BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

ÉLECTROTECHNIQUE

Épreuve E4.1

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

SESSION 2011

_____

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 le documents-réponses A, B et C et sur feuilles de copie.

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Ce sujet se compose de **17** pages numérotées de **1/17** à **17/17** dont 2 pages de documents-réponses. Les parties A, B, C, D et E sont indépendantes les unes des autres.

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.

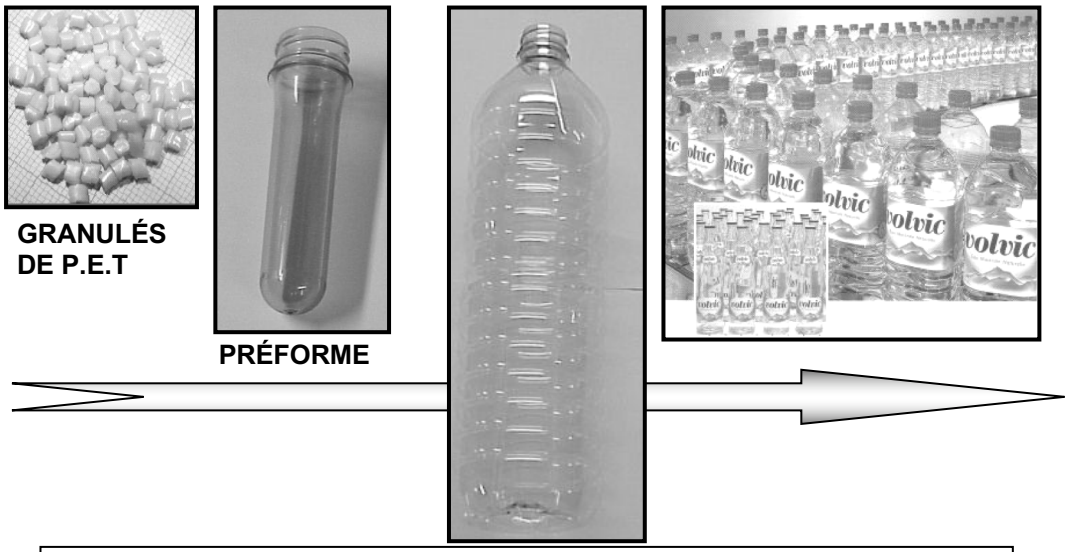
Présentation de l'entreprise VOLVIC :

Située au cœur des volcans d'Auvergne, la société « VOLVIC » produit des bouteilles d'eau minérale. Trois usines traitent environ 4 millions de litres d'eau par jour, soit une production annuelle de 880 millions de litres. Pour assurer cette production, le site consomme environ 67 000 MWh d'énergie électrique par an.

Présentation du processus de production :

L'usine du Chancet est une des trois usines d'embouteillage.
Hormis le captage, situé à 3,5 km, l'usine est divisée en 3 zones :

- une zone « plasturgie » où sont fabriquées les préformes en P.E.T (Polyéthylène Téréphtalate) qui deviendront ensuite par soufflage des bouteilles.
- une zone d'embouteillage.
- une zone de stockage et d'expédition.

