CONCOURS BLANC 2025

ÉPREUVE de PHYSIQUE

Durée de l'épreuve : 4 heures
L'usage de la calculatrice et de tout dispositif électronique est interdit.

Les candidats sont priés de mentionner de façon apparente sur la première page de la copie :

PHYSIQUE - PCSI

Les candidats sont priés de mentionner de façon apparente à la fin de la copie,
FIN

L'énoncé de cette épreuve comporte 12 pages de texte.

Si, au cours de l'épreuve, un.e candidat.e repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

Informations aux candidat.e.s :

- Le sujet est constitué de trois parties totalement indépendantes entre elles, que le.la candidat.e est libre d'aborder dans l'ordre de son choix.
- Les données numériques et valeurs des constantes physiques nécessaires sont regroupées en fin d'énoncé.
- Pour les applications numériques demandées on se contentera de 2 chiffres significatifs.
- Sauf si la question le demande explicitement, les résultats donnés sans aucun élément d'explication ou de justification ne se verront attribuer aucun point.

I Moteur de Stirling *(D'après Centrale-Supélec TSI 2021)*

Au début du XIX^{e} siècle, les chaudières des machines à vapeur, soumises à de trop fortes pressions, explosent assez souvent. Robert Stirling a ainsi imaginé en 1816 un moteur dépourvu de chaudière où la chaleur est apportée de l'extérieur de la machine (moteur à « air chaud»). L'utilisation de ce moteur restera limitée, en particulier en raison de la trop faible puissance des modèles proposés, insuffisante pour concurrencer la machine à vapeur et le moteur à combustion interne.

Le moteur Stirling bénéficie actuellement d'un nouvel intérêt car il présente de nombreux avantages. Il peut utiliser n'importe quelle source d'énergie produisant de la chaleur, combustion de tout matériau mais également énergie solaire, nucléaire, géothermique, etc. Il produit peu de vibrations et est silencieux (pas d'explosion interne ni d'échappement gazeux, absence de valves et soupapes). Grâce à l'utilisation de matériaux modernes qui supportent de grands écarts de température et qui améliorent les transferts thermiques, son rendement est comparable, voire supérieur à celui des moteurs à combustion interne. Son entretien est facile et il s'use moins que les moteurs à explosion. La conception d'un moteur Stirling est cependant délicate, en raison des gros écarts de température qu'il doit supporter et de la nécessité d'une excellente étanchéité ; son prix reste donc élevé. Par ailleurs, il est difficile de faire varier son régime. Son emploi reste ainsi cantonné à des utilisations de niches : générateur d'électricité en milieux extrêmes, propulseur pour sous-marins, etc. Sa réversibilité conduit à l'utiliser comme pompe à chaleur capable de refroidir à -200°C ou de chauffer à plus de 700°C.

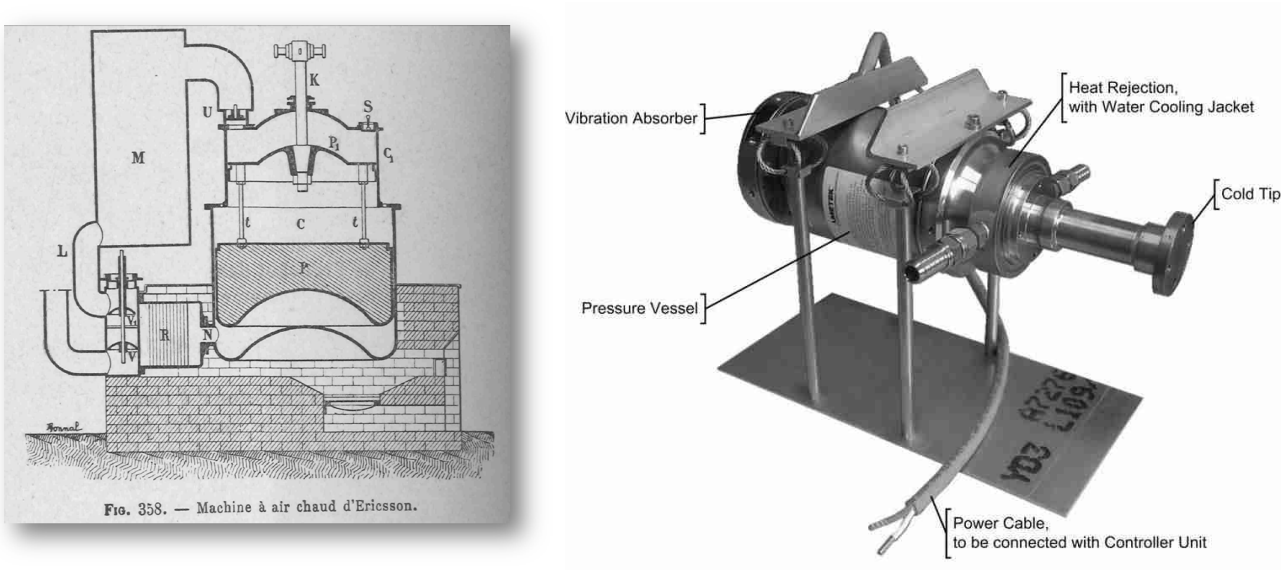


Figure 7 Gravure de 1899 d'un Moteur Ericsson M1851 avec régénérateur type Stirling (Wikipedia) et

