BREVET DE TECHNICIEN SUPERIEUR

ELECTROTECHNIQUE

SESSION 2012

EPREUVE E.4.1.

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

Durée 4 heures – Coefficient 3

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

Le sujet comporte 18 pages.
Le document réponse (page 18) est à remettre avec la copie.

- Il sera tenu compte de la qualité de la rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le (la) correcteur (trice) attend des phrases construites respectant la syntaxe de la langue française. Chaque réponse sera clairement précédée du numéro de la question à laquelle elle se rapporte.

- Les notations du texte seront scrupuleusement respectées.

Augmentation de la productivité dans une sucrerie









Matière première ***Site de production*** ***Produit fini***

Présentation générale

La sucrerie de Pithiviers-Le-Vieil qui fait partie du Groupe VERMANDOISE est l'une des plus anciennes sucreries françaises. Sa production n'a jamais cessé d'augmenter pour atteindre aujourd'hui 125 000 tonnes de sucre par an.

La sucrerie extrait le sucre des betteraves produites localement. Une fois le produit fini, sous forme de sucre blanc cristallisé, celui-ci est stocké sur place en vrac puis commercialisé et expédié à l'industrie agroalimentaire.

Campagne de production

L'activité de production de la sucrerie est très saisonnière. Elle commence dès la récolte des betteraves (octobre) et ne dure en moyenne que 70 jours en traitant environ 10 000 tonnes de betteraves par jour.

Face à une progression constante des volumes à traiter, l'objectif de la sucrerie est de passer à 12 000 tonnes de betteraves par jour.

Cette activité très ponctuelle, liée à la durée de conservation de la matière première, nécessite un fonctionnement continu 24h / 24h et un objectif « zéro panne » pendant cette période.

Processus d'extraction du sucre

Après réception des betteraves, il faut les nettoyer et les couper pour en extraire le jus. Il faut ensuite réduire le jus par évaporation afin de le concentrer pour qu'il cristallise. Les cristaux de sucre seront enfin séchés par centrifugation.

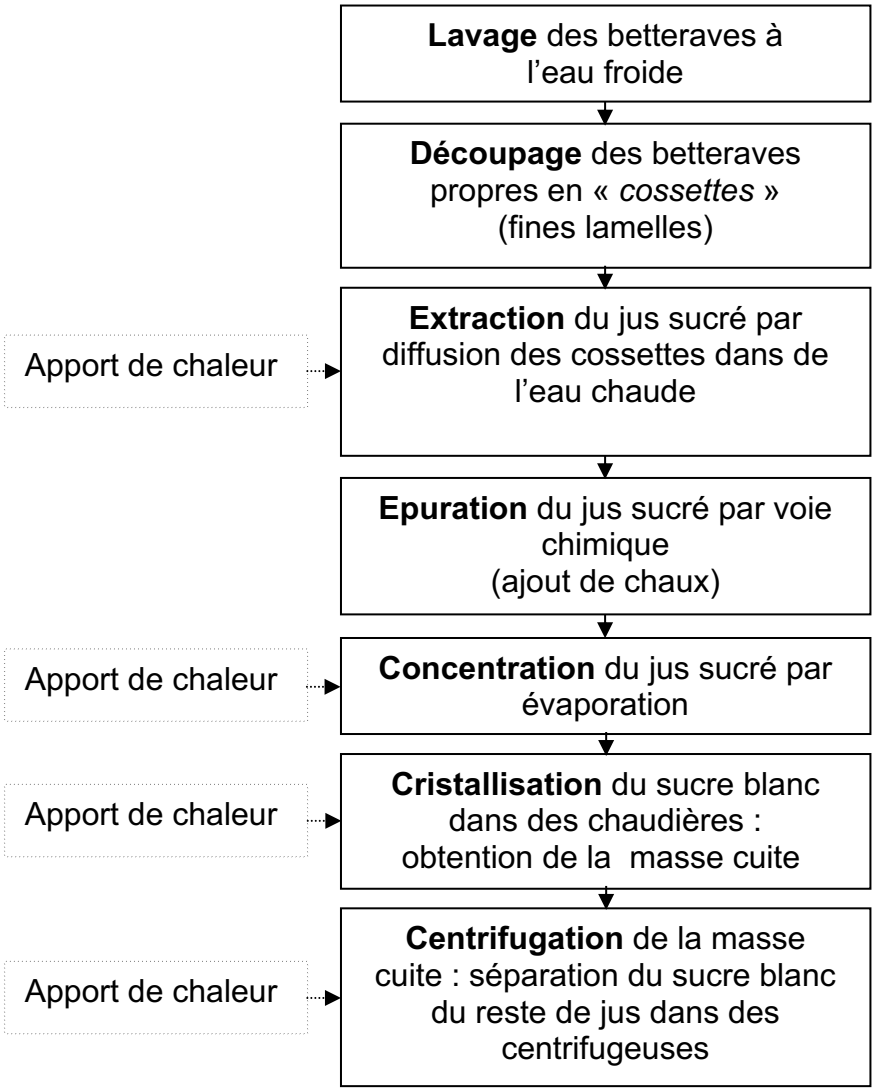


Figure 1

La **Figure 1** résume les différentes étapes de la production qui, pour plusieurs d'entre elles nécessitent un important apport de chaleur.

Cogénération

La sucrerie profite de son installation de production de vapeur d'eau nécessaire au processus de fabrication, pour produire également sa propre énergie électrique. Cette double utilisation de la vapeur d'eau s'appelle *« cogénération »* et permet de produire 90% de l'électricité du site. Le reste est acheté à un fournisseur d'électricité local.

D'un point de vue économique, cela permet de limiter abonnement et facture énergétique.