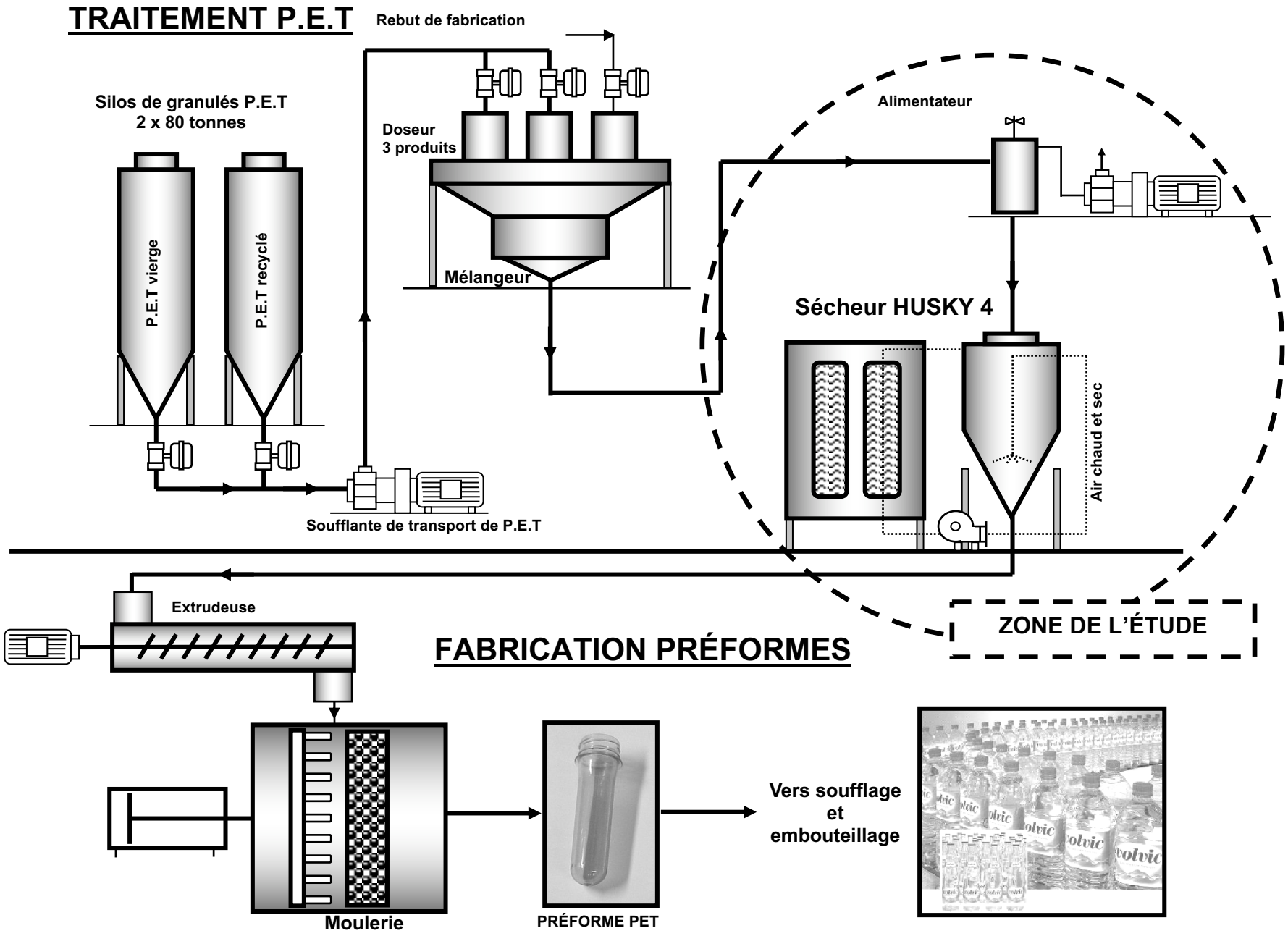


Du granulé de P.E.T à la bouteille prête pour l'expédition

Présentation de la zone plasturgie (voir figure ci-après page 3)

Les bouteilles sont réalisées à partir d'un mélange de granulés de P.E.T vierge, de P.E.T recyclé ainsi que des rebuts de fabrication.

Les granulés de P.E.T, stockés dans des silos, sont chargés d'humidité. Afin de garantir la qualité de fabrication de la préforme, les granulés doivent être séchés avant l'opération d'extrusion. Cette étude portera sur le dispositif de séchage : le sécheur HUSKY 4.


TRAITEMENT P.E.T
Rebut de fabrication
Silos de granulés P.E.T
2 x 80 tonnes
P.E.T vierge
P.E.T recyclé
Doseur
3 produits
Mélangeur
Alimentateur
Sécheur HUSKY 4
Air chaud et sec
Soufflante de transport de P.E.T
ZONE DE L'ÉTUDE
Extrudeuse
FABRICATION PRÉFORMES
Moulerie
PRÉFORME PET
Vers soufflage
et
embouteillage

Enjeu :

La société Volvic s'inscrit dans une démarche générale de réduction de sa consommation d'énergie. Un bilan de consommation a été effectué sur l'ensemble de l'usine de Chancet. Les résultats montrent que le secteur de la plasturgie, et plus particulièrement le séchage, est le plus gros consommateur d'énergie électrique.
Des sécheurs de nouvelle génération paraissent répondre parfaitement aux contraintes de production de l'entreprise (un P.E.T sec) tout en consommant 2 fois moins d'énergie environ.
Il est donc envisagé de mener une étude sur l'opportunité d'installer ces nouveaux sécheurs.

Problématique de l'étude :

Afin de réduire la consommation des sécheurs, une re-conception a été réalisée. Elle concerne l'isolation thermique de la trémie de séchage, l'optimisation de la consommation énergétique liée au changement des systèmes de chauffage et de circulation de l'air.

Problématique n°1 :

S'assurer que l'installation des nouveaux éléments du sécheur corresponde bien aux améliorations attendues d'un point de vue énergétique.

Problématique n°2 :

Prévoir les conséquences de la mise en place de ce nouveau système sur le dimensionnement du réseau électrique de l'usine (raccordement au réseau, protection, pollution harmonique).

Pour répondre à ces problématiques, ce sujet se décompose en cinq parties :

A- l'étude énergétique du nouveau réchauffeur ;

B- l'étude de l'isolation thermique de la trémie ;

