

**BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR EN
ÉLECTROTECHNIQUE**

**E4 - Physique Appliquée
à l'électrotechnique**

Durée : 4 heures

coefficient : 3

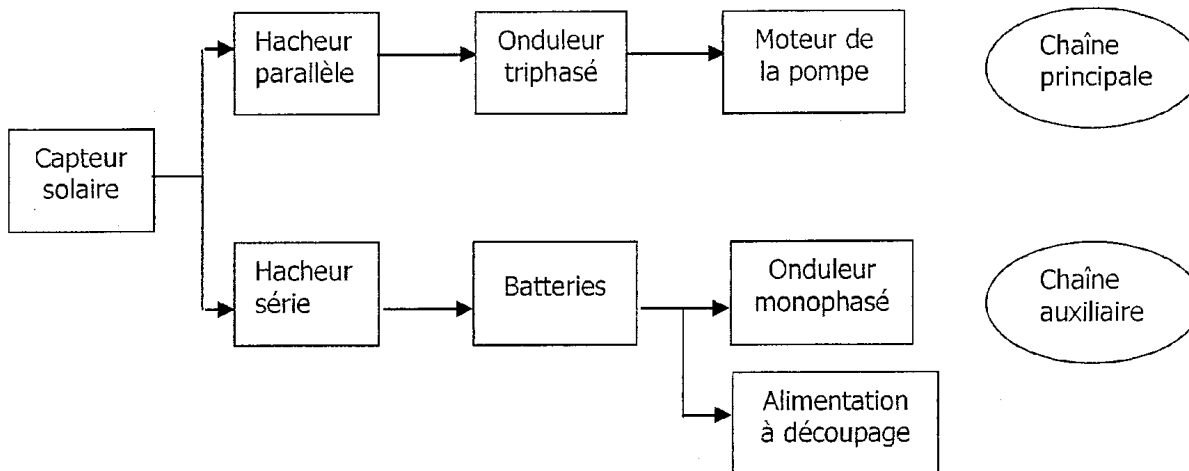
Calculatrice autorisée

Etude d'une station de pompage autonome

Présentation

Dans les zones désertiques, des petites stations de pompage alimentées par l'énergie solaire permettent d'extraire l'eau de la nappe phréatique pour remplir des réservoirs.

Le synoptique de l'installation est représenté ci-dessous.



La chaîne principale utilise la majeure partie de l'énergie apportée par le capteur solaire pour alimenter le moteur de la pompe. Le débit de la pompe dépend de l'éclairement du capteur solaire.

La chaîne auxiliaire maintient des batteries d'accumulateurs chargées. L'énergie stockée dans ces batteries permet :

- à l'onduleur monophasé de délivrer une tension 230V/50Hz à des fins de maintenance du site,
- à l'alimentation à découpage de délivrer une tension continue régulée pour alimenter le système électronique de contrôle non représenté.

- Ce problème est constitué de 4 parties indépendantes -

Hypothèses d'étude

- Tous les interrupteurs constituant les convertisseurs statiques sont supposés parfaits.
- Dans les parties A,B,C, on considère que les batteries sont chargées et que la chaîne auxiliaire n'absorbe pas de puissance.

Notations

Les grandeurs électriques instantanées sont représentées par une lettre minuscule ($u, i \dots$), sauf les grandeurs constantes qui sont représentées par une lettre majuscule.

U est la valeur efficace de $u(t)$.

$\langle u \rangle$ est la valeur moyenne de u .

u_f désigne le fondamental de u .

Partie A - Bilan énergétique

A.1 - Etude de la charge (moteur de la pompe) en conditions nominales

Le moteur asynchrone triphasé à cage entraînant la pompe a les caractéristiques nominales ci-dessous :

Fréquence	Vitesse	Puissance utile	Rendement
$f = 50 \text{ Hz}$	$N = 2900 \text{ tr/min}$	$P_u = 1100 \text{ W}$	$\eta = 90\%$

On néglige les pertes mécaniques.

A.1.1 - Donner la valeur :

- de la vitesse de rotation nominale Ω (en rad.s^{-1})
- de la vitesse de synchronisme Ω_s (en rad.s^{-1})
- du glissement nominal g
- du moment du couple électromagnétique T_e nominal
- de la puissance absorbée par le moteur P_{abs} en conditions nominales

A.1.2 - La caractéristique mécanique de la pompe est $T_r = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \Omega^2$. Lorsque la vitesse est nominale, que vaut le moment du couple résistant T_r ? Vérifier que le moteur fonctionne bien dans les conditions nominales lorsqu'il entraîne cette pompe.

A.2 - Etude de la source d'énergie (capteur solaire) : pour traiter cette partie, on s'appuiera sur les documents fournis en annexe 2

Chaque panneau solaire est assimilé à une source de courant. Afin d'optimiser la puissance fournie par le panneau solaire, on maintient à ses bornes la tension U_p égale à **17,5V**.

A.2.1 - Exprimer U_c en fonction de U_p puis I_c en fonction de I_p .

A.2.2 - Le hacheur parallèle maintient la tension aux bornes du capteur solaire égale à $U_c = 192,5 \text{ V}$. Justifier le choix de cette valeur.

A.2.3 - Exprimer la puissance P_c délivrée par le capteur solaire en fonction de U_c et de I_c .

