



Samedi 12 avril 2025

OPTION PHYSIQUE

MP - MPI - PC - PSI - PT - TSI

DURÉE : 2 HEURES

Conditions particulières :
Calculatrices et documents interdits.

Information aux candidats :

- Le sujet se compose de trois parties indépendantes les unes des autres, que le candidat est libre d'aborder dans l'ordre de son choix.
- Les applications numériques attendues sont des ordres de grandeur à exprimer avec un seul chiffre significatif, ce qui permettra d'utiliser des arrondis.
- Sauf si la question le demande explicitement, les résultats donnés sans aucun élément d'explication ou de justification ne se verront attribuer aucun point.
- Des points à hauteur de 5 % du barème récompenseront la qualité d'ensemble de la copie : présentation, lisibilité, clarté des raisonnements et de la rédaction.

Exploitant une ressource inépuisable, l'électricité photovoltaïque permet de répondre aux besoins énergétiques des populations tout en réduisant leur dépendance aux combustibles fossiles. Grâce à un effort intense de recherche et d'innovation, l'énergie solaire est toujours plus accessible, abordable et durable. Les puissances installées connaissent aujourd'hui une croissance exponentielle : près de 600 GW de capacité nouvelle ont été installés en 2024, après 450 GW en 2023 et 240 GW en 2022.

Ce sujet aborde diverses problématiques ayant trait à l'électricité photovoltaïque au travers de trois parties indépendantes les unes des autres :

- La première partie étudie la transformation de la tension délivrée par un module photovoltaïque en une tension pouvant être injectée sur un réseau électrique. Elle exploite des notions d'**électronique**.
- La seconde partie s'intéresse au transformateur permettant de convertir de l'électricité basse tension en électricité haute tension. Elle fait appel à des outils de **magnétostatique** et d'**induction**.
- Enfin, la troisième partie traite d'une méthode originale de stockage énergétique sous forme d'énergie potentielle de pesanteur. Elle s'appuie donc sur des compétences de **mécanique**.

■ ■ ■ I - Conversion de la tension continue délivrée par un module photovoltaïque en une tension alternative

Pour que l'énergie produite par une centrale solaire puisse être consommée par les appareils électriques, il faut transformer la tension constante E délivrée par un module photovoltaïque (ou plus précisément une association de modules) en tension alternative $s(t)$ de fréquence $f_0 = 50$ Hz. De manière simplifiée, cette transformation se décompose en trois étapes :

- tout d'abord, un onduleur positionné après les panneaux photovoltaïques transforme le signal continu E en un signal alternatif $u(t)$;
- pour que la tension de sortie soit la plus proche possible d'un signal sinusoïdal, une inductance de lissage L est insérée en sortie de l'onduleur ;
- une dernière étape, qui sera étudiée dans la partie II, consiste à amplifier la tension $v(t)$ pour obtenir la tension $s(t)$ voulue.

Un schéma d'ensemble du dispositif est représenté figure 1. Un onduleur est un convertisseur statique, utilisant une structure en pont à quatre interrupteurs commandés périodiquement et de manière indépendante. De manière très simplifiée, on modélisera dans cette partie le transformateur et le réseau de distribution qui le suit par une simple résistance R soumise à la tension v . L'association avec l'inductance de lissage forme donc une cellule R, L de tension d'entrée u et de sortie v .

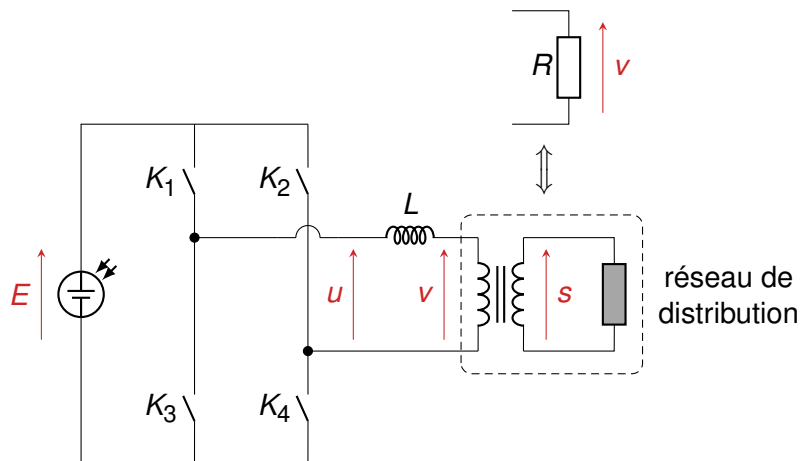


FIGURE 1 – Schéma de principe de l'installation électrique.