FIGURE 1 – Gravure de 1899 d'un Moteur Ericsson M1851 avec régénérateur type Stirling (Wikipedia) et moteur Stirling de l'entreprise Sunpower fournissant le projet KRUSTY (ResearchGate)

I.A Description du moteur

Une enceinte étanche est séparée en deux chambres, une chambre chaude (chauffée par l'extérieur), de volume maximal V_1, et une chambre froide équipée d'un dissipateur thermique (ailettes), de volume maximal V_2. Chaque chambre est dotée d'un piston permettant de faire varier son volume et le fluide peut circuler librement d'une chambre à l'autre. Le piston de la chambre froide est le piston de travail, il entraine le piston de la chambre chaude appelé « déplaceur » car son rôle est de faire circuler le fluide entre les deux chambres. Lors du transvasement, le fluide passe de la chambre chaude à la température T_3 à la chambre froide à la température $T_1 < T_3$ et réciproquement.

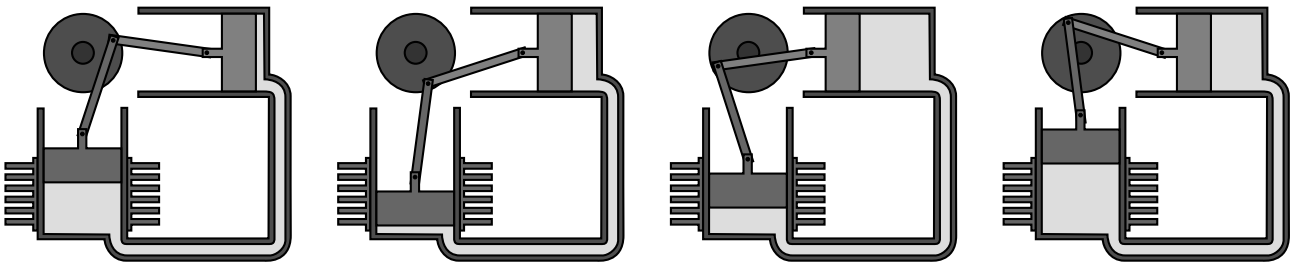


FIGURE 2 – Phases de fonctionnement d'un moteur Stirling de type alpha (d'après Wikipedia)

Le mouvement du gaz peut être décrit par 4 phases plus ou moins distinctes (figure 2) :

— une phase de compression, pendant laquelle le volume de la chambre chaude est minimal, le fluide, entièrement situé dans la zone froide, est comprimé par le piston de travail dans sa course vers le bas ;

— une fois le piston de travail au point mort bas, le déplaceur est ramené à gauche, ce qui a pour effet de transvaser le fluide comprimé, qui passe de la zone froide vers la zone chaude et reçoit un transfert thermique de la source externe ;

— une phase de détente, pendant laquelle le fluide se détend dans le volume d'expansion où il continue d'être chauffé. Cette détente a pour effet de repousser le déplaceur et le piston de travail ;

— une fois que le piston de travail a atteint le point mort haut, le déplaceur est ramené à droite, ce qui a pour effet de transvaser le fluide de la zone chaude (volume d'expansion) vers la zone froide (volume de compression). Au cours de ce transfert, le fluide cède de la chaleur au refroidisseur.

Un cycle réel d'un moteur de Stirling est représenté dans le diagramme (p, V) en figure 9 du document réponse.

Q1. Justifier que ce cycle est celui d'un moteur.

Q2. Estimer graphiquement la valeur du travail fourni par le moteur pendant un cycle.

I.B Modélisation du cycle

On étudie le cycle de Stirling idéal. Au cours de celui-ci, n moles de gaz parfait de coefficient adiabatique γ subissent les transformations suivantes :

— une compression $(1 \to 2)$ isotherme réversible à la température T_1,

— un échauffement $(2 \to 3)$ isochore jusqu'à l'état 3 de température T_3,

— une détente $(3 \to 4)$ isotherme réversible à la température T_3,

— un refroidissement $(4 \to 1)$ isochore jusqu'à l'état 1 .