Pour $U_p = 17,5\text{V}$ tracer la caractéristique I_p en fonction de l'éclairement E exprimé en W.m^{-2} sur le document réponse 1.

En déduire que pour cette même valeur de U_p , la puissance délivrée est $P_c = 1,44 \cdot E$

A.2.4 - Calculer la surface totale S_c du capteur solaire. Exprimer la puissance lumineuse reçue P_{lum} en fonction de l'éclairement E . En déduire le rendement énergétique du capteur solaire : $\eta_c = \frac{P_c}{P_{lum}}$.

A.3 - Bilan énergétique de la chaîne principale

Quand l'éclairement des panneaux varie, la puissance transmise au moteur varie. Les convertisseurs sont pilotés par le système de contrôle de telle sorte que le moteur soit commandé en maintenant le rapport « V/f » constant.

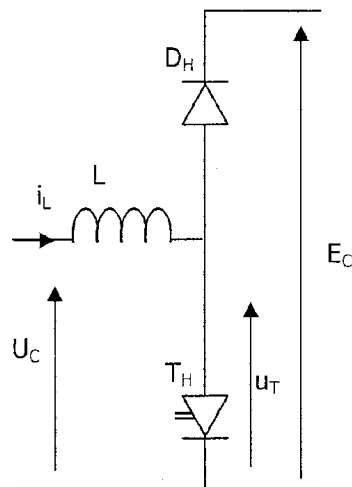
A.3.1 - En vous référant aux hypothèses d'étude, expliciter la relation entre la puissance P_{abs} absorbée par le moteur en fonctionnement nominal et la puissance P_c délivrée par le capteur. Quelle puissance P_c le capteur solaire doit-il fournir pour que le moteur fonctionne en conditions nominales? Déterminer alors l'éclairement E des panneaux.

A.3.2 - Sur le document réponse 1, tracer la caractéristique mécanique partielle du moteur quand il fonctionne à 50 Hz (condition nominale). Retrouver graphiquement la réponse à la question A.1.2.

A.3.3 - Quelle est la puissance utile au niveau de la pompe à 20 heures si l'on suppose le rendement du moteur inchangé ?

Partie B - Etude du hacheur parallèle

Le hacheur parallèle est modélisé par le schéma ci-contre.



L'interrupteur T_H est commandé à l'ouverture et à la fermeture à la fréquence f_H avec un rapport cyclique α_H .

Les tensions U_C et E_C sont supposées constantes. On donne $U_C = 192,5V$.

On néglige la résistance de la bobine d'inductance L .

On a relevé les oscillogrammes de u_T et de i_L sur le système étudié dans une situation d'éclairement donnée : voir document réponse 2.

B.1 - Exploitation des chronogrammes du document réponse

B.1.1 - Indiquer les intervalles de durée de conduction pour T_H et pour D_H sur le document réponse 2.

B.1.2 - Donner la valeur numérique de la fréquence de découpage (qu'on notera f_H).

B.1.3 - Donner le rapport cyclique de commande de l'interrupteur T_H ($\alpha_H = \frac{\text{durée de fermeture}}{\text{période}}$)

B.1.4 - Donner la valeur numérique de E_C , de $\langle u_T \rangle$ et de $\langle i_L \rangle$.

B.1.5 - Déterminer la valeur numérique de l'ondulation de i_L ($\Delta i_L = I_{L\max} - I_{L\min}$)

B.2 - Valeur de L

B.2.1 - Pour t compris entre 0 et $15 \mu s$, écrire l'équation différentielle vérifiée par i_L .

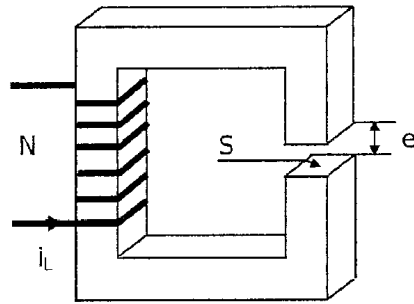
Donner la solution $i_L(t)$ de cette équation en fonction de U_C , L , $I_{L\min}$ et t .

B.2.2 - En partant de l'expression de $i_L(t)$ obtenue, déterminer l'expression de Δi_L en fonction de U_C , α_H , L et f_H .

B.2.3 - En déduire la valeur numérique de L .

B.3 - Constitution de la bobine

L est l'inductance d'une bobine réalisée autour d'un circuit magnétique en ferrite représenté ci-dessous.



En faisant l'hypothèse que le champ magnétique est uniforme dans le circuit magnétique (ferrite et air), le théorème d'Ampère appliqué à ce circuit s'énonce :

$$\frac{B}{\mu_0} \cdot e + \frac{B}{\mu_f} \cdot L_f = N \cdot i_L$$

avec

- $e = 2,3 \text{ mm}$ = épaisseur de l'entrefer
- $L_f = 20 \text{ cm}$ = longueur moyenne du circuit en ferrite
- $S = 1 \text{ cm}^2$ = section du circuit magnétique
- $N = 300$ = nombre de spires
- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ SI}$ = perméabilité magnétique de l'air
- On suppose que la perméabilité magnétique μ_f de la ferrite est infinie.

B.3.1 - Exprimer le flux ϕ à travers une section S du circuit magnétique en fonction de N , S , e , μ_0 et i_L .

B.3.2 - Le circuit étant supposé non saturé, on rappelle que l'inductance de la bobine est donnée par $L = \frac{N\phi}{i_L}$.

