l'un des moteurs de translation horizontale du pont.

- Alimentation du moteur : 230V / 400V – 50 Hz ;
- Fréquence de rotation du moteur : 945 tr/min

B.2.1. Déterminer le nombre de pôles du moteur

B.2.2. Calculer le glissement nominal

B.2.3. La puissance utile nominale du moteur est de 22kW. Calculer le moment du couple utile nominal de ce moteur.

Les besoins en régime établi correspondent à un couple résistant Tr = 19 Nm.

B.2.4. Que peut-on en déduire quant au régime de fonctionnement du moteur ?

B.2.5. Calculer la puissance utile nécessaire pour le mouvement de translation du pont roulant en régime établi.

B.2.6. En déduire la puissance transmise au rotor P_{TR} si on néglige les pertes mécaniques.

B.2.7. Quelle est alors la puissance active Pa absorbée par le moteur ?

B.2.8. Calculer l'ensemble des pertes en régime établi.

B.2.9. A quoi correspondent ces pertes ?

B.3. Énergie consommée par une étape de fonctionnement du pont.

Dans un souci de simplification de l'étude, on considère que la masse totale du pont M_p reste égale à 90 tonnes durant l'ensemble du mouvement. Le glissement des 2 moteurs de translation en régime nominal établi est de 5,5%. On rappelle que le moment d'inertie du pont ramené à l'axe de l'un des moteur est J = 4,6 kg·m² et que la vitesse Vp de translation du pont est de 60m·min^{-1}.

B.3.1. Calculer l'énergie cinétique Wc du pont en déplacement à vitesse nominale.

B.3.2. L'énergie dissipée par effet Joule dans les résistances rotoriques peut se calculer lors des phases transitoires de démarrage et de freinage par la relation en valeur absolue :

$W = \left| J \Omega_s^2 \frac{(g_f^2 - g_i^2)}{2} \right|$ avec :

W : énergie en joules (1 moteur)
Ω_s : pulsation de synchronisme (rad/s)
g_f : glissement en fin de phase transitoire
g_i : glissement en début de phase transitoire

B.3.2.1. Quelle est la valeur du glissement au démarrage ?

B.3.2.2. Calculer l'énergie Wr dissipée par effet Joule dans les résistances rotoriques **d'un moteur** lors d'une phase transitoire de démarrage vers le régime de vitesse nominale ?

B.3.2.3. En vous aidant des résultats des questions B.3.1. et B.3.2.1., montrer que le réseau doit fournir au système une énergie Wd = 95 kJ au démarrage afin de compenser les pertes des moteurs et assurer la translation du pont.

B.3.2.4. Lors d'un freinage en contremarche, l'opérateur inverse deux phases de chaque moteur. La valeur du glissement au moment de la commutation devient g = 200%.

Quelle sera la valeur du glissement à l'arrêt complet du moteur ?

B.3.2.5. Quelle est l'énergie W_f dissipée dans les résistances rotoriques lors de la phase de freinage, jusqu'à l'arrêt complet, **pour les deux moteurs** ?

B.3.2.6. Cette énergie W_f provient de l'énergie cinétique du pont et de l'énergie de freinage W_{fr} que le réseau doit fournir en complément. Montrer que le réseau doit fournir au système une énergie W_{fr} = 105 kJ pour assurer le freinage en contremarche.

B.4. Bilan énergétique sur un cycle de fonctionnement

B.4.1. En utilisant le cycle complet de fonctionnement défini sur la figure 1, calculer l'énergie W_{dT} fournie par le réseau pour l'ensemble des phases de démarrage en considérant qu'elles sont toutes identiques.

B.4.2. De même, calculer l'énergie W_{frT} fournie par le réseau pour l'ensemble des phases de freinage en considérant qu'elles sont toutes identiques.

B.4.3. La durée totale des 6 phases en régime établi est de 98s et chaque moteur absorbe alors une puissance de 1990 W. Calculer l'énergie W_{et} que le réseau doit fournir pour l'ensemble des phases de fonctionnement en régime établi.

B.4.4 Calculer l'énergie totale W_{tot} que doit fournir le réseau pour assurer le fonctionnement en translation du pont sur un cycle complet défini figure 1.

B.4.5. Quelles sont les phases de fonctionnement les plus consommatrices d'énergie ?