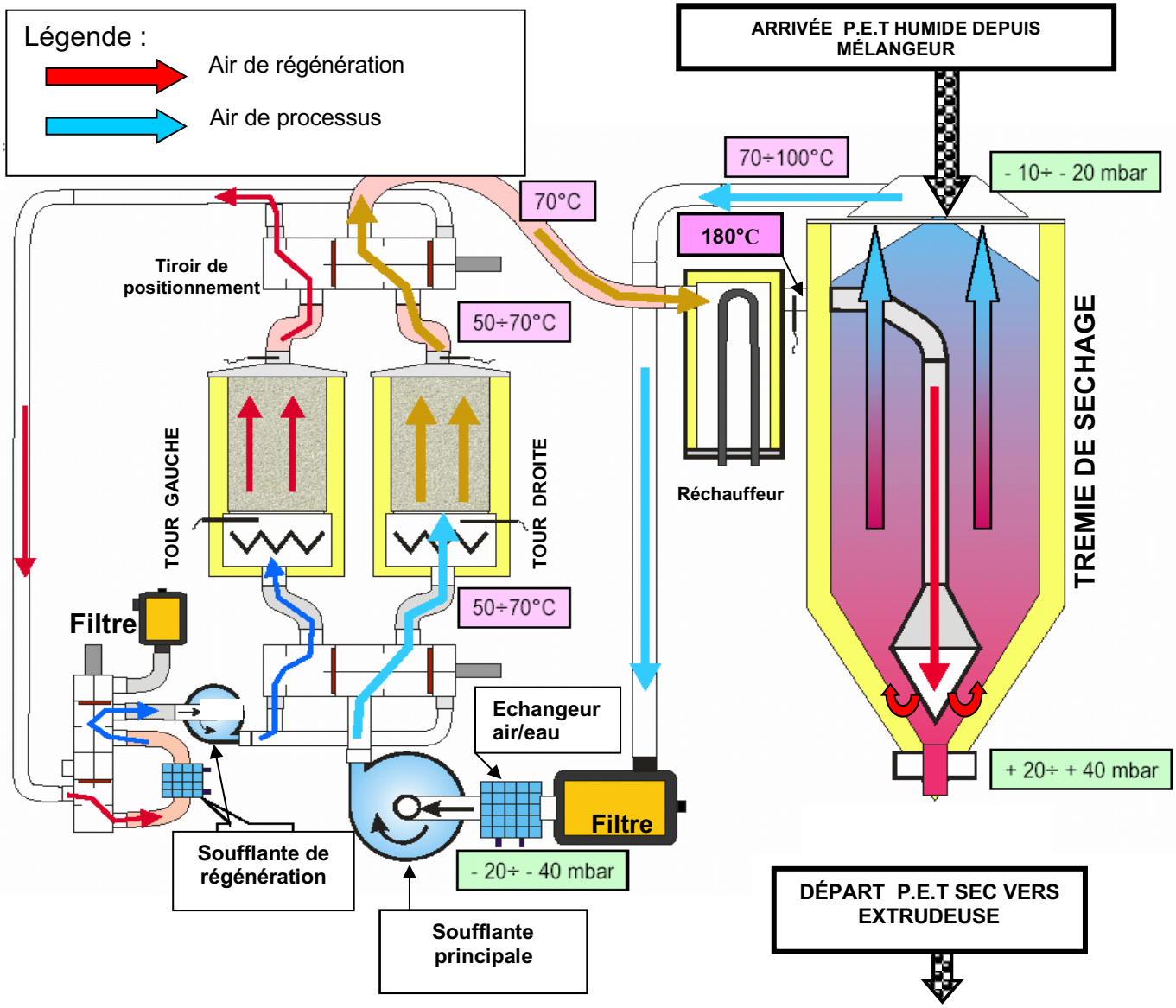
C- l'étude énergétique du nouveau variateur de vitesse alimentant le moteur de la soufflante principale ;

D- le bilan énergétique global lié aux différentes modifications faites au niveau de l'installation ;

E- l'influence de ces modifications techniques sur le dimensionnement du réseau électrique d'alimentation du sécheur.

Avant d'aborder ces différentes parties, il est nécessaire de présenter le schéma fonctionnel du sécheur HUSKY 4 donné ci-après (page 5) :

SCHÉMA FONCTIONNEL



Principe de fonctionnement :

Le granulé de P.E.T est contenu dans une trémie de séchage de 7000 litres. Ce granulé descend par gravité jusqu'à l'extrudeuse à une cadence de production de 820 kg par heure.

Le granulé est séché en injectant de l'air sec à la base de la trémie. Cet air a été préalablement porté à une température de 180°C par un réchauffeur.

L'air remonte dans la trémie et, au contact du P.E.T, se charge en humidité. Il est évacué par le haut de la trémie, sa température est alors inférieure à 100°C.

La circulation de l'air est assurée par la soufflante principale. Une fois filtré et refroidi à une température inférieure à 70°C, l'air est envoyé dans une des deux tours de séchage (celles-ci sont utilisées alternativement afin d'être régulièrement déshumidifiées)

Sorti de la tour, l'air sec repasse dans le réchauffeur pour assurer un nouveau cycle de séchage du P.E.T.

A - Étude énergétique du nouveau réchauffeur

On se propose, dans cette partie du sujet, d'analyser le mode de commande par train d'ondes du réchauffeur puis de déterminer plus globalement les économies d'énergies liées à son installation.

*La puissance de chauffe maximale du réchauffeur est de 96 kW. Ce réchauffeur est composé de **trois charges triphasées** équilibrées purement résistives. Chacune de ces charges est alimentée par un convertisseur statique triphasé alternatif-alternatif permettant une modulation de l'énergie de chauffage par train d'ondes à partir d'un réseau triphasé 230V/400V, 50 Hz.*

A.1 Caractéristiques d'une charge triphasée du réchauffeur

A.1.1 Quelle est la puissance de chauffe maximale P_{1max} délivrée par une charge triphasée ?

A.1.2 Chaque charge triphasée est constituée de trois éléments chauffants de résistance R. Quel couplage faut-il adopter pour alimenter chaque élément sous une tension de 400V ?

A.1.3 Déterminer la valeur de la résistance R d'un élément chauffant.

A.2 Commande par train d'ondes d'un élément chauffant

On étudie, par souci de simplification, le principe de fonctionnement de la commande par train d'ondes sur un gradateur monophasé à thyristors alimentant une résistance r quelconque (figure n°1). Les résultats obtenus sont transférables à une charge triphasée.

La tension v(t) du réseau, de valeur efficace V = 230V, a pour fréquence f = 50Hz. Sa période est notée T.

Le signal de commande des thyristors est un cycle de période T_C comportant un nombre entier p de périodes T du réseau. Les thyristors reçoivent des impulsions en permanence pendant n périodes du réseau. Puis les impulsions cessent pendant les p-n périodes restantes. Les thyristors sont considérés comme parfaits.

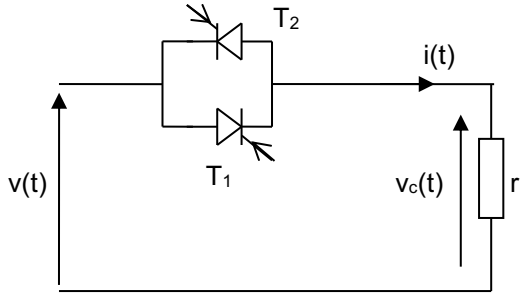


Figure n°1

A.2.1 Rappeler les conditions de mise en conduction et de blocage d'un thyristor.