I.A - Tension de sortie de l'onduleur

Q1 - Justifier que, pour des raisons de sécurité, il ne faut pas que K_1 et K_3 soient fermés simultanément, et de même pour K_2 et K_4 .

Q2 - Montrer que la tension u peut prendre les valeurs 0 , E et $-E$ en indiquant sur le **document réponse**, page 10, l'état ouvert/fermé des quatre interrupteurs pour chacune de ces valeurs.

Posons $T_0 = 1/f_0$ la période de commutation des interrupteurs. Sur une période, ils sont commandés de telle sorte que la tension u vaille E entre 0 et $T_0/3$, puis 0 entre $T_0/3$ et $T_0/2$, puis $-E$ entre $T_0/2$ et $5T_0/6$, et enfin 0 jusqu'à T_0 .

Q3 - Représenter sur le **document réponse**, page 10, la tension u en fonction de t sur deux périodes consécutives.

Q4 - La figure 2 donne trois propositions de spectres pouvant correspondre à la tension u . Laquelle de ces propositions est la bonne ? Justifier chaque proposition fautive.

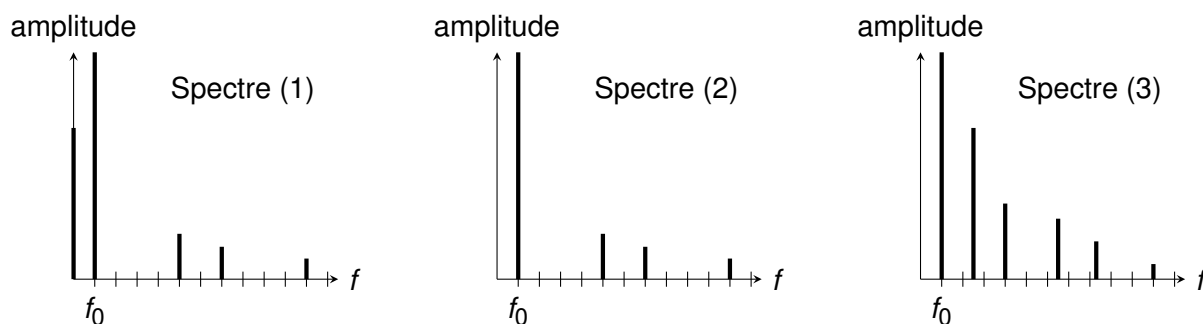
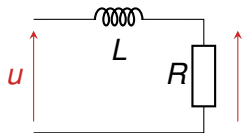


FIGURE 2 – Spectres à identifier pour le signal $u(t)$.

I.B - Filtrage par la cellule R, L



Pour améliorer les performances de l'installation, la tension u de sortie de l'onduleur est lissée par la cellule R, L pour produire la tension v , que l'on souhaite rendre aussi proche que possible d'une tension sinusoïdale.

Q5 - Comment la cellule R, L doit-elle transformer le spectre de la tension u ? En déduire le type de filtrage à réaliser.

Q6 - Établir la fonction de transfert harmonique du filtre $\underline{H} = \underline{V}/\underline{U}$. Identifier les expressions de H_0 et ω_c permettant de l'écrire sous la forme

$$\underline{H} = \frac{H_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}}.$$

Q7 - Comment choisir la fréquence de coupure $f_c = \omega_c/2\pi$ en fonction de f_0 ?

I.C - Calcul numérique de la tension lissée

Cherchons maintenant à déterminer la tension lissée v à partir de la tension u fournie par l'onduleur.

Q8 - Montrer que u et v sont reliées par l'équation différentielle

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\tau} v = \frac{u}{\tau}.$$

Exprimer le temps caractéristique τ en fonction de R et L d'une part et de ω_c d'autre part.

Compte tenu de l'allure de la tension u , cette équation ne peut pas être résolue à la main : on se tourne donc vers une approche numérique. On utilise le schéma d'Euler explicite, qui permet de calculer de proche en proche les valeurs $v_n = v(t_n)$ à un ensemble d'instants t_n séparés d'un pas de temps Δt à partir des valeurs connues $u_n = u(t_n)$. Rappelons que ce schéma numérique consiste à approximer la dérivée par le taux de variation entre les instants n et $n + 1$.