C. Étude de la solution proposée

Pour améliorer le fonctionnement du pont roulant, la motorisation existante sera remplacée par un moteur asynchrone à cage, piloté par un variateur de vitesse électronique. Ainsi, les séquences de démarrage et de freinage par insertion de résistances, fortement consommatrices d'énergie, seront supprimées. Les phases transitoires sont à présent gérées par le variateur de vitesse. Cela améliore la souplesse de conduite du pont par l'opérateur, évite les à-coups et le patinage des galets sur les rails.

C.1. Puissances de freinage et de démarrage :

On considère une étape de fonctionnement du pont roulant. La charge impose un couple résistant de moment Tr = 19 Nm en régime établi.

Les profils de vitesse et de couple pour un moteur de translation horizontale sont donnés sur le document réponse 2.

C.1.1. Tracer en concordance des temps le graphe donnant la puissance mécanique Pm de la machine asynchrone sur le document réponse 2.

C.1.2. En déduire :

C.1.2.1. la puissance maximale de freinage P_{frmax}

C.1.2.2. la puissance moyenne de freinage P_{frmoy} calculée sur la durée t_f du freinage.

C.1.3. Sachant que le rendement η_d est de 60% sur la phase de démarrage, montrer que la puissance moyenne Pd **consommée par un moteur** est de 12,5 kW sur cette phase.

C.1.4. Compte tenu des profils de vitesse et de couple sur le document réponse 2, quel est le comportement de la machine asynchrone (moteur : M ou génératrice : G) lors des trois phases ? on répondra directement sur le **document réponse 2**.

C.2. Constitution du variateur de vitesse - Réversibilité.

On donne sur le document réponse 1 un schéma de la constitution interne du variateur électronique de vitesse. Celui-ci est alimenté par le réseau 230V/400V – 50 Hz triphasé.

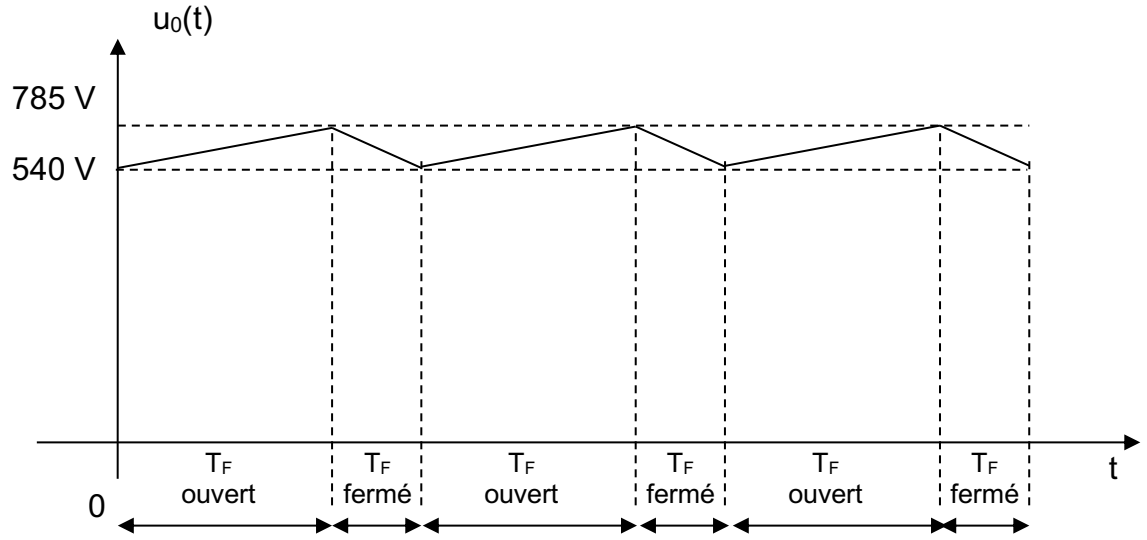
C.2.1 Indiquer sur le document réponse 1, les différentes fonctions représentées dans la structure du variateur de vitesse pour les éléments 1,2,3 et 4.

C.2.2. Lors d'une phase de freinage, l'énergie cinétique des machines est convertie en énergie électrique.

C.2.2.1. Pourquoi ne peut-on pas envisager une récupération **par le réseau** de cette énergie avec la structure proposée ?

C.2.2.2. On rappelle que l'énergie emmagasinée par le condensateur peut s'écrire : $\mathbf{W = ½\ C\ U_0^2}$.

Le transistor T_F est commandé par la tension aux bornes du condensateur comme l'indique le schéma simplifié suivant :



Justifier que la tension $u_0(t)$ augmente lorsque le transistor T_F est bloqué (interrupteur ouvert).