Exprimer L en fonction de μ_0 , N , S et e .

B.3.3 - Donner la valeur numérique de L . Comparer avec la valeur obtenue à la question B.2.3.

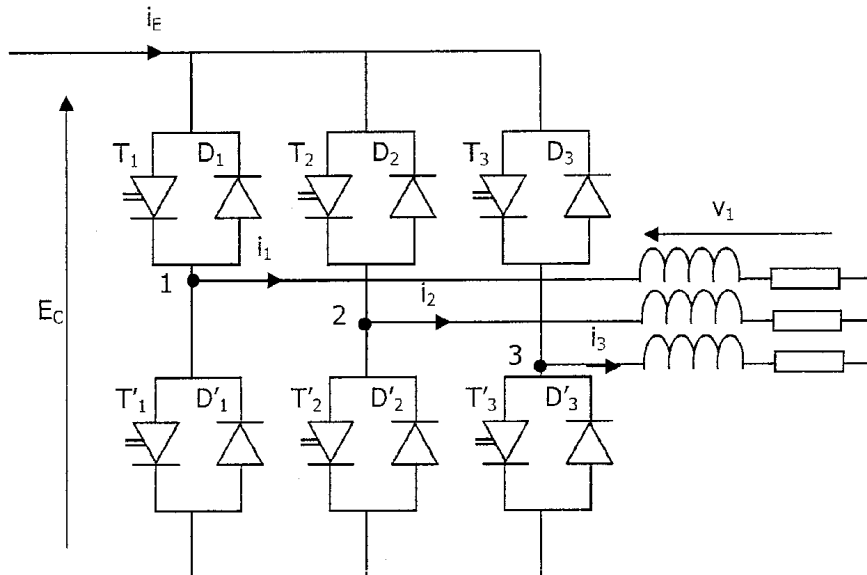
Partie C - Etude de l'onduleur triphasé

L'onduleur triphasé alimentant la machine asynchrone est commandé en pleine onde.

Les interrupteurs $T_1, T_2, T_3, T'_1, T'_2, T'_3$ (IGBT) sont commandés à la fermeture et à l'ouverture par le système de contrôle. Ils sont supposés parfaits. L'état de leur commande est indiqué sur le document réponse 3.

On suppose la tension E_c constante.

Les intensités des courants i_1, i_2 et i_3 peuvent être assimilées à des grandeurs sinusoïdales de fréquence f et de valeur efficace I (voir le tracé de leurs chronogrammes sur le document réponse 3).



On note $\omega = 2\pi f$ et $\theta = \omega t$.

C.1 - Tracer sur le document réponse 3 les chronogrammes des tensions composées u_{12}, u_{23} et u_{31} .

C.2 - En se rappelant que $v_1 = \frac{u_{12} + u_{13}}{3}$, tracer sur le document réponse 3 le chronogramme de la tension simple v_1 .

C.3 - Déterminer, en vous appuyant sur les chronogrammes, le déphasage φ_1 entre v_{1f} (fondamental de v_1) et i_1 . Dire clairement si i_1 est en avance ou en retard sur v_{1f} .

C.4 - La décomposition en série de Fourier de v_1 est :

$$v_1(t) = \frac{2E_c}{\pi} \left(\sin\theta + \frac{\sin(5\theta)}{5} + \frac{\sin(7\theta)}{7} + \frac{\sin(11\theta)}{11} + \dots \right).$$

Exprimer la puissance active P_c absorbée par la machine asynchrone en fonction de E_c et I .

C.5 - Pour $P_c = 1155 \text{ W}$ et $E_c = 318 \text{ V}$, déterminer la valeur de I .

C.6 - Sachant que l'on néglige les pertes dans l'onduleur, calculer $\langle i_E \rangle$.

Partie D - Etude de la chaîne auxiliaire

La partie étudiée de la chaîne auxiliaire est représentée en annexe 1.

On suppose que :

- la batterie a une force électromotrice constante de valeur $E_B = 96\text{V}$; sa résistance interne est négligeable.
- la tension aux bornes du capteur solaire est constante et égale à $U_C = 192,5\text{V}$.

D.1 - Charge de la batterie : Hacheur série

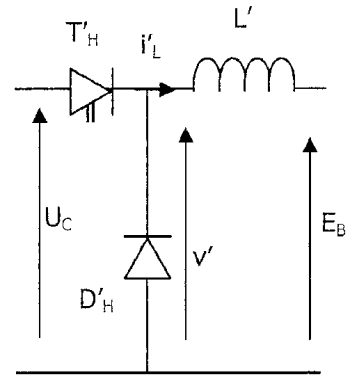
Le hacheur série assure la charge des batteries à courant moyen constant : $\langle i'_L \rangle = 5\text{A}$.

Le transistor T'_H est commandé par le système de contrôle :

- il devient passant lorsque i'_L descend à 4A ,
- il se bloque lorsque i'_L atteint 6A .

On donne $L' = 1\text{mH}$.

On néglige la résistance de la bobine.



D.1.1 - Exprimer $d(i'_L)/dt$ quand T'_H conduit, puis quand T'_H ne conduit pas.

En déduire l'allure du chronogramme de i'_L .

D.1.2 - En supposant qu'à l'instant $t = 0$, i'_L est égale à 4A , tracer les chronogrammes de i'_L et de v' sur le document réponse 4.