A.2.2 On donne, sur le document réponse A (page 16), l'allure de l'intensité du courant i(t) dans la charge r.

- Représenter sur l'axe des temps t les périodes T et T_C.
- Indiquer les intervalles de temps qui correspondent aux n périodes T et aux p-n périodes T caractérisant le cycle de commande des thyristors.
- Préciser les intervalles de conductions des thyristors T_1 et T_2.

A.2.3 Exprimer la période T_c en fonction de la période T et p.

A.2.4 Donner l'expression du rapport cyclique α de la commande en fonction de n et p. On rappelle que le rapport cyclique est le rapport de la durée de conduction du gradateur par la durée d'un cycle de commande.

A.2.5 Connaissant l'allure de i(t), représenter sur le document réponse A l'allure de la tension $v_c(t)$ aux bornes de la charge. Justifier la démarche suivie et préciser la valeur numérique de l'amplitude de cette tension.

A.2.6 Rappeler la définition de la puissance active P absorbée par la charge r en l'exprimant en fonction des grandeurs électriques notées sur la figure n°1.

A.2.7 La valeur efficace V_c de la tension $v_c(t)$ s'exprime par $V_c = V.\sqrt{\alpha}$ où V est la valeur efficace de la tension v(t).

Montrer que la puissance P peut alors s'écrire : $P = \dfrac{V^2 \times \alpha}{r}$

A.2.8 Préciser la plage de réglage de la puissance active absorbée par la charge r. Quel est l'intérêt pratique de la commande par train d'ondes ?

A.3 Bilan énergétique du chauffage de l'air pour le séchage du P.E.T.

Les relevés énergétiques du réchauffeur du nouveau sécheur Husky 4 ont permis de déterminer que, pour une séquence de séchage de 1 minute, le chauffage mobilisait une puissance de 96 kW pendant 30s. L'ancien système était équipé d'une puissance de chauffe de 160 kW pour les mêmes paramètres de temps de chauffe et de séchage.

A.3.1 Déterminer en Watt.heure les énergies W_n et W_a respectivement consommées pour 1h de séchage par les réchauffeurs du nouveau et de l'ancien sécheur. Quelle est l'énergie $W_{écoR}$ économisée pendant 1h de fonctionnement ?

A.3.2 En supposant que les deux sécheurs sont utilisés sur l'année dans des conditions identiques, déterminer en pourcentages, l'économie d'énergie réalisée par l'installation du nouveau sécheur.

B - Étude de l'isolation de la trémie

La trémie est initialement isolée thermiquement par une laine de verre d'épaisseur 10 cm. Cette étude a pour objectif d'évaluer si le doublement de l'épaisseur de l'isolant thermique permet d'effectuer des économies d'énergie significatives.

B.1 Rappel sur les unités de température

L'échelle de température Celsius est définie par deux points : le point 0°C correspondant à la température de la glace fondante sous une pression d'une atmosphère et le point 100°C.

B.1.1 Par quel phénomène physique est caractérisée la température de 100°C ?

L'état de repos thermodynamique complet de la matière qui correspond à la plus petite température possible (-273°C), est appelé « zéro absolu ». Il est choisi comme zéro de l'échelle Kelvin.
La loi de conversion des kelvins en degrés Celsius est :

$$\theta = T - 273 \qquad \text{avec } \theta \text{ en °C et } T \text{ en K.}$$

B.1.2 Compléter les valeurs manquantes des températures sur le document réponse B (page 16).

Dans la suite du sujet toutes les températures θ sont données en °C.
Compte tenu de la relation précédente, on remarquera qu'une différence de température $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ correspond à une même valeur numérique exprimée indifféremment en °C ou en K.

B.2 Pertes thermiques à travers la paroi de la trémie

L'énergie de chauffage du P.E.T, à l'intérieur de la trémie, tend à s'évacuer vers l'extérieur en traversant la paroi isolante. Afin de mener une étude sur l'isolation de la trémie, on émet plusieurs hypothèses simplificatrices : on suppose que la déperdition de chaleur est uniforme le long de la paroi de la trémie et on assimile sa surface cylindrique à un mur plan.

Ainsi, la puissance calorifique Pc perdue par la trémie est donnée par la loi d'Ohm thermique :

$$\theta_{in} - \theta_{ex} = R_{th} \cdot Pc$$

*où R_{th} est la **résistance thermique** de la paroi de la trémie, θ_{in} et θ_{ex} étant les températures intérieure et extérieure à la trémie, supposées uniformes.*

B.2.1 Vérifier que l'unité de résistance thermique est le $°C.W^{-1}$ ou le $K.W^{-1}$.

Les fournisseurs de matériaux isolants caractérisent leurs produits par la résistance thermique notée ici R_{thp}. Ainsi le pouvoir isolant d'une plaque de laine de verre de surface 1 m² et d'épaisseur 10 cm est tel que : $R_{thp} = 2,5\ K.W^{-1}$.

B.2.2 Calculer la puissance calorifique Pc_o perdue par une plaque isolante de 1 m² recouvrant la trémie dans les conditions de température données ci-dessous :

$\theta_{ex} = 30°C$ et $\theta_{in} = 130°C$

Nous allons maintenant déterminer la puissance calorifique perdue à travers toute la surface de la trémie. Le volume intérieur de la trémie comportant des zones coniques, nous supposerons, pour simplifier les calculs, que le volume calorifugé est parfaitement cylindrique.

B.2.3 Calculer la surface S des parois de la trémie, celle-ci étant identifiée à un cylindre, de hauteur H et de rayon R, **fermé à sa base et à son sommet**.
H = 3,5 m et R = 1 m.

Dans la suite du sujet on prendra : S = 28 m².