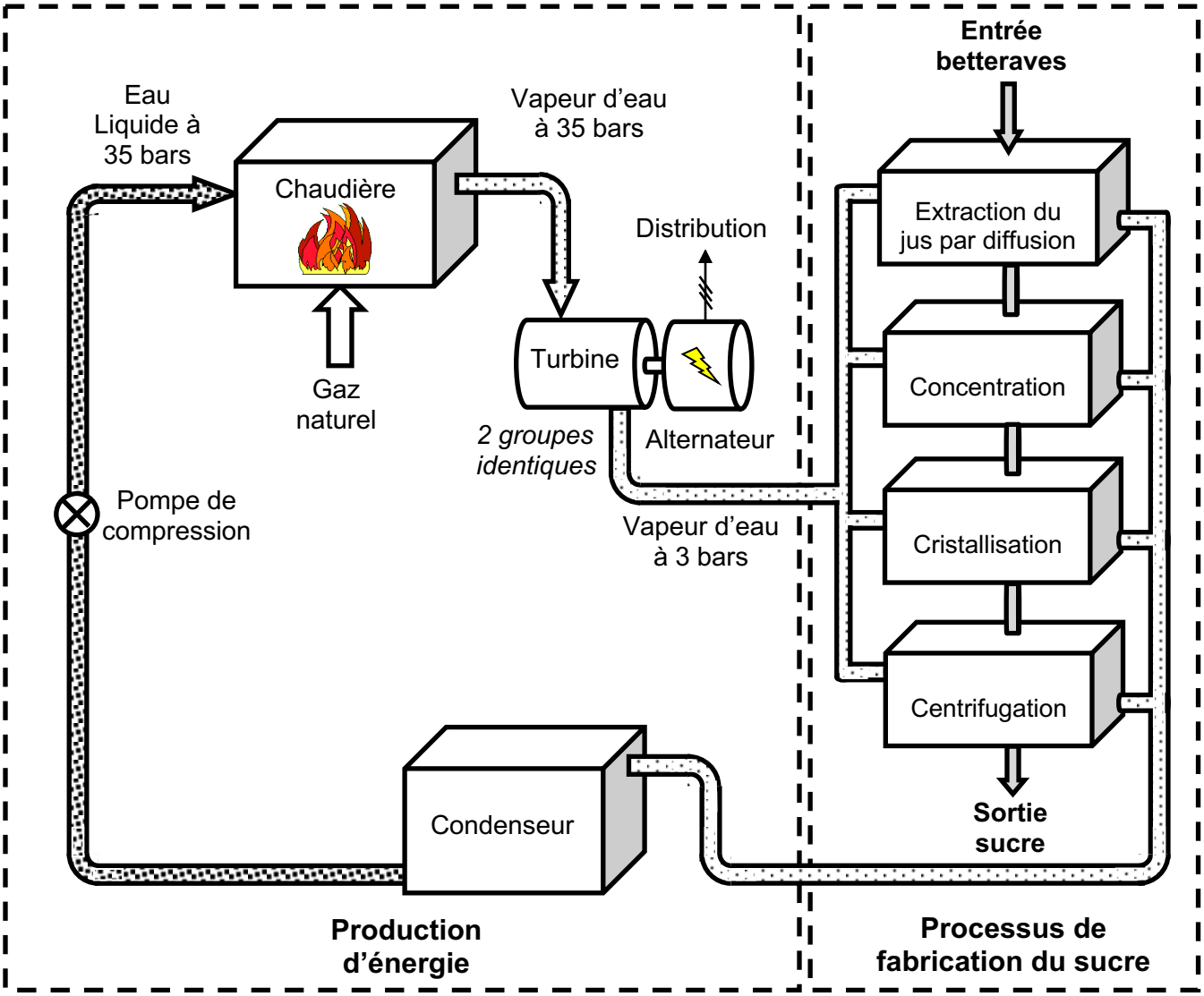


Figure 2

Une chaudière alimentée en eau (**Figure 2**) permet de générer de la vapeur d'eau avec une pression de 35 bars à partir de la combustion de gaz naturel.

Cette vapeur entraine deux groupes turbo-alternateurs identiques (turbines + alternateurs) qui assure la production d'énergie électrique.

En sortie de turbine, la vapeur détendue à 3 bars est distribuée pour alimenter le processus de production.

Il est ainsi possible de répondre au double défi de l'entreprise en matière d'énergie :

- assurer l'essentiel de la production d'énergie électrique nécessaire à l'alimentation du parc des moteurs installés à toutes les étapes de la production ;
- assurer l'apport de chaleur (énergie thermique) pour le processus de fabrication du sucre grâce à l'utilisation de la vapeur d'eau récupérée en sortie de turbine.

Centrifugation
Pour produire du sucre cristallisé, il faut extraire les cristaux d'un sirop concentré (appelé « *masse cuite* ») par centrifugation. La masse cuite est placée dans un malaxeur tampon qui la distribue ensuite dans six centrifugeuses. Un décalage du fonctionnement entre chacune d'elles assure un flux de production constant.

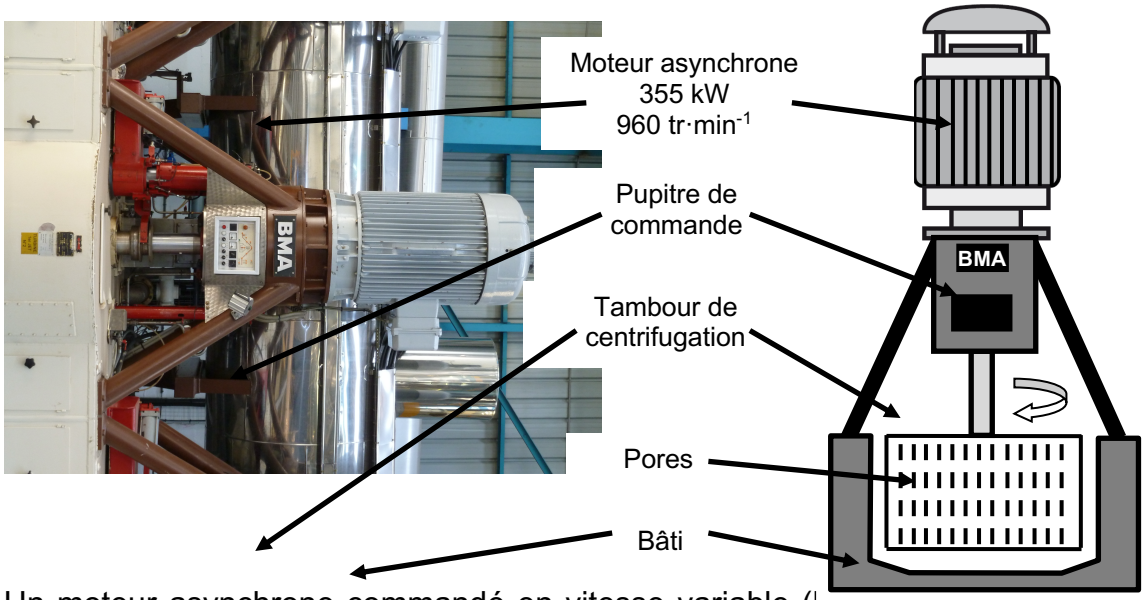


Figure 3

Un moteur asynchrone commandé en vitesse variable (**Figure 3**) permet de mettre en rotation le tambour de centrifugation. Le sucre cristallisé reste alors dans le tambour, tandis que le jus s'échappe par les pores.