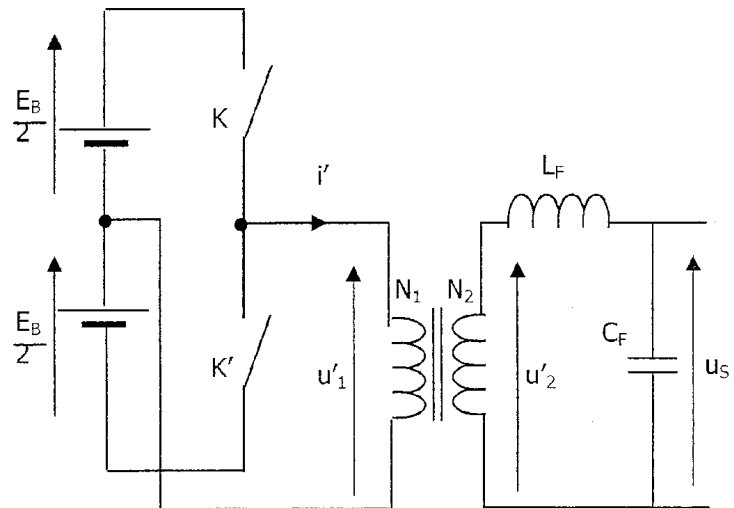
D.1.3 - Déterminer la fréquence de découpage du hacheur.

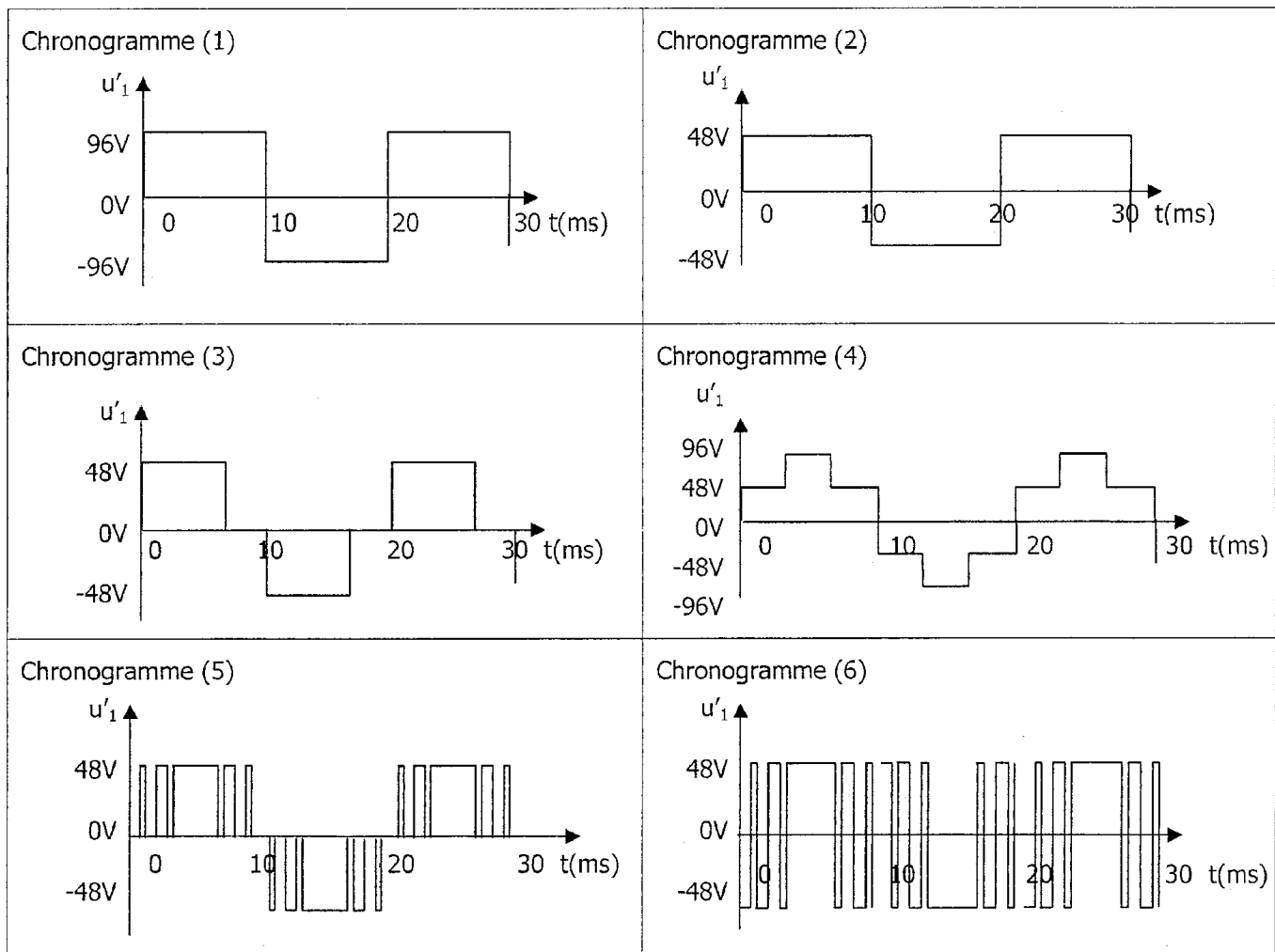
D.2 - Production d'une tension sinusoïdale

La partie de la chaîne auxiliaire qui génère une tension sinusoïdale $230\text{V}/50\text{Hz}$ à partir de la batterie pour la maintenance du site est représentée ci-contre.