Q9 - Appliquer le schéma d'Euler à l'équation différentielle obtenue question 8. En déduire la relation de récurrence donnant v_{n+1} :

$$v_{n+1} = \frac{\Delta t}{\tau} u_n + \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau}\right) v_n.$$

Q10 - Écrire en Python les quelques lignes de code permettant de construire une liste v contenant les valeurs de v_n . On suppose avoir déjà défini le pas de temps Δt , le temps caractéristique τ et une liste u contenant les valeurs de u_n aux instants t_n . On supposera $v_0 = 0$.

Q11 - Le code précédent utilisé pour différentes valeurs de τ donne les allures représentées sur la figure 3. Quelle valeur de τ parmi celles représentées vous semble la plus adaptée au bon fonctionnement de l'onduleur ? Interpréter en lien avec la partie I.B.

Q12 - Quel problème se pose si τ est trop petit ? s'il est trop grand ? Interpréter en termes de spectre et de filtrage en s'appuyant sur la partie I.B.

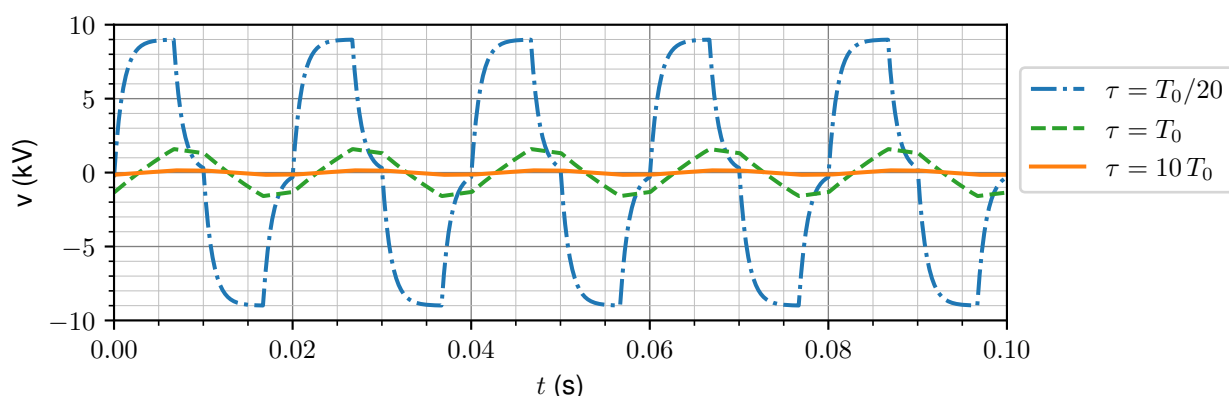


FIGURE 3 – Tension lissée v en fonction du temps.

■ ■ ■ II - Transformation de la tension de sortie en très haute tension

Dans une centrale solaire de forte puissance, la tension de sortie peut avoir une valeur efficace de l'ordre de 1 kV, ce qui est élevé mais demeure insuffisant pour le transport de l'électricité sur des grandes distances, qui exploite des niveaux de tension allant de 50 à 1100 kV.

La conversion est assurée par un transformateur, dont la structure repose sur deux bobinages imbriqués l'un dans l'autre mais indépendants électriquement. En première approche, on les modélise par deux solénoïdes droits comptant un nombre de spires différent placés l'un à l'intérieur de l'autre, comme schématisé figure 4.

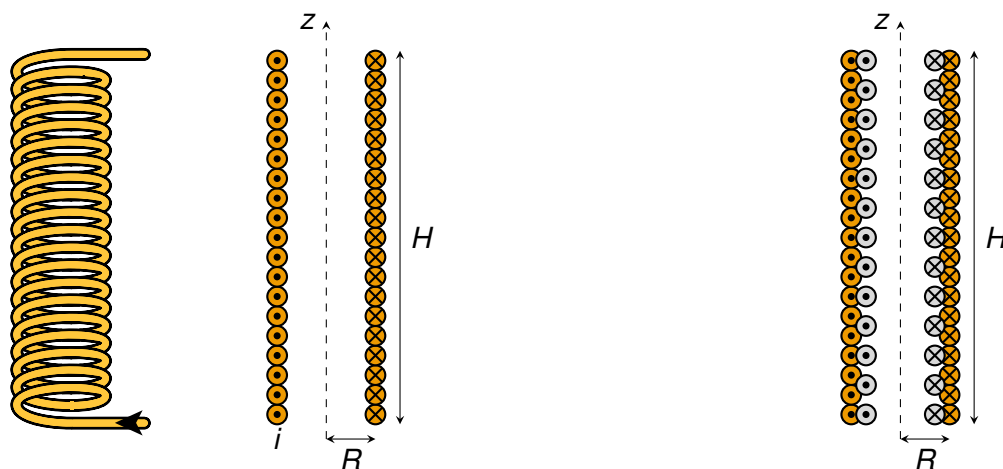


FIGURE 4 – Modélisation du transformateur. Gauche : schéma d'un solénoïde unique. Droite : modélisation du transformateur par deux solénoïdes imbriqués.