Enjeu
La quantité de betteraves traitée est en progression constante. Afin de ne pas augmenter la durée de la campagne pour des raisons économiques, il y a nécessité d'augmenter la productivité de l'usine.

Or, celle-ci est limitée par la dernière phase de fabrication : la centrifugation.

Actuellement, l'entrainement de la centrifugeuse est réalisé par un ensemble moteur-variateur de technologie ancienne, dont la maintenance devient difficile à assurer.

L'enjeu pour l'entreprise est donc d'augmenter la productivité afin de passer de 10 000 à 12 000 tonnes de betteraves traitées par jour tout en maintenant une parfaite continuité de service.

Problématiques
Dans la première partie de cette épreuve, on vérifiera si la chaudière permet d'assurer l'autonomie électrique de la sucrerie durant la production et on verra comment l'entreprise assure la maintenance préventive des turboalternateurs.
Dans la deuxième partie, on déterminera les paramètres permettant l'augmentation de la productivité.

A : Cogénération de l'énergie électrique

***Problématique** : vérifier si l'autonomie électrique est assurée par la cogénération pendant la période de production.*

La chaudière à gaz naturel est dimensionnée afin de répondre aux besoins du processus de production, essentiellement la concentration et la cristallisation. L'énergie électrique nécessaire est produite à partir de la vapeur d'eau générée par la chaudière.

La vapeur est produite sous une pression de 35 bars, détendue ensuite dans les turbo-alternateurs et disponible ensuite sous une pression de 3 bars pour la production.

Les parties A1, A2 et A3 sont indépendantes.

A.1. Débit en vapeur de la chaudière

La distribution de la vapeur fonctionne en circuit fermé. Après utilisation, celle-ci est recondensée et ramenée à l'entrée de la chaudière à une température de 100 °C. Une pompe permet de la comprimer sous une pression de 35 bars. On va calculer ici le débit massique de vapeur nécessaire à la production.

L'obtention de la vapeur s'obtient alors en 3 temps :

a. ***Chauffage de l'eau liquide sous 35 bars** de 100 °C à 240 °C*
b. *Transformation de l'eau liquide en vapeur à 240°C : **ébullition sous une pression de 35 bars**.*
c. ***Chauffage de la vapeur d'eau sous 35 bars** jusqu'à 410 °C.*

On rappelle que l'énergie thermique nécessaire pour élever la température de ΔT d'une masse M d'un fluide (gaz ou liquide) se calcule avec la relation : $W_{th} = M.C.\Delta T$ où C désigne la capacité thermique massique du fluide.

On donne :

capacité thermique massique de l'eau	C_{Liq} = 4 320 J·kg^{-1}·°C^{-1}
capacité thermique massique de la vapeur d'eau	C_{Vap} = 2 090 J·kg^{-1}·°C^{-1}

A.1.1. **Energie thermique nécessaire pour la production de 1 kg de vapeur**

A.1.1.1. ***Chauffage de l'eau liquide sous 35 bars***

Calculer l'énergie thermique W_{ath} nécessaire pour chauffer 1kg d'eau liquide de 100 °C à 240 °C.

A.1.1.2. ***Chauffage de la vapeur d'eau sous 35 bars**.*

Calculer l'énergie thermique W_{cth} nécessaire pour chauffer 1 kg de vapeur d'eau de 240 °C à 410 °C.

A.1.1.3. *L'énergie thermique nécessaire pour faire passer 1 kg d'eau liquide à l'état vapeur à 240 °C est de 1 740 kJ. (attention à l'unité)*

Déduire des questions précédentes l'énergie thermique totale, W_{Tth} nécessaire à la production de 1 kg de vapeur à 410 °C à partir d'eau liquide à 100 °C.

A.1.2. **Débit massique de la chaudière en vapeur**

L'entreprise annonce une consommation moyenne journalière de gaz naturel de 170 000 m^3 dont le pouvoir calorifique est de 11,54 $kW{\cdot}h{\cdot}m^{-3}$.

A.1.2.1. Calculer en kW·h l'énergie thermique journalière libérée par la combustion du gaz.

A.1.2.2. Calculer la puissance thermique disponible en W sachant que la production est assurée 24h / 24h.

A.1.2.3. Donner en $kg{\cdot}s^{-1}$ le débit massique de production de vapeur d'eau de la chaudière en prenant un rendement de 75 % et sachant que l'énergie thermique nécessaire pour produire 1 kg de vapeur est de 2700 kJ.

A.2. Production d'énergie électrique

L'énergie électrique produite résulte de la transformation de l'énergie mécanique libérée sur l'arbre des turbines des alternateurs lors de la détente de la vapeur dans ces turbines.

Cette vapeur est admise à une pression de 35 bars et tombe à 3 bars en sortie.

Compte tenu de cette variation de pression, l'énergie récupérée est de 350 kJ par kg de vapeur détendue.

On souhaite vérifier si les besoins de la production sont couverts par les turbo-alternateurs.

A.2.1. Calculer la puissance mécanique disponible en prenant un débit massique de vapeur d'eau de 22,7 $kg{\cdot}s^{-1}$.

A.2.2. Calculer la puissance électrique disponible en prenant un rendement des turbo-alternateurs de 92 %

Afin de maitriser au mieux sa consommation énergétique, l'entreprise en tient un relevé journalier. En voici un extrait pour une journée type de la dernière campagne de production :

Energie électrique consommée en MW·h	Durée de fonctionnement en h
174	24

A.2.3. Calculer la puissance électrique active moyenne consommée en kW : P_{cons}

A.2.4. L'objectif d'autonomie énergétique électrique est-il atteint ?

Dans le cadre de l'augmentation de la productivité, l'entreprise prévoit à court terme la récupération des pertes thermiques. Ceci permettra de conserver la chaudière actuelle.

A.3. Maintenance des alternateurs

La production d'énergie électrique est assurée par 2 turbo-alternateurs triphasés identiques. Afin de tenir l'objectif « zéro panne » pendant la période de production, ils sont régulièrement contrôlés par une société extérieure à l'entreprise.