On rappelle que : $E_B = 96\text{V}$.

D.2.1 - Sachant que les interrupteurs K et K' sont commandés de manière complémentaire, dire pour chacun des chronogrammes de u'_1 proposés ci-après, s'il est compatible avec le montage ci-contre.



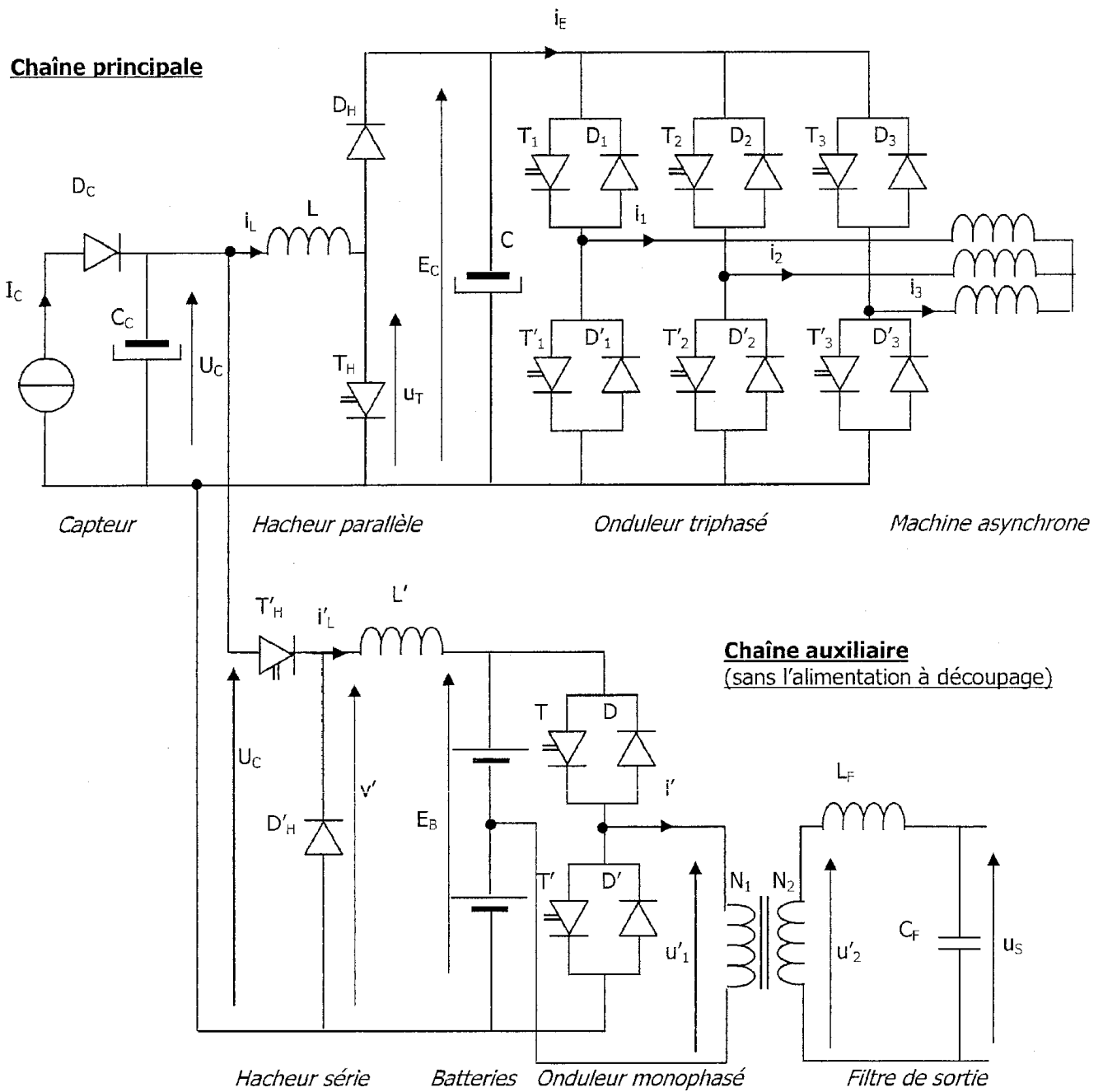


Dans l'installation réelle, la commande des interrupteurs K et K' génère le chronogramme (6). Lorsque l'état de charge de la batterie varie, la commande MLI permet de maintenir la valeur efficace du fondamental de u'_1 constamment égale à $U'_{1f} = 40V$.

D.2.2 - Calculer le rapport de transformation N_2/N_1 qui permet d'obtenir $U'_{2f} = 230V$. (On suppose le transformateur parfait).

D.2.3 - Quel est le rôle du filtre de sortie (L_f, C_f) ?