B.2.4 Calculer la puissance calorifique totale Pct_1 perdue à travers les 28 m² de la paroi de la trémie, dans les mêmes conditions de température qu'à la question B.2.2.

B.2.5 En déduire la résistance thermique R_{th} des parois de la trémie.

B.2.6 Proposer une expression de R_{th} en fonction de R_{thp} et du nombre N_p de plaques de 1 m². En utilisant l'analogie entre les lois thermiques et électriques, déduire le type d'association, série ou parallèle, résultant de l'assemblage des N_p plaques de résistance thermique R_{thp}.

B.3 Réduction des pertes thermiques liée à l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant

On double la couche de laine de verre. Son épaisseur passe de 10 à 20 centimètres.

B.3.1 Si on considère une plaque de 1 m² et de 20 cm d'épaisseur comme la superposition de 2 plaques de 1 m² et d'épaisseur 10 cm, à quel type d'association, série ou parallèle, correspond ce groupement des résistances thermiques R_{thp} ? En déduire la valeur de la résistance thermique R'_{thp} d'une plaque de laine de verre de 1 m² et de 20 cm d'épaisseur.

B.3.2 Calculer la valeur de la résistance thermique R_{th}' de la paroi de la trémie.

B.3.3 En déduire, en tenant compte de la nouvelle épaisseur de l'isolant thermique, la puissance calorifique perdue totale Pct_2 (les conditions de température sont identiques à celles de la question B.2.2).

B.3.4 Exprimer en pourcentage l'économie d'énergie réalisée sur les pertes de chaleur grâce au doublement de l'épaisseur de l'isolant. Quelle est l'énergie $W_{écoT}$ économisée pendant une heure de fonctionnement ?

C - Étude énergétique du variateur de vitesse alimentant le moteur de la soufflante principale

La circulation de l'air chaud est assurée à l'aide d'une soufflante entraînée par un moteur asynchrone.
Le débit d'air peut varier selon l'état des filtres à air et selon la quantité de P.E.T à sécher.
Il est donc nécessaire d'entraîner la soufflante à vitesse variable ; la solution technologique retenue pour le nouveau sécheur consiste à lui associer un variateur de vitesse (ADV200).
L'objectif de cette partie est d'étudier l'énergie consommée par le variateur pour un point de fonctionnement donné (débit d'air 1670m^3.h^{-1}).

C.1 Analyse de la structure du variateur

On donne le schéma de la constitution interne du variateur sur le document réponse C (figure n°2 page 17). Le variateur est alimenté par le réseau triphasé équilibré direct 230V/400V – 50 Hz. Le moteur est couplé en étoile.

C.1.1 Indiquer, sur le document réponse C, la fonction des modules 1, 2 et 3.

Sur le document annexe 1 (page 14), on donne les relevés d'une tension simple non sinusoïdale délivrée par le variateur et du courant $i_M(t)$, considéré comme sinusoïdal, absorbé par le moteur.

C.1.2 Déduire de ce relevé le type de commande du module 3 du variateur.

C.2 Économie d'énergie réalisée à l'aide du nouveau variateur de vitesse

On souhaite déterminer l'énergie consommée en entrée du variateur pour 1h de séchage. On donne sur le document annexe 1 (page 14) les relevés de mesures effectuées par phase en sortie du variateur.

C.2.1 Repérer, à l'aide des relevés expérimentaux figurant sur le document annexe 1, les valeurs des grandeurs électriques suivantes :

- la puissance active P_{1M} fournie, par phase, au moteur ;
- la puissance apparente S_{1M} pour une phase du moteur ;
- la valeur efficace I_M de l'intensité du courant $i_M(t)$;
- la valeur efficace V d'une tension simple ;
- la valeur efficace V_{H01} du fondamental d'une tension simple ;
- le facteur de puissance ;
- le facteur de déplacement.

C.2.2 Vérifier la cohérence des informations délivrées (on exprimera pour cela la puissance active et la puissance apparente en fonction des intensités et des tensions appropriées).

C.2.3 Déterminer la puissance totale P_M délivrée par le variateur au moteur. En déduire la puissance P_V absorbée par le variateur en considérant que son rendement est de 97%.

C.2.4 Calculer l'énergie W_V consommée par le variateur pour 1h de séchage (la soufflante étant en permanence en fonctionnement).

L'ancien sécheur ne possédait pas de variateur associé au moteur de la soufflante. Ainsi, l'air chaud et sec utilisé pour le séchage circulait à un débit constant de 2000$m^3.h^{-1}$ quelles que soient les conditions de fonctionnement. La puissance active absorbée par le moteur était alors de 20 kW.

C.2.5 Calculer l'économie d'énergie W_{ecoV} réalisée avec cette nouvelle ventilation pour une heure de fonctionnement.

D - Bilan énergétique

Dans cette partie, nous allons synthétiser les résultats des parties A, B et C afin de déterminer le ou les éléments du nouveau sécheur qui participent à une importante économie d'énergie. On rappelle que la cadence de production de P.E.T séché est de 820 kg par heure.

D.1 À partir des résultats des questions A.3.1, B.3.4 et C.2.5, calculer les énergies économisées W_{ecoR}, W_{ecoT}, W_{ecoV} par kilogramme de P.E.T séché. Le résultat sera donné en W.h.kg^{-1}, unité utilisée par le constructeur du sécheur pour en définir les performances.

L'ancien sécheur consommait dans sa globalité 152 W.h.kg^{-1}*. Les performances du nouveau sécheur sont données pour 88* W.h.kg^{-1}.

D.2 Exprimer, en pourcentages, la part des économies respectivement réalisées par le nouveau réchauffeur, le doublement de l'isolation de la trémie, l'installation d'un variateur.