Les essais sont réalisés dans les locaux de cette société. L'alternateur est entièrement démonté afin de vérifier l'état des pièces d'usure, l'isolement des circuits induit et inducteur. Après remontage, les essais classiques : essai à vide et essai en court circuit sont réalisés sur un banc spécifique. Pour cela, un moteur est accouplé à l'alternateur en test et permet l'entraînement jusqu'à la vitesse de synchronisme. La puissance électrique absorbée par ce moteur (parfaitement connu de la société de maintenance) permet de remonter aux différentes pertes de l'alternateur.

On se propose de prédéterminer le rendement d'un alternateur à partir de ces essais.

A.3.1. **Analyse de la plaque signalétique d'un alternateur**

CONVERTEAM
THE POWER CONVERSION COMPANY
MOTORS SA

RAPPORT D'ESSAI / *TESTING REPORT*
MOTEUR SYNCHRONE / *SYNCHRONOUS MOTOR*

Certif. Body 1 Ref. : NA
Certif. Body 2 Ref. : NA
CONVERTEAM FNQXR 22135
Page 0 / 2

PROJET / Project	:	PITHIVIERS	No Cmde / Order no.	:	07D885
Client / Customer	:	SUCRERIE DE PITHIVIERS	N°Moteur/ Serial n°	:	001
Type / Type	:	MSHD 800 L4C			
ELECTRICAL DATA					
Nb of Stators	:	1	Couplage / Coupling	:	ETOILE /
Puissance / Power	:	1 x 5 000 Kva			/
Tension / Voltage	:	1 x 5 500 V	Phase angle/stators	:	0
Courant / Current	:	1 x 525 A	Service Factor	:	S1
Vitesse / Speed	:	1500 rpm	Cl. Echauffement Stator	:	115(S)° K
Couple / Torque	:	31.8 kN.m	Cl. Echauffement Rotor	:	NA K
Rendement / Efficiency	:	0.954			
Cos Phi	:	0.8	Cooler water temp.	:	25 °C
Freq.	:	50 Hz			

rpm : rotation per minute soit tours par minute

Plaque signalétique d'un alternateur

A.3.1.1. La vitesse de rotation des turbines est de 9 000 tr·min^{-1}. Justifier la nécessité d'installer un réducteur de vitesse en sortie de turbine et calculer son rapport de réduction défini par $r = \frac{n_{alternateur}}{n_{turbine}}$.

A.3.1.2. Calculer le nombre total de pôles d'un alternateur.

A.3.1.3. Calculer la valeur du courant nominal de l'induit à partir de la puissance apparente nominale et vérifier la cohérence de la plaque signalétique.

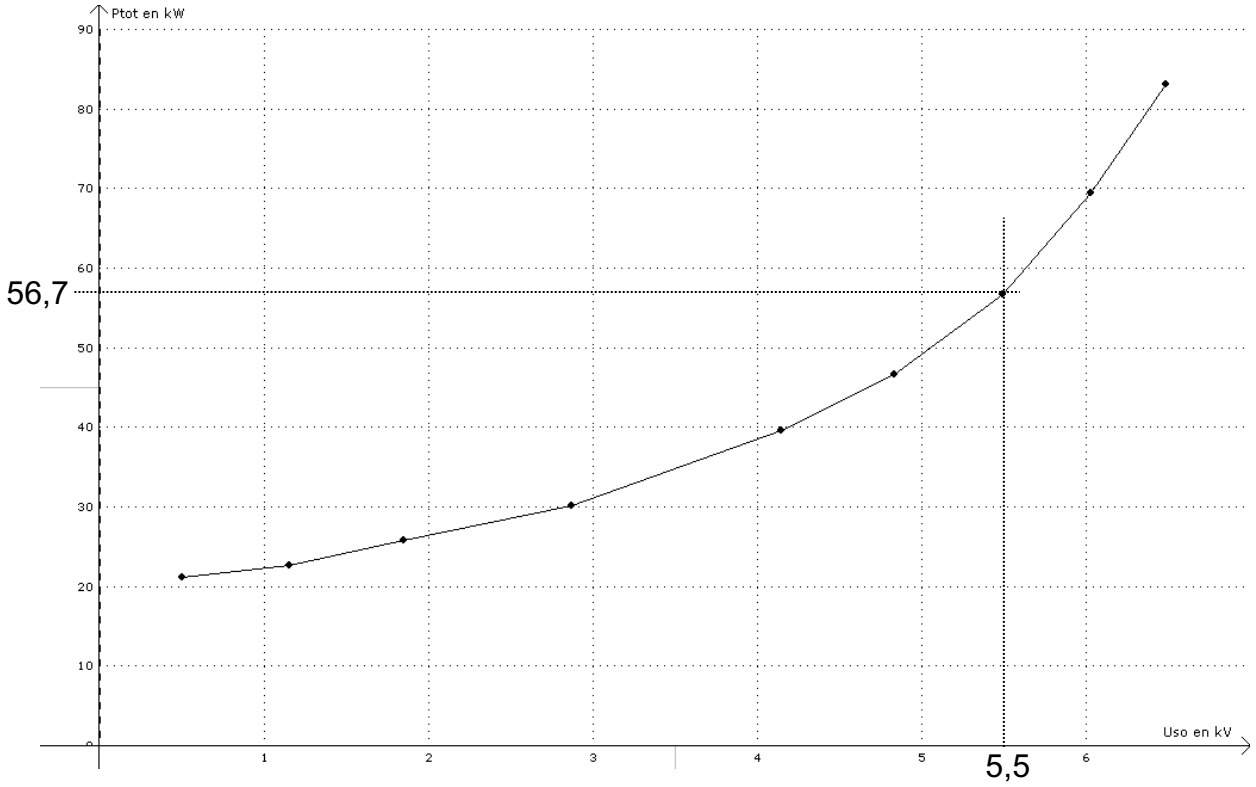
A.3.2. **Prédétermination du rendement d'un alternateur**

La société de maintenance procède à la mesure des résistances des bobinages statoriques (entre phases) et du bobinage rotorique à la température ambiante. Elle les corrige ensuite pour la température de fonctionnement (75°C). Les résultats sont les suivants :

R_{ph_stator} *= 93,2 mΩ*

R_{rotor} *= 245,5 mΩ*

Lors de l'essai à vide à la vitesse de synchronisme, on mesure les pertes totales de l'alternateur pour différentes valeurs de la tension à vide :



On procède de même pour l'essai en court-circuit à la vitesse de synchronisme et on mesure des pertes fer dites « supplémentaires » créées par le courant statorique. Elles valent 25,9 kW pour un courant statorique de 525 A.