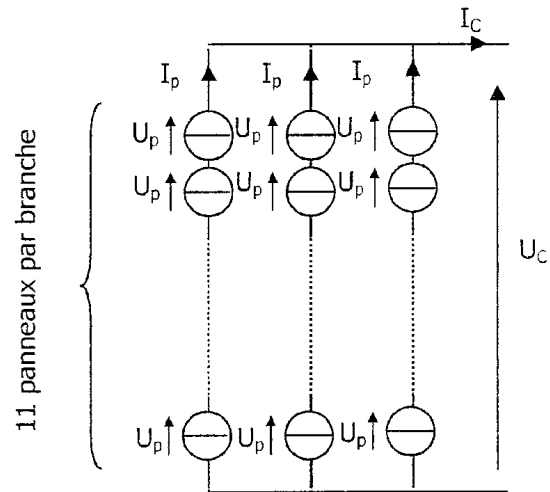
Annexe 1 – Schéma



Annexe 2 – Capteur solaire

Schéma de montage du capteur solaire

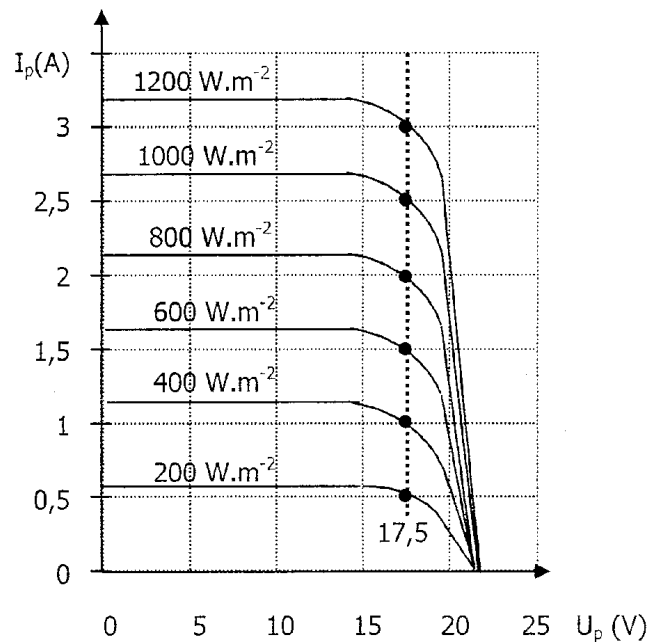
Le capteur solaire est constitué de 33 panneaux élémentaires de dimensions 1m x 0,4 m interconnectés comme représenté sur le schéma ci-contre.



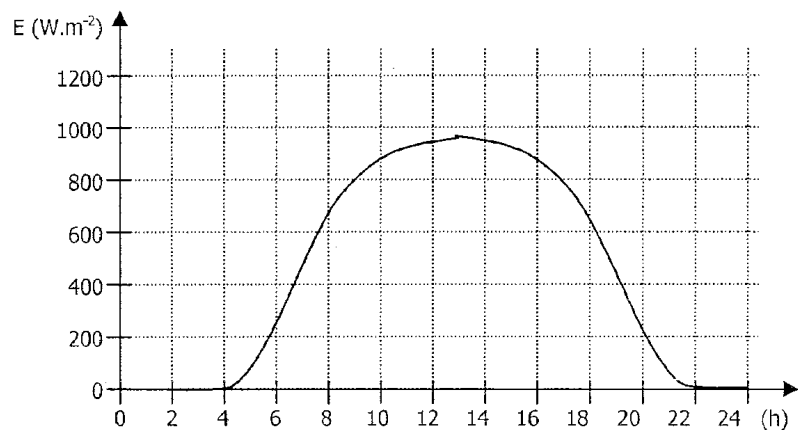
Caractéristiques électriques des panneaux solaires en fonction de l'éclairement

La caractéristique électrique de chaque panneau solaire dépend de l'ensoleillement E exprimé en $W.m^{-2}$.

Les points sur les caractéristiques électriques identifient les points de fonctionnement correspondant à une puissance maximale pour chaque valeur de l'ensoleillement.



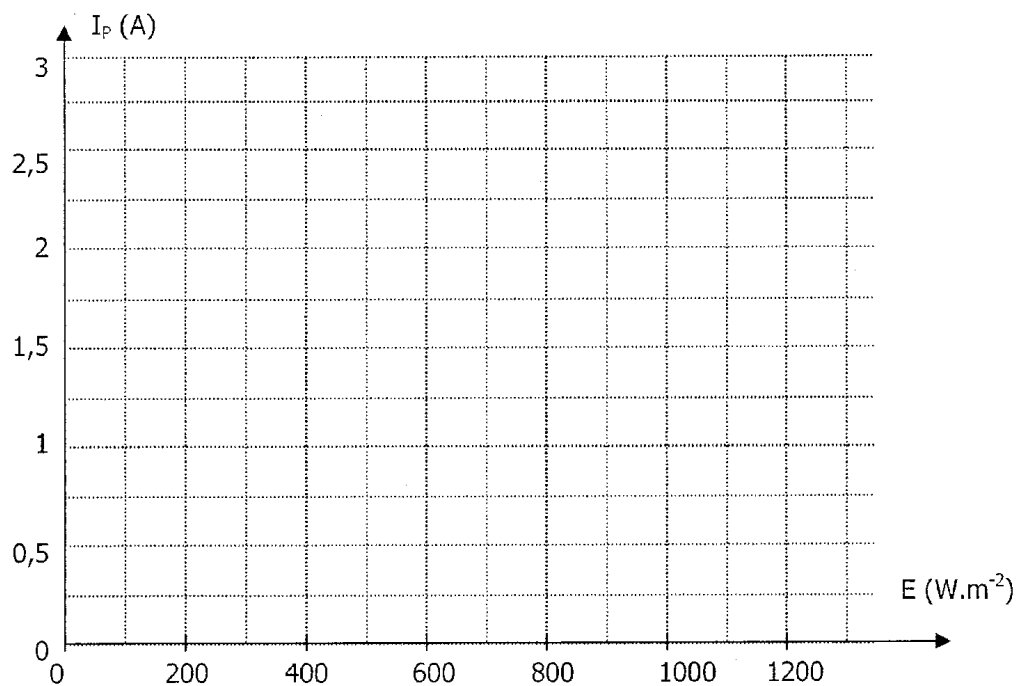
Ensoleillement en fonction de l'heure au cours d'une journée type