II.A - Inductance propre d'un solénoïde infini

Considérons pour commencer *un seul* solénoïde de rayon R , comptant N spires, comme schématisé à gauche de la figure 4. On suppose sa hauteur H suffisante pour négliger les effets de bord dans le calcul du champ magnétique. Il est parcouru par un courant i de fréquence suffisamment faible pour pouvoir travailler comme en régime statique (hypothèse d'ARQS magnétique). On se place en coordonnées cylindriques d'axe (Oz) .

Q13 - Justifier que le champ magnétique créé par le solénoïde n'a qu'une seule composante non-nulle selon $\vec{e}_z$ et que celle-ci ne dépend que de la distance r à l'axe du solénoïde : $\vec{B} = B_z(r) \vec{e}_z$.

Q14 - Énoncer le théorème d'Ampère et ses hypothèses. Comment le signe du courant enlacé est-il déterminé ? La réponse pourra être présentée sous forme d'un schéma.

Q15 - On admet que le champ magnétique est nul à l'extérieur du solénoïde : $B_z(r > R) = 0$. Établir l'expression de B_z pour $r < R$. Le contour utilisé sera représenté sur le **document réponse**, page 10.

Q16 - Calculer le flux magnétique ϕ au travers d'une spire du solénoïde, puis le flux propre ϕ_p du solénoïde. En déduire l'expression de son inductance propre L :

$$L = \mu_0 N^2 \frac{\pi R^2}{H}.$$

II.B - Inductance mutuelle des deux solénoïdes imbriqués

Considérons maintenant deux solénoïdes de même hauteur H , de rayons $R_2 \simeq R_1 = R$ quasiment égaux et mais comptant un nombre de spires N_1 et N_2 différent. Ces solénoïdes sont imbriqués l'un dans l'autre, comme représenté à droite de la figure 4, mais ne sont pas reliés électriquement. Le solénoïde 1 est parcouru par un courant i_1 , créant un champ $\vec{B}_1$.

Q17 - Calculer le flux $\phi_{1 \rightarrow 2}$ du champ $\vec{B}_1$ au travers d'une spire du solénoïde 2, puis le flux total $\phi_{1 \rightarrow 2}$ du champ $\vec{B}_1$ au travers du solénoïde 2.

Q18 - En déduire l'expression de l'inductance mutuelle M des deux solénoïdes :

$$M = \mu_0 N_1 N_2 \frac{\pi R^2}{H}.$$

II.C - Rapport de transformation

Du point de vue électrique, les deux solénoïdes constituant le transformateur peuvent être modélisés par deux bobines couplées inductivement comme schématisé figure 5. La première bobine est parcourue par un courant i_1 , et on note u_1 la tension à ses bornes, qui correspondrait à la tension v de la partie I. La tension aux bornes de la seconde bobine est notée u_2 , et alimente la ligne haute tension. On s'intéresse au rapport de transformation $m = u_2/u_1$, défini lorsque le transformateur est relié à une impédance infinie.

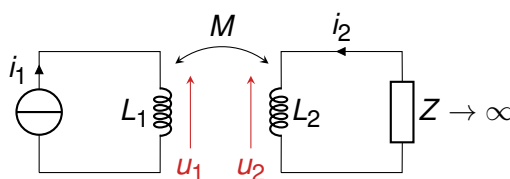


FIGURE 5 – Schéma électrique équivalent du transformateur.

Q19 - Exprimer en toute généralité les tensions u_1 et u_2 en fonction de L_1 , L_2 , M , i_1 et i_2 . Quelle conséquence a l'hypothèse d'impédance infinie sur le courant i_2 ? Simplifier en conséquence les expressions précédentes.

Q20 - En déduire l'expression du rapport de transformation $m = u_2/u_1$ en fonction du nombre de spires N_1 et N_2 des deux solénoïdes imbriqués.