On souhaite prédéterminer le rendement de l'alternateur pour son point de fonctionnement nominal avec une charge alternative triphasée sinusoïdale dont le facteur de puissance est de 0.8.

A.3.2.1. Calculer la puissance électrique active fournie.

A.3.2.2. A partir de la courbe donnant les pertes totales en fonction de la tension à vide, justifier que l'on peut estimer les pertes mécaniques : $p_{méc}$ à 20 kW.

A.3.2.3. Donner alors la valeur des pertes fer pour la tension nominale à vide : p_{fer}

A.3.2.4. Calculer les pertes Joule statoriques : p_{Js}

A.3.2.5. *La modélisation de l'alternateur (non traitée ici) permet d'estimer le courant continu rotorique à 276,5 A pour le point de fonctionnement choisi.*

Calculer les pertes Joule rotoriques : p_{Jr}

A.3.2.6. En déduire alors la somme de toutes les pertes, y compris supplémentaires.

A.3.2.7. Calculer le rendement de l'alternateur. Comparer avec la valeur donnée sur la **Plaque signalétique d'un alternateur**.

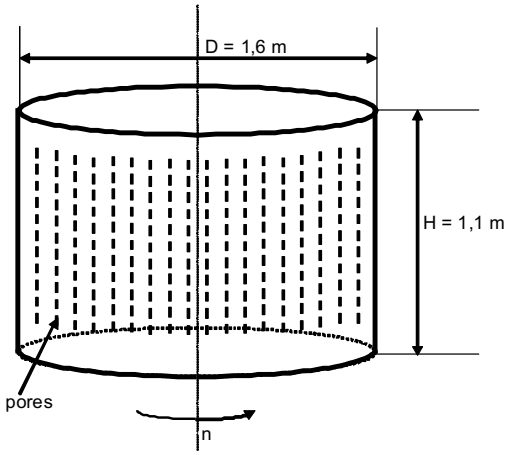
B. Augmentation de la productivité

Problématique :
La sucrerie veut augmenter sa production de 10 000 à 12 000 tonnes par jour sans modification majeure de structure. Or, c'est la dernière étape de production, la ***centrifugation de la masse cuite*** *qui limite la productivité.*
On va déterminer dans cette partie les paramètres sur lesquels on peut agir afin de répondre au cahier des charges et proposer une solution technique conservant la structure mécanique des centrifugeuses.

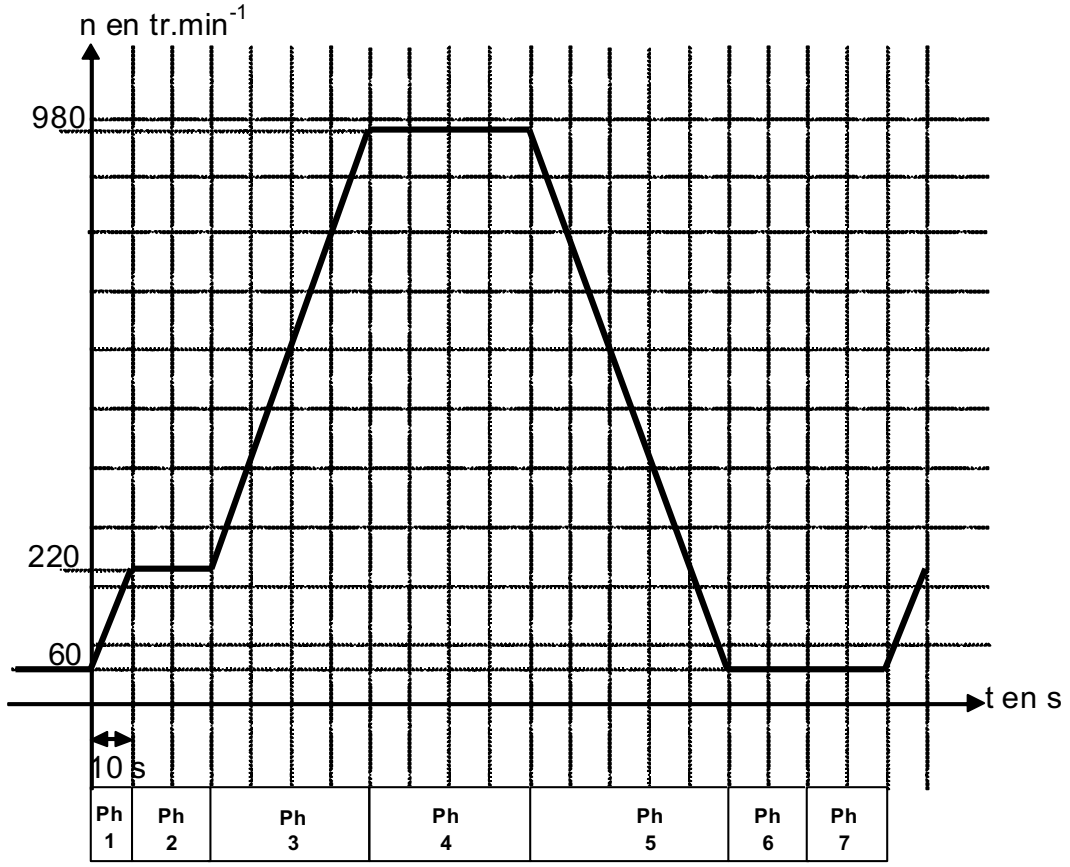
Les parties B1, B2, B3, B4 et B5 sont indépendantes.

B.1. Analyse du cycle de centrifugation existant

La centrifugeuse permet d'assécher le sucre cristallisé de la « masse cuite » en en éliminant le reste de jus non cristallisé.



La figure ci-dessus représente la modélisation du tambour de centrifugation cylindrique de hauteur H = 1,1 m et de diamètre D = 1,6 m dans lequel la masse cuite est introduite par la partie supérieure. Ce tambour est en acier inoxydable et est percé de pores qui permettent l'écoulement du jus lors de sa mise en rotation. Sa masse est M_{tam} *= 1 250 kg.*



Cycle de centrifugation actuel

Le schéma ci-dessus représente le cycle de fonctionnement actuel d'une phase de centrifugation.