D.3 Déterminer les éléments qui participent de façon significative à une réduction de la consommation énergétique. Commenter le choix de l'industriel de ne pas modifier l'épaisseur de l'isolant de la trémie.

E - Influence du système de chauffage et du variateur de vitesse sur les contraintes de fonctionnement du réseau

Nous allons étudier dans cette partie les conséquences de l'installation du réchauffeur et du variateur de vitesse, sur les contraintes pesant sur le réseau d'alimentation électrique, notamment en termes de pollution harmonique.

Un analyseur a permis d'effectuer les relevés présentés en annexe 2 (page 15). Les différentes puissances sont données pour une phase du réseau.

Les tensions délivrées par le réseau sont considérées comme sinusoïdales. Sur l'analyseur, l'indication délivrée en kVAR sur l'écran 5 correspond au bilan des puissances réactive et déformante. On notera par la suite cette grandeur Q'_1.

On rappelle la relation donnant le taux de distorsion harmonique d'un courant i noté THDi et sa valeur efficace I :

$$\text{THDi} = 100 \times \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \ldots}}{I_1}(\%) \qquad I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \ldots}$$

E.1 Analyse des relevés en entrée du réchauffeur

E.1.1 Que peut-on dire de l'allure du courant $i_r(t)$? Son spectre est-il en accord ?

E.1.2 Calculer la valeur efficace I_r et maximale I_{rmax} de ce courant de ligne.

E.1.3 Le réchauffeur génère-t-il une pollution harmonique sur le réseau ?

E.2 Analyse des relevés en entrée du variateur

E.2.1 L'allure du courant $i_v(t)$ est-elle en accord avec son spectre ?

E.2.2 Relever la valeur efficace I_V du courant de ligne $i_v(t)$.

E.2.3 Donner les fréquences des deux harmoniques de courant les plus polluants pour le réseau, puis estimer leurs valeurs efficaces grâce au spectre de $i_v(t)$.

E.2.4 Calculer le taux de distorsion harmonique $THDi_v$ en ne tenant compte que des harmoniques citées en E.2.3. Comparer ce résultat à celui relevé par l'analyseur.

E.2.5 À l'aide du relevé d'écran 5, donner la valeur du facteur de déplacement que l'on notera par la suite $\cos\varphi_1$. Que représente physiquement cette grandeur ?

E.2.6 Donner deux expressions possibles de la puissance active P_1 consommée par une phase du variateur en fonction du facteur de puissance (que l'on notera f_p) puis du facteur de déplacement.

E.2.7 Calculer la valeur de cette puissance P_1 dans les deux cas. Aux erreurs de mesures près, on constate que ces valeurs sont identiques. Quelle est la propriété illustrée ici, quant à la puissance active transmise par les harmoniques de courants ?

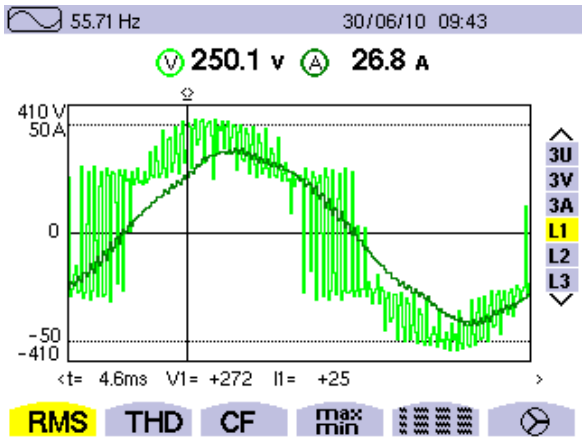
E.2.8 Déterminer la valeur de la puissance déformante D_1 pour une phase. Retrouver la valeur Q'_1 affichée sur l'analyseur.

E.2.9 Déterminer les valeurs des puissances active, réactive, apparente et déformante, respectivement P, Q, S et D, consommées globalement par le variateur.

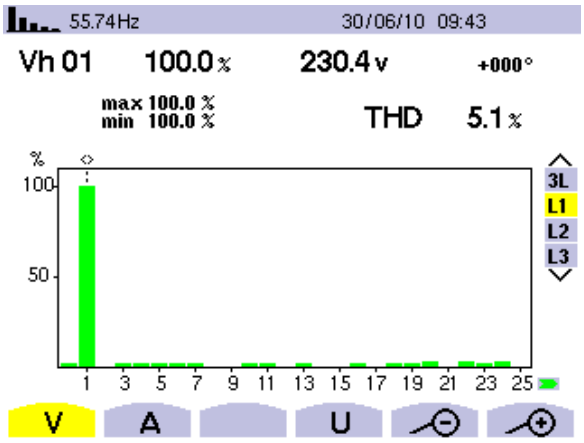
E.2.10 Quelles nouvelles contraintes sont imposées au réseau électrique d'alimentation par l'utilisation de ce variateur ? Proposer des solutions permettant de réduire éventuellement ces contraintes.