Q21 - Un transformateur de sortie d'une centrale solaire assurant une conversion $1 \text{ kV} \rightarrow 1000 \text{ kV}$ compte typiquement 500 spires au primaire. Combien en compte-t-il au secondaire ?

III - Stockage gravitaire d'énergie

L'énergie solaire est une source d'énergie intermittente et non pilotable, dont les pics de production ne coïncident pas forcément avec les pics de demande. L'utiliser massivement pose donc un défi majeur en termes de stockage énergétique. Cette partie étudie un système original conçu par l'entreprise Gravitricity proposant de stocker l'énergie sous forme d'énergie potentielle de pesanteur. Il est pour le moment au stade de la recherche et développement, et seul un démonstrateur de petite taille a été construit, voir figure 6, installé dans le port d'Édimbourg (Écosse) en 2021. Le principe consiste à soulever un bloc de béton lors d'une phase de surproduction électrique, puis à faire chuter ce bloc en entraînant un alternateur lorsque la demande excède les capacités de production.

Q22 - Définir ce qu'est une source d'énergie « intermittente et non pilotable ». Citer un exemple de source d'énergie pilotable.

Q23 - Citer un autre dispositif permettant le stockage d'énergie, et préciser sous quelle forme l'énergie y est stockée.

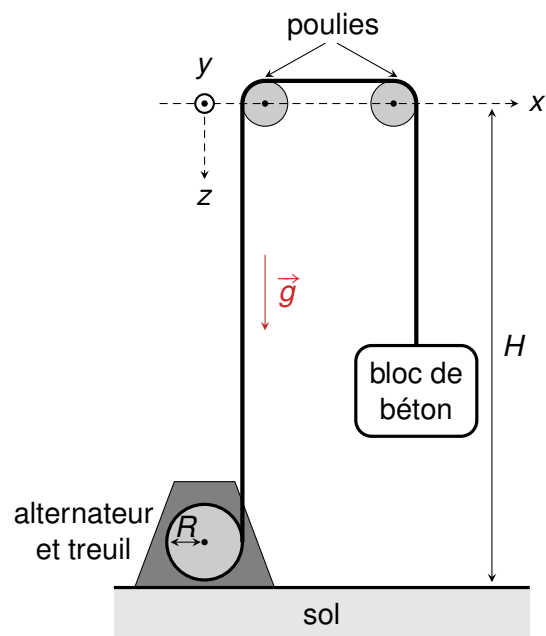


FIGURE 6 – Démonstrateur Gravitricity.

III.A - Fonctionnement du système

Le bloc de béton de masse $m = 50$ tonnes est accroché à l'extrémité d'un câble, dont l'autre extrémité est reliée au rotor d'un alternateur par l'intermédiaire d'un treuil de rayon $R = 50$ cm. Il peut se déplacer sur une hauteur $H = 7$ m. En période de stockage, un moteur permet de soulever le bloc. Dans une période de déstockage, le bloc est lâché, ce qui met en mouvement le rotor de l'alternateur et permet de produire de l'énergie électrique. L'ensemble des pièces en rotation sera simplement appelé « alternateur » par la suite, dont on note J le moment d'inertie équivalent par rapport à l'axe (Oy) .

Le mouvement du bloc de béton lors du déstockage peut être décomposé en trois temps :

- Au moment du lâcher, l'alternateur n'est pas encore connecté au réseau électrique. Le bloc suit un mouvement de chute libre jusqu'à ce que l'alternateur atteigne une vitesse de rotation suffisante pour permettre le couplage avec le réseau.
- Une fois le couplage réalisé, la production électrique se traduit par un couple résistant $\Gamma_{\text{alt}} < 0$ subi par l'alternateur, dont la vitesse de rotation se stabilise à une valeur constante.
- Enfin, lorsque le bloc s'approche du sol, un couple de freinage supplémentaire est appliqué pour arrêter sa chute.

Tous les frottements sont négligés. Les poulies et le câble sont supposés idéaux, ce qui permet de considérer la tension T du câble uniforme et implique que la vitesse v de chute du bloc de béton est reliée à la vitesse de rotation Ω de l'alternateur par

$$v = R\Omega.$$

Q24 - Appliquer le principe fondamental de la dynamique au bloc de béton.

Q25 - La deuxième équation régissant le fonctionnement du dispositif s'écrit

$$J \frac{d\Omega}{dt} = RT + \Gamma_{\text{alt}}.$$

Comment s'appelle la loi physique utilisée pour l'établir ? Que représente le premier terme « RT » du membre de droite ? Justifier son expression.