On notera que la vitesse de rotation du tambour est de ***60 tr·min^{-1}*** *lorsqu'il est vide.*

Phase 1 *: accélération constante « tambour vide » pour atteindre* ***220 tr·min^{-1}*** *; durée 10 s.*

Phase 2 *: chargement de la masse cuite à* ***220 tr·min^{-1}*** *par la partie supérieure du tambour à vitesse constante (ce qui permet de bien répartir la masse) ; durée 20 s.*

Phase 3 *: accélération constante « tambour plein » pour atteindre* ***980 tr·min^{-1}*** *; durée 40 s.*

Phase 4 *: c'est la centrifugation proprement dite à vitesse constante ; durée 40 s.*
C'est la phase essentielle ; trop courte : le sucre ne serait pas suffisamment séché, trop longue : le sucre se prendrait en masse.

Phase 5 *: décélération constante pour atteindre* ***60 tr·min^{-1}*** *; durée 50 s.*

Phase 6 *: déchargement du sucre blanc cristallisé par la partie inférieure du tambour à vitesse constante ; durée 20 s.*

Phase 7 *: Phase inactive permettant de lancer un cycle pour l'une des autres centrifugeuses ; durée 20 s.*

B.1.1. Calculer la durée d'un cycle complet.

B.1.2. Donner le nombre de cycles par heure de fonctionnement.

B.2. Prise en compte de l'augmentation de la productivité

Afin de porter la capacité de production de 10 000 à 12 000 tonnes, la sucrerie doit augmenter le nombre de cycles de fonctionnement de la centrifugeuse qui est actuellement de 18.

B.2.1. Calculer le nombre minimum de cycles par heure de fonctionnement permettant de passer la production de 10 000 à 12 000 tonnes par heure.

B.2.2. *Le choix de l'entreprise se porte sur 22.5 cycles par heure afin d'avoir un peu de souplesse de fonctionnement.*
Donner la nouvelle durée d'un cycle de fonctionnement.

B.3. Construction du nouveau cycle de centrifugation

L'entreprise exclut toute modification des éléments de structure suivants :

- *Amenée de la masse cuite*
- *Evacuation du sucre cristallisé*
- *Taille du tambour de la centrifugeuse*

B.3.1. Justifier dans ces conditions que la durée des phases 2, 4 et 6 ne peut être modifiée.

On choisit de diminuer les phases d'accélération ou de décélération de la façon suivante :
***Phase 1** : durée 5 s.*
***Phase 3** : durée 30 s.*
***Phase 5** : durée 30 s.*
La ***Phase 7***, inactive est également raccourcie *à une durée de 15 s.*

B.3.2. Calculer la durée du nouveau cycle de centrifugation.
B.3.3. Cette durée permet-elle de répondre à l'augmentation de productivité ?

B.4. Contraintes dues au nouveau cycle de centrifugation

*Le **document en annexe page 17** représente le cycle actuel de centrifugation et le profil de couple que développe la motorisation actuelle.*
*Le **document réponse page 18** représente dans sa partie haute le nouveau cycle de centrifugation. On se propose dans cette partie de construire le profil de couple imposé par ce nouveau cycle.*

B.4.1. Phase 2, 4 et 6
Rien n'étant modifié sur ces phases, reporter la valeur du couple à partir de l'annexe.

Pour les questions suivantes, on rappelle que le couple accélérateur C_{acc} d'un système en rotation est donné par la relation : $C_{acc} = J.\frac{d\Omega}{dt}$ *avec J : moment d'inertie autour de l'arbre de rotation et Ω : vitesse angulaire de rotation.*

B.4.2. Formuler le principe fondamental de la dynamique pour les systèmes en rotation. On désignera par C_{mot} le couple imposé par la motorisation et par $C_{rés}$ le couple résistant opposé par la charge.

B.4.3. Donner l'expression de C_{mot} en fonction de C_{acc} et de $C_{rés}$.

B.4.4. **Phase 1**

Le moment d'inertie du tambour J_{tam} est donné par la relation $J_{tam} = M_{tam}.R_{tam}^2$ *avec*

M_{tam} : masse du tambour et R_{tam} : rayon du tambour

B.4.4.1. Calculer J_{tam} en donnant explicitement son unité légale.

B.4.4.2. Calculer $\frac{d\Omega}{dt}$ sur la phase 1 et en déduire C_{acc1}, couple accélérateur sur la phase 1.

B.4.4.3. En déduire alors que le couple mécanique pendant cette phase est proche de 3020 N·m.

B.4.5. **Phase 2**

On introduit 1 750 kg de « masse cuite » de masse volumique ρ_{mc} = 1 450 kg·m^{-3} dans le tambour. Compte tenu de la rotation, cette masse va se « coller » sur la périphérie du tambour modifiant ainsi le moment d'inertie du tambour. Sa valeur devient J'_{tam} = 1 530 USI (USI signifie unité légale) en fin de remplissage.

En supposant que la vitesse de rotation est maintenue constante sur cette phase, justifier que le couple accélérateur C_{acc2} est nul sur cette phase 2.

B.4.6. **Phase 3**

On prendra la même valeur du moment d'inertie (1530 USI) car la phase de centrifugation n'a pas commencée.

B.4.6.1. Calculer $\frac{d\Omega}{dt}$ sur la phase 3 et en déduire C_{acc3}, couple accélérateur sur la phase 3.

B.4.6.2. En déduire alors que le couple mécanique pendant cette phase est proche de 4400 N·m.

B.4.7. **Phase 5**

A la fin de la phase de centrifugation, le jus a été extrait et le moment d'inertie est encore modifié. Sa valeur devient J''_{tam} = 1 270 USI.

B.4.7.1. Calculer $\frac{d\Omega}{dt}$ sur la phase 5 et en déduire C_{acc5}, couple accélérateur sur la phase 5.

B.4.7.2. En déduire alors que le couple mécanique pendant cette phase est proche de -3740 N·m.

B.4.7.3. Dessiner sur le **document réponse** le profil du couple mécanique à fournir par la motorisation C_{mot} sur tout le cycle de centrifugation.

B.4.7.4. Compléter le document réponse en notant dans les cases correspondantes le rôle de la motorisation : M pour moteur ou G pour générateur.

B.5. Choix d'un nouveau moto variateur

On va proposer ici une motorisation permettant de répondre à l'augmentation de la productivité.

B.5.1. Justifier à partir du nouveau profil de couple que la motorisation actuelle ne peut plus convenir.