C.2.2.3. De même, pourquoi la tension $u_0(t)$ diminue-t-elle lorsque T_F est passant (interrupteur fermé) ?

C.2.2.4. La tension U_0 est limitée à 785V. Calculer l'énergie W_{cond} que doit libérer le condensateur pour retrouver sa tension initiale, si sa capacité est C = 2000 μF

C.2.2.5. Combien de cycles de charge-décharge devra subir le condensateur pour dissiper une énergie de 45kJ en une durée de 3,5 s ?

C.2.2.6. En déduire la fréquence f_H de fonctionnement du transistor T_F puis la période T_H correspondante.

C.2.2.7. Calculer finalement la puissance moyenne que la résistance R_F devra dissiper.

C.2.3. Quelles sont les phases où le réseau doit fournir de la puissance active aux machines ? (démarrage, régime établi, freinage)

C.3. Consommation énergétique

C.3.1. Dans cette solution avec variateur de vitesse :

L'énergie fournie par le réseau aux moteurs, lors des phases de démarrage, a pour valeur W_d = 525 kJ.

L'énergie fournie lors des phases à vitesse constante vaut W_{et} = 438 kJ.

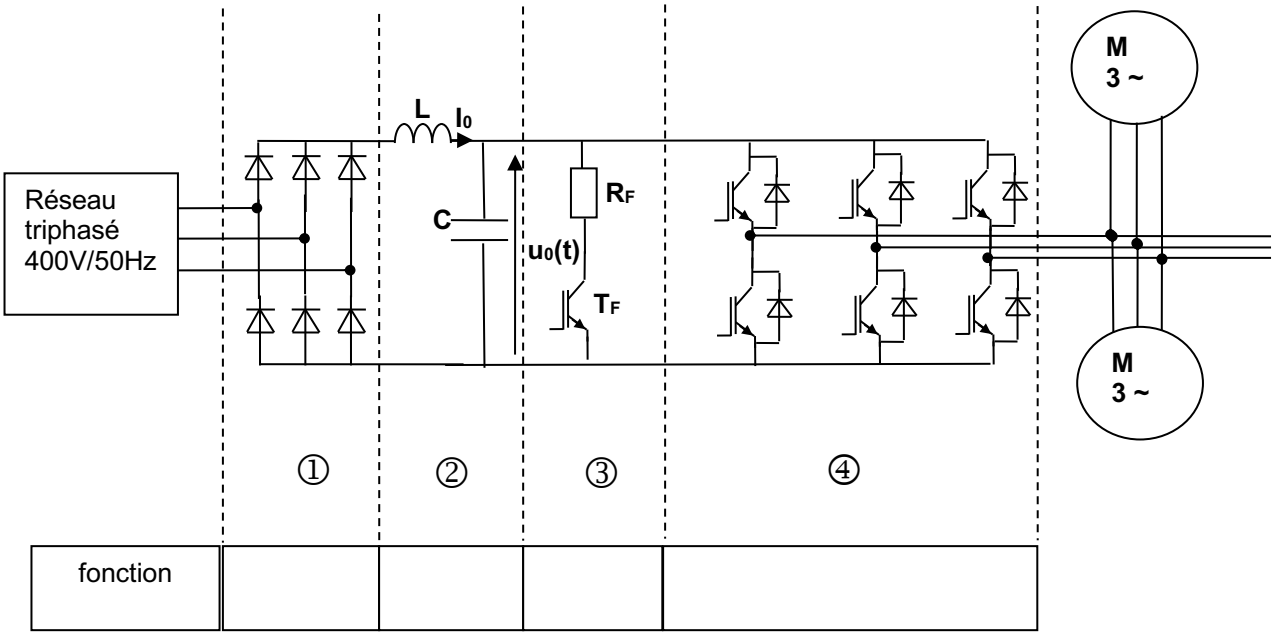
L'énergie fournie est nulle lors des freinages.

Calculer l'énergie totale fournie sur un cycle avec cette solution.

C.3.2. À l'aide des questions B.4.4. et C.3.1., comparer les deux solutions du point de vue énergétique en mettant en évidence les phases de fonctionnement où une réelle économie est réalisée.

DOCUMENT RÉPONSE 1
(à rendre avec la copie)

ETAPE	durée accélération + freinage	Distance parcourue à vitesse constante	Durée de la phase à vitesse constante	durée totale de l'étape
1	7s+7s=14s			
2	14s			
3	14s			
4	14s			
5	14s			
6	14s			



DOCUMENT RÉPONSE 2
(à rendre avec la copie)

Les proportions ne sont pas scrupuleusement respectées