Document réponse 1 – partie A

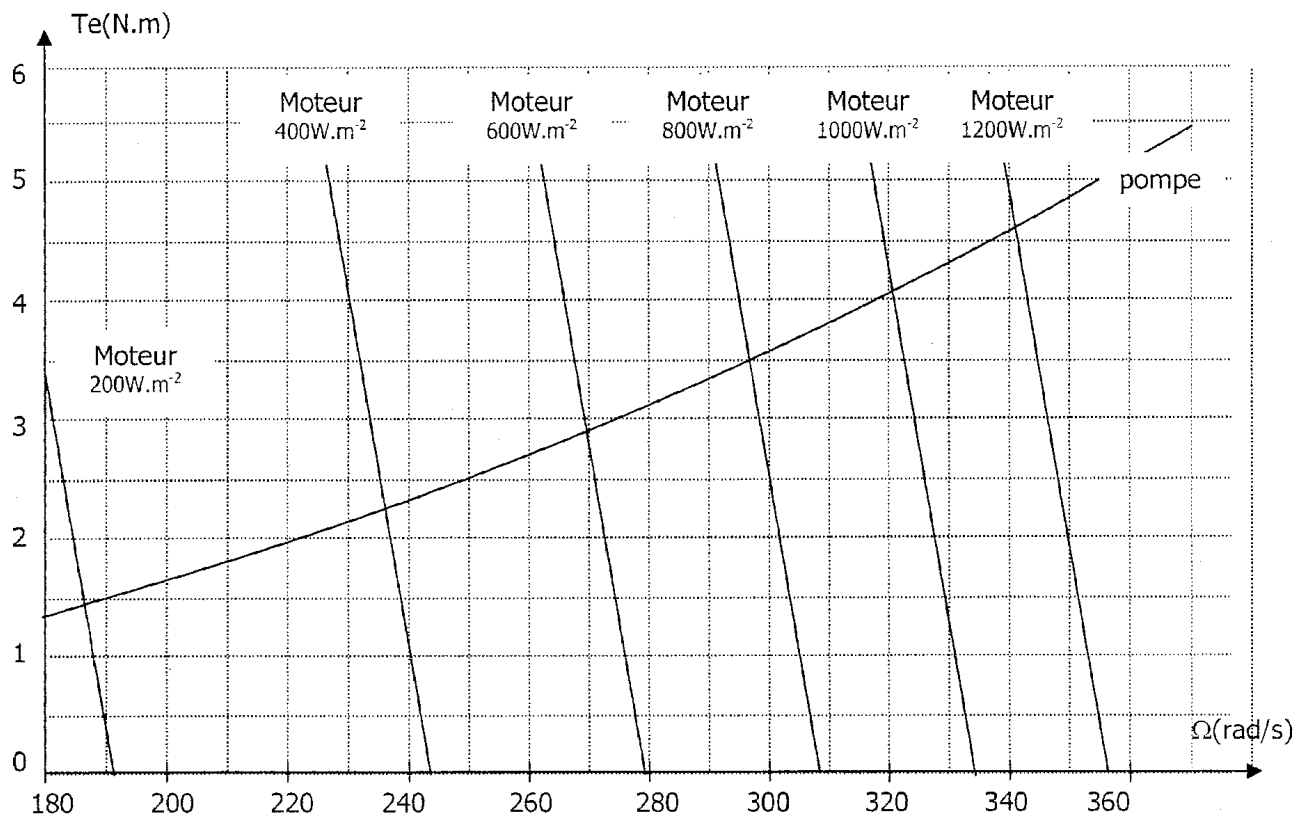
Question A.2.3

Intensité du courant délivré par un panneau en fonction de l'éclairement



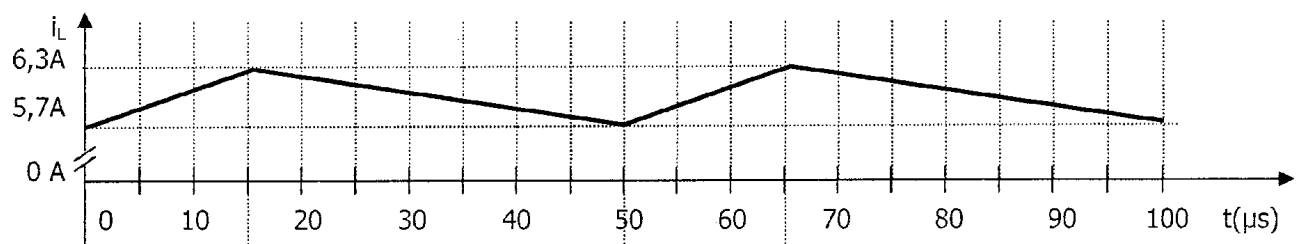
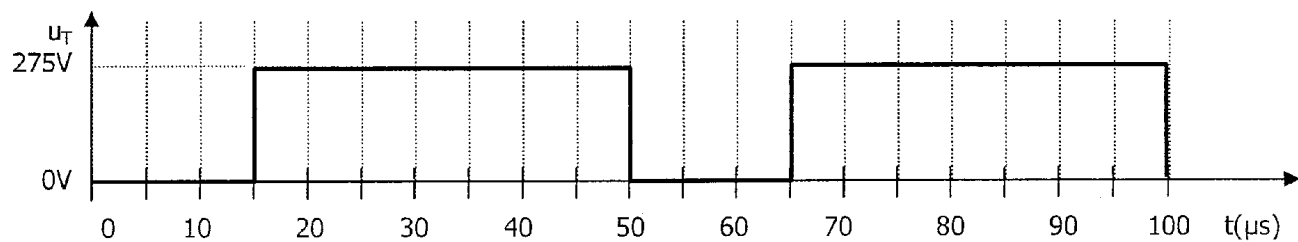