Un bureau d'étude consulté pour répondre à l'augmentation de la productivité a préconisé de changer l'ensemble moteur et variateur par un matériel SIEMENS nouvelle génération, ce qui résoudra les problèmes de maintenance actuels.

Le moteur retenu a les caractéristiques nominales suivantes :

P_{uN} = 315 kW
U_N = 400 V
I_N = 580 A
cos φ_N = 0.82
n_N = 741 tr·min-1
η_N = 0.96
f_N = 50 Hz

B.5.2. Calculer le couple nominal du nouveau moteur proposé.

Le variateur de vitesse et le moteur ont la particularité d'absorber une surcharge de 50 % pendant une durée de 60 s. Il existe plusieurs versions de ce variateur : 1 quadrant, 2 quadrants et 4 quadrants.

Donner la version que l'entreprise doit commander pour remplir le cahier des charges.

B.5.3. Surcharge du moto-variateur

B.5.3.1. A partir du **document réponse**, relever le couple maximum nécessaire à l'entrainement de la centrifugeuse.

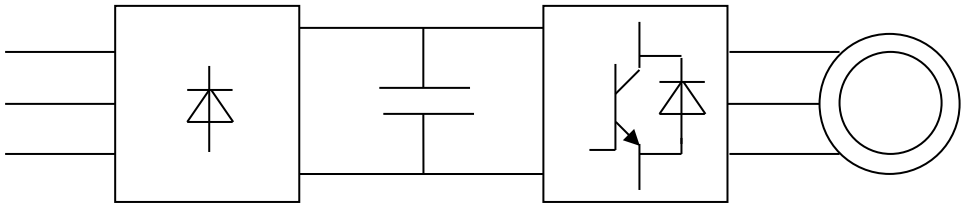
B.5.3.2. Exprimer alors en % la surcharge en couple du moteur.

B.5.3.3. Justifier le choix du couple moteur-variateur en termes de surcharge et de durée de la surcharge.

B.5.3.4. Sur quelles grandeurs physiques appliquées au moteur le variateur agit-il pour permettre la rotation à 980 $tr \cdot min^{-1}$?

B.5.4. Réversibilité du moto-variateur

On propose ci-dessous une structure classique de moto variateur.

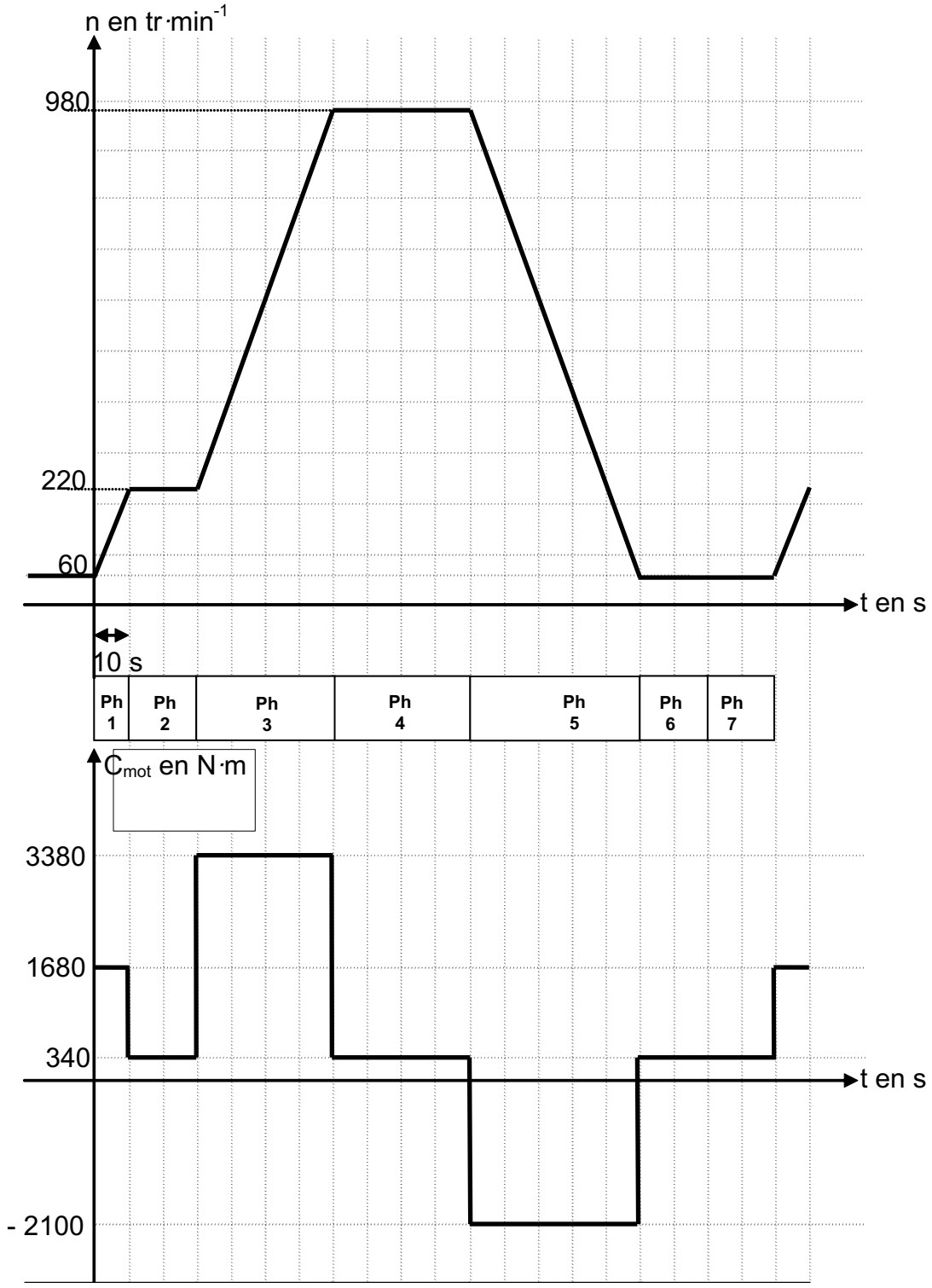


Redresseur à diodes | *Filtrage de la tension* | *Onduleur* | *MAS*

B.5.4.1. Cette structure permet-elle la réversibilité mécanique nécessaire ? Justifier la réponse.