III.B - Étude de la phase de démarrage

Le bloc de béton est lâché à l'instant $t = 0$ depuis la position $z = 0$ avec une vitesse nulle. L'alternateur n'est alors pas relié au réseau, donc $\Gamma_{\text{alt}} = 0$.

Q26 - Montrer que le mouvement de chute se fait à accélération constante

$$a_0 = \frac{g}{1 + \frac{J}{mR^2}}.$$

Q27 - En déduire les expressions de $v(t)$ et $z(t)$ en fonction de a_0 .

Q28 - Cette phase de démarrage se termine à l'instant t_0 où la vitesse de rotation Ω atteint une valeur seuil Ω_0 qui permet de coupler l'alternateur au réseau électrique. Exprimer $z(t_0)$ en fonction de a_0 et Ω_0 notamment.

III.C - Étude de la phase de production proprement dite

On s'intéresse désormais à la deuxième phase du mouvement : l'alternateur est relié au réseau et tourne à vitesse constante Ω_0 . Le dispositif produit une puissance électrique $\mathcal{P}_e = 250 \text{ kW}$. On suppose que toute la puissance mécanique prélevée est restituée au réseau électrique, si bien que

$$\Gamma_{\text{alt}} = -\frac{\mathcal{P}_e}{\Omega_0}.$$

Q29 - Exprimer la vitesse de chute v_0 au cours de cette phase en fonction de $\mathcal{P}_e$, m et g .

Q30 - On donne $a_0 = 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Estimer numériquement v_0 , t_0 et $z(t_0)$.

Q31 - En supposant la phase de freinage de durée négligeable, estimer la durée pendant laquelle le démonstrateur fournit réellement de l'énergie avant d'être totalement déchargé. Commenter.

III.D - Vers une installation à plus grande échelle

Le démonstrateur a obtenu des résultats probants, et permis à l'entreprise de lever des fonds pour un déploiement à plus grande échelle. Elle envisage notamment d'utiliser un puits d'accès à une mine désaffectée pour déplacer des blocs de masse totale $m' = 12\,000$ tonnes sur une profondeur H' de l'ordre de 750 m. La puissance maximale fournie par le dispositif serait alors de 4 MW.

Q32 - Estimer l'énergie maximale que le dispositif est en mesure de stocker puis restituer.

Q33 - Un foyer français consomme une énergie électrique de l'ordre de 12 kWh par jour, hors chauffage et production d'eau chaude sanitaire. Commenter le résultat de la question précédente.

Q34 - Estimer le temps de fonctionnement du dispositif à puissance maximale avant qu'il ne soit complètement déchargé. Le résultat sera donné en heures.

Q35 - Conclure : quel peut-être l'intérêt d'un tel dispositif dans l'optique d'une intégration de sources d'énergie intermittentes dans le mix électrique ?



Ce document réponse est à insérer dans votre copie en fin d'épreuve. Vous devez commencer par y reporter votre numéro de candidat avant toute réponse.

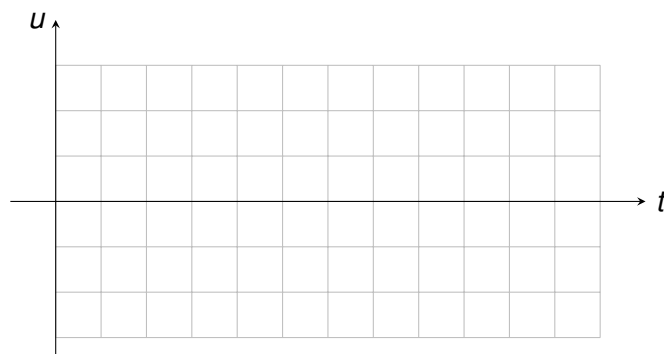
Numéro de candidat :

■ ■ ■ Document réponse à insérer dans la copie

Q2 - Montrer que la tension u peut prendre les valeurs 0 , E et $-E$ en indiquant l'état ouvert/fermé des quatre interrupteurs pour chacune de ces valeurs.

Valeur de u	Interrupteur K_1	Interrupteur K_2	Interrupteur K_3	Interrupteur K_4
0				
E				
$-E$				

Q3 - Représenter la tension u en fonction de t sur deux périodes consécutives.



Q15 - Représenter le contour utilisé pour le calcul du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde.