Question A.3.2

Caractéristiques mécaniques de la pompe et du moteur pour différentes valeurs de l'éclairement

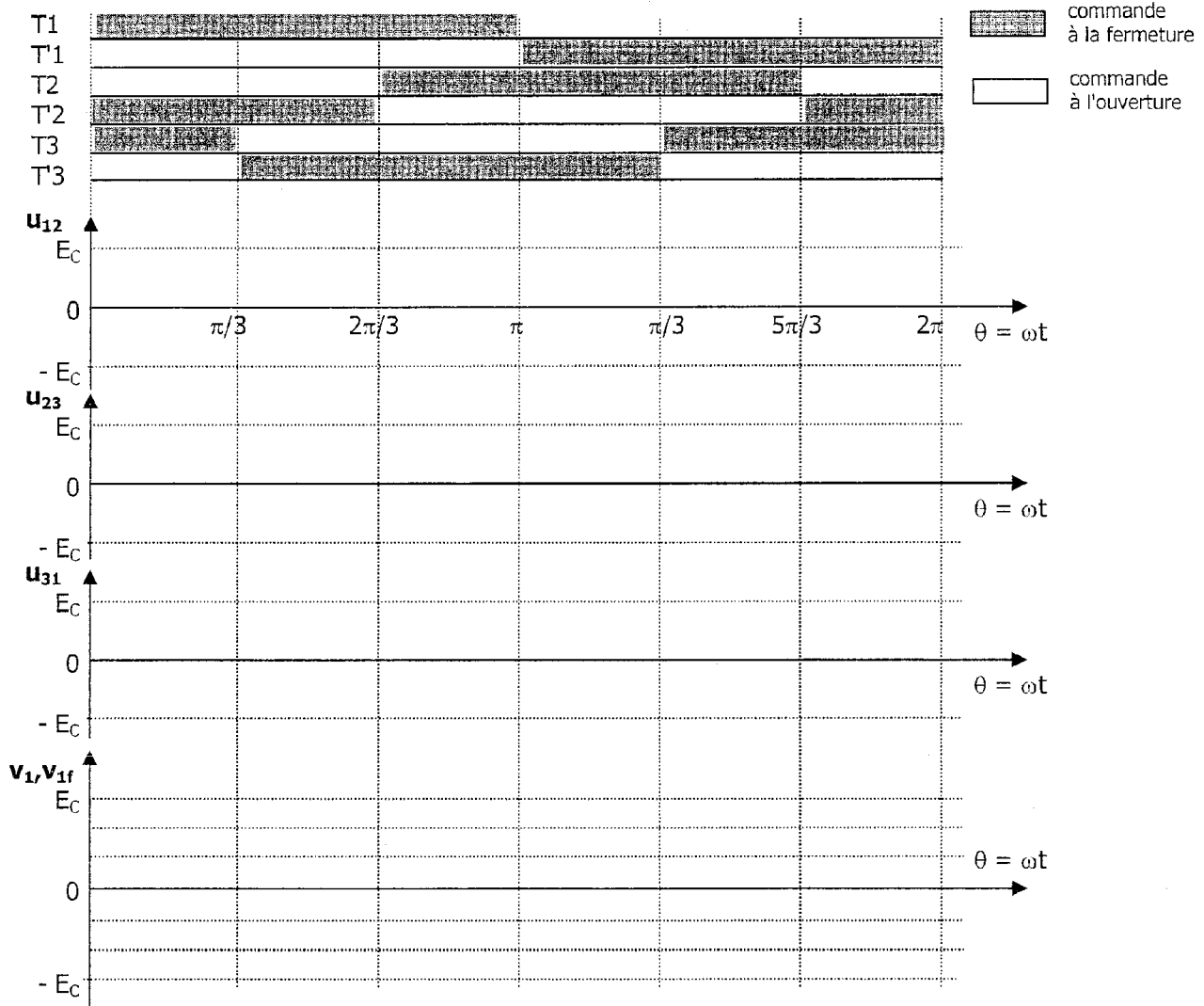


Document réponse 2 - Partie B

Question B.1.1



Document réponse 3 – Partie C



Question D.1.2