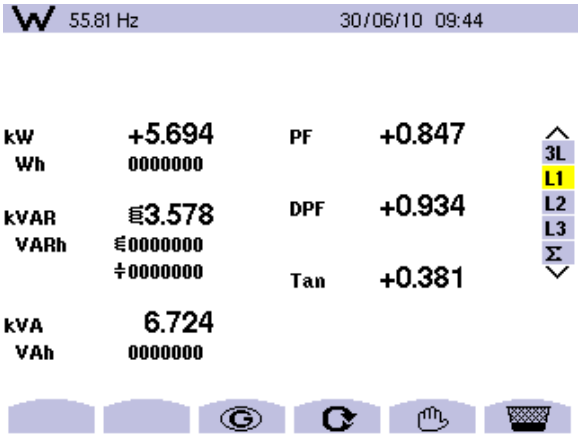
Annexe 1

Relevés d'une tension simple et du courant $i_M(t)$ absorbé par le moteur



Relevés du spectre d'une tension simple et des puissances absorbées par une phase du moteur

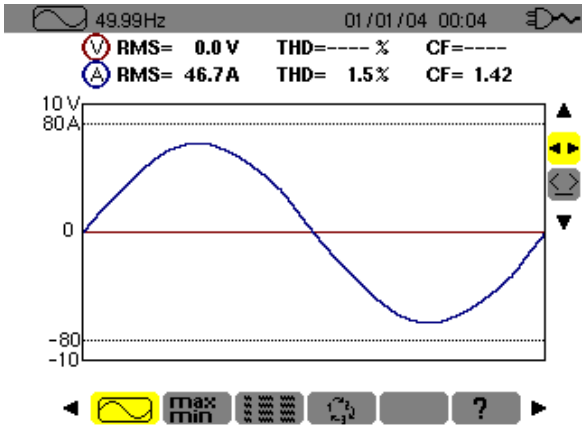




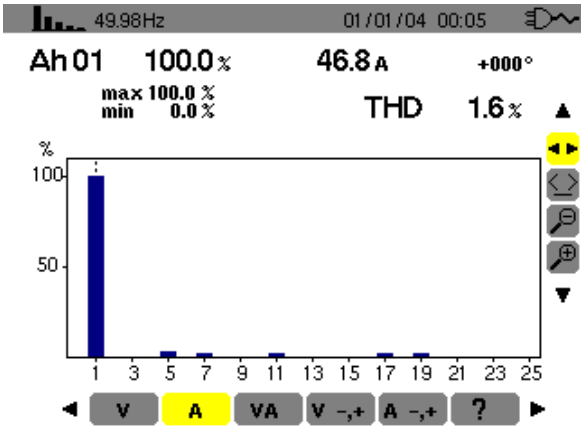
On note V_{Hn} la valeur efficace des composantes de rang n

Annexe 2

Courant de ligne $i_r(t)$ en entrée du réchauffeur :

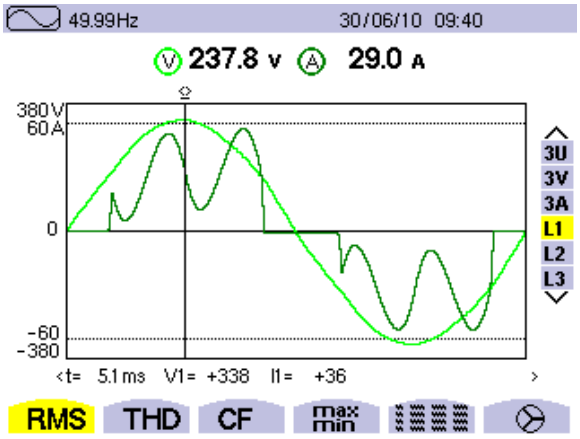


Écran 1 (courant $i_r(t)$)

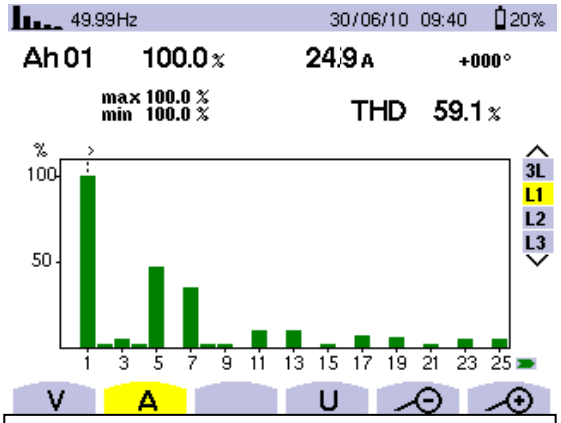


Écran 2 (spectre de $i_r(t)$)

Courant de ligne $i_v(t)$ et puissances en entrée du variateur:

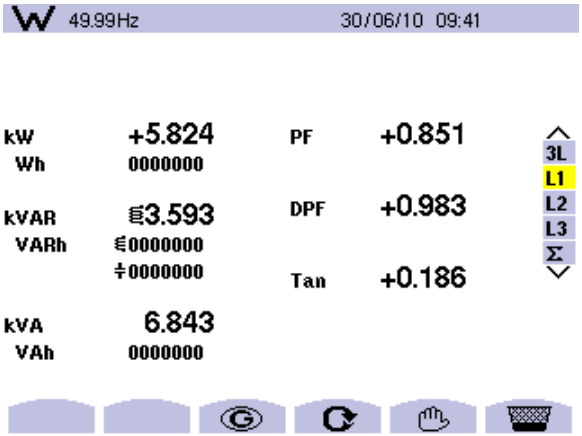


Écran 3 (tension v_1 (t) et courant $i_v(t)$)



On note I_{vHn} la valeur efficace des composantes de rang n

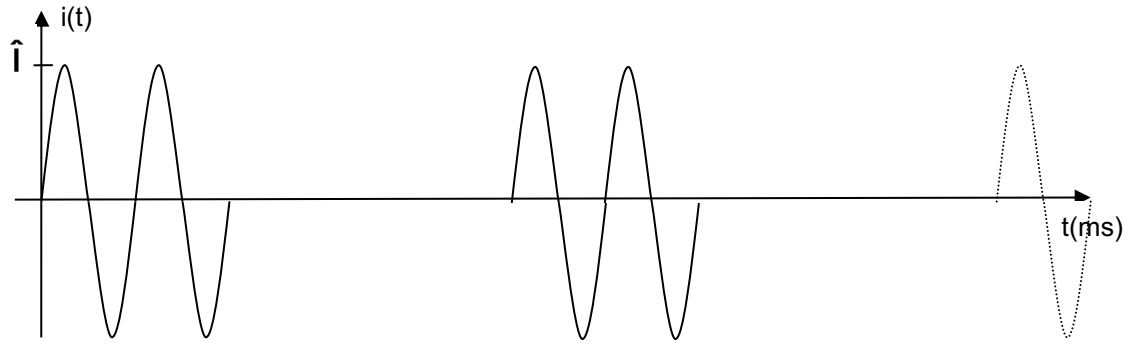
Écran 4 (spectre de $i_V(t)$)