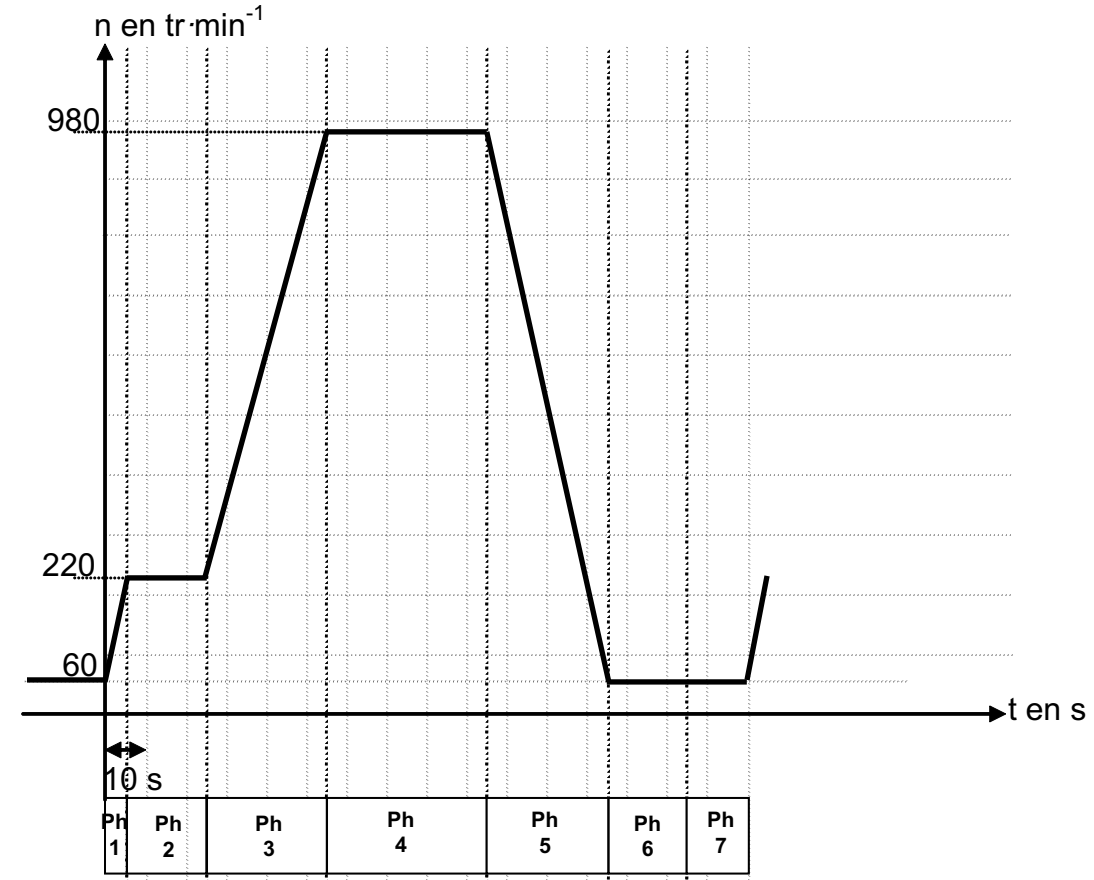
B.5.4.2. Si la réponse est non, proposer une solution.

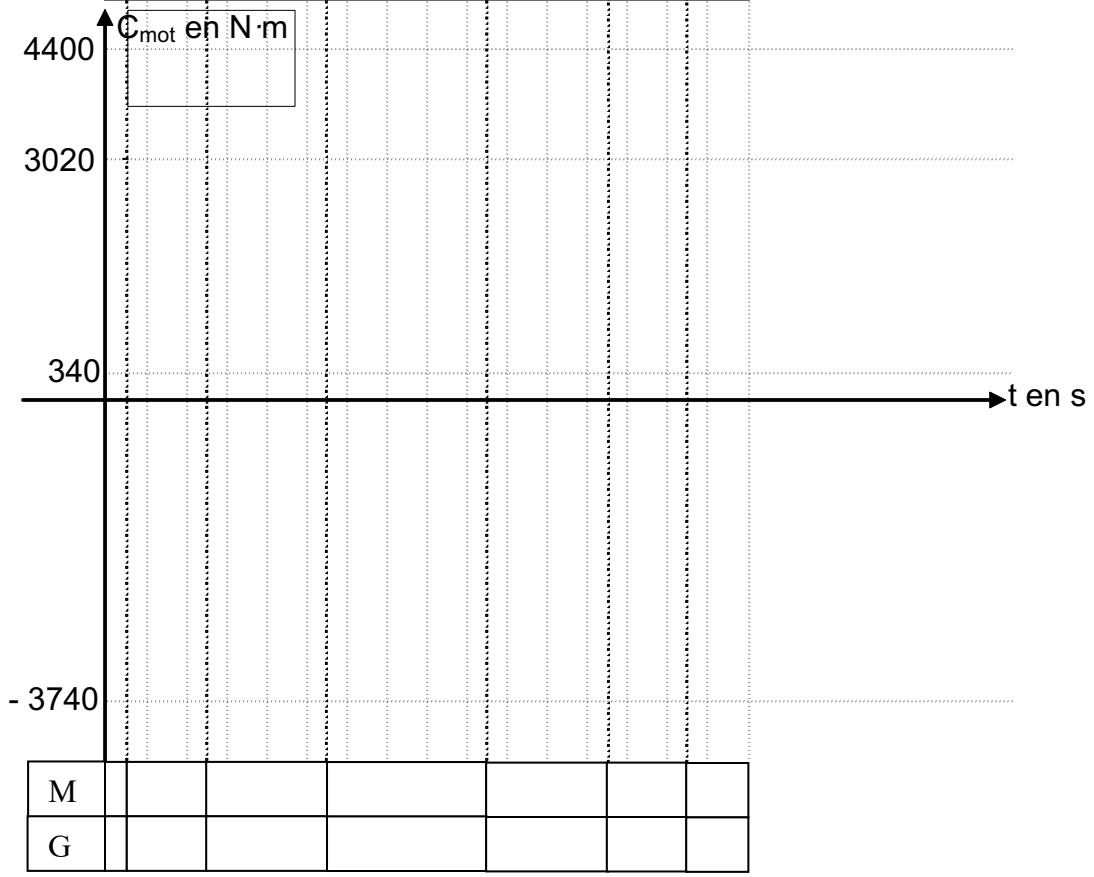
Annexe



Profil de vitesse actuel et profil de coule moteur associé

Document réponse à remettre avec la copie





M							
G							

M : moteur ; G : générateur