Écran 5 (puissances absorbées par une phase du variateur)

DOCUMENT RÉPONSE A

Question A.2.2

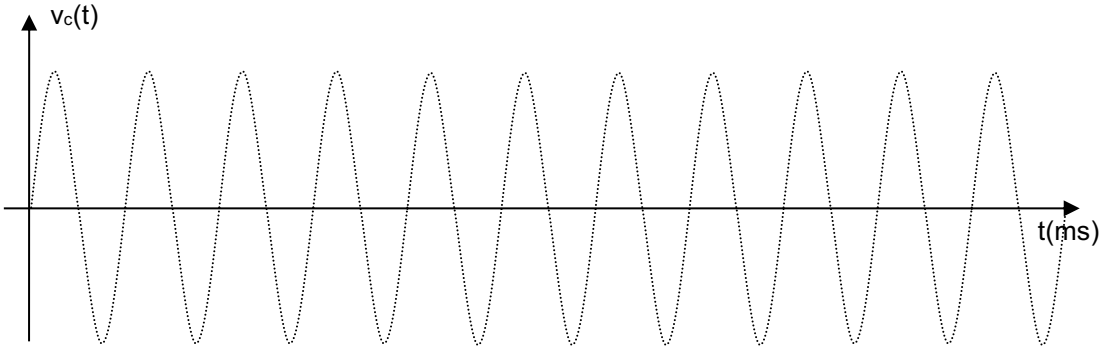


T1

T2

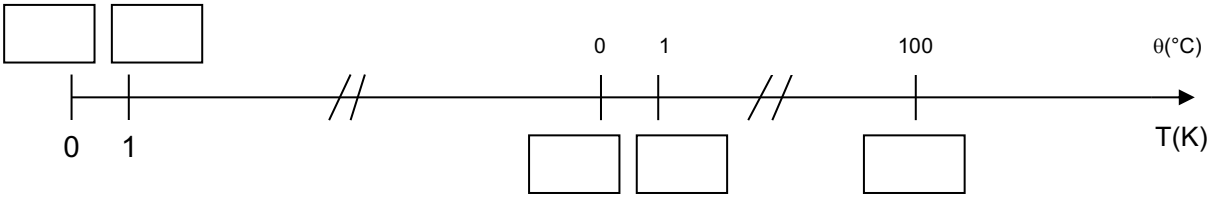
Indiquer ci-dessus les intervalles correspondant aux n et p-n périodes

Question A.2.5



Question B.1.2

DOCUMENT RÉPONSE B



DOCUMENT RÉPONSE C

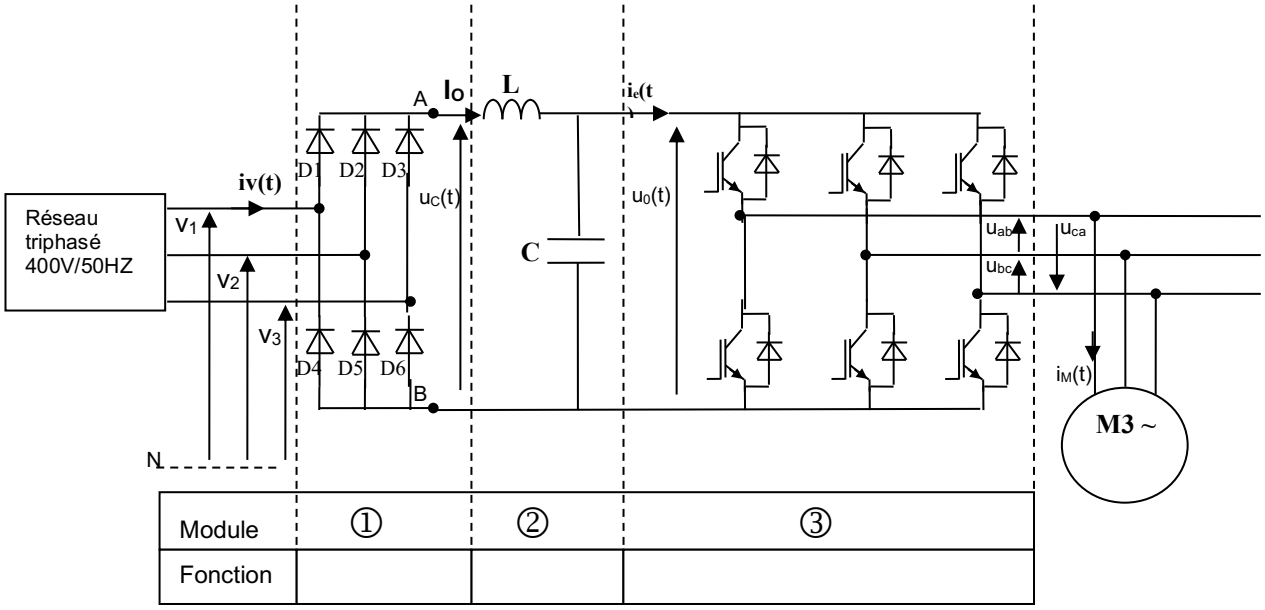


Figure n°2