Il n'y a pas d'autre travail que celui des forces de pression.

Q3. Représenter sur la figure 9 du document réponse, à rendre avec la copie, l'allure du diagramme correspondant au cycle idéal.

On note $r = \dfrac{V_1}{V_2}$ le rapport de compression entre les volumes fixés par construction. On rappelle que la capacité thermique à volume constant d'un gaz de n moles de gaz parfait vaut $C_V = \dfrac{nR}{\gamma - 1}$ où R est la constante des gaz parfaits.

Q4. Exprimer W_{12}, le travail reçu par le fluide au cours de la compression, en fonction de n, R, T_1 et r. En déduire le transfert thermique Q_{12} reçu par le fluide au cours de cette compression en fonction de n, R, T_1 et r. Préciser les signes de W_{12} et de Q_{12}.

Q5. Exprimer Q_{23}, le transfert thermique reçu par le fluide au cours de l'échauffement isochore, en fonction de n, R, T_1, T_3 et γ. Préciser son signe.

Q6. Exprimer W_{34}, le travail reçu par le fluide au cours de la détente, en fonction de n, R, T_3 et r. En déduire le transfert thermique Q_{34} reçu par le fluide au cours de cette détente en fonction de n, R, T_3 et r. Préciser les signes de W_{34} et Q_{34}.

Q7. Exprimer le transfert thermique Q_{41} reçu par le fluide au cours du refroidissement en fonction de n, R, T_1, T_3 et γ. Préciser son signe.

I.C Rendement du moteur

Q8. Définir puis exprimer le rendement idéal du moteur en fonction de T_1, T_3, r et γ.

Q9. Définir et exprimer le rendement de Carnot en fonction de T_1 et T_3.

En réalité, le moteur de Stirling utilisé dans le projet KRUSTY contient un régénérateur. Dans ce cas, la chaleur perdue par le gaz lors du refroidissement isochore $(4 \to 1)$ est récupérée par le gaz lors du chauffage isochore $(2 \to 3)$. Si le régénérateur est idéal, cette récupération est totale.

Q10. Que devient le rendement du cycle idéal dans ce cas ?

Dans les conclusions du test de la NASA du dispositif KRUSTY réalisé en 2018, les ingénieurs indiquent que l'efficacité des moteurs a évolué pendant l'expérience entre 30% et 50% de l'efficacité de Carnot. De plus, pour les deux moteurs combinés, la puissance électrique obtenue est d'environ 180 W.

Q11. En prenant une température chaude de 640°C et une température froide de 60°C et en supposant la conversion du travail mécanique en travail électrique parfaite, estimer numériquement la puissance thermique fournie par la source chaude aux deux moteurs de Stirling combinés.

II Électricité photovoltaïque *(EPITA 2025)*

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.

II.A 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, consiste à amplifier la tension $v(t)$ pour obtenir la tension $s(t)$ voulue.

Un schéma d'ensemble du dispositif est représenté figure 3. 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.

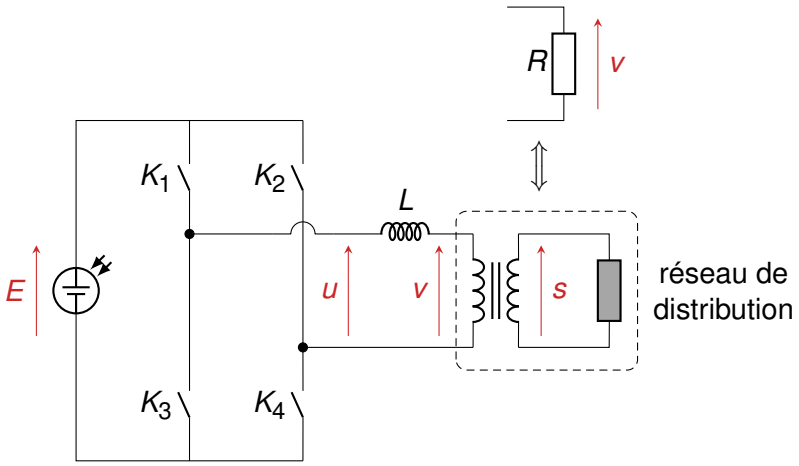


FIGURE 3 – Schéma de principe de l'installation électrique

II.A.1 Tension de sortie de l'onduleur

On donne Figure 4 la tension u en fonction du temps sur deux périodes consécutives.

FIGURE 4 – Tension de sortie de l'onduleur

Q1. La figure 5 donne trois propositions de spectres pouvant correspondre à la tension u. Laquelle de ces propositions est la bonne ? Justifier chaque proposition fausse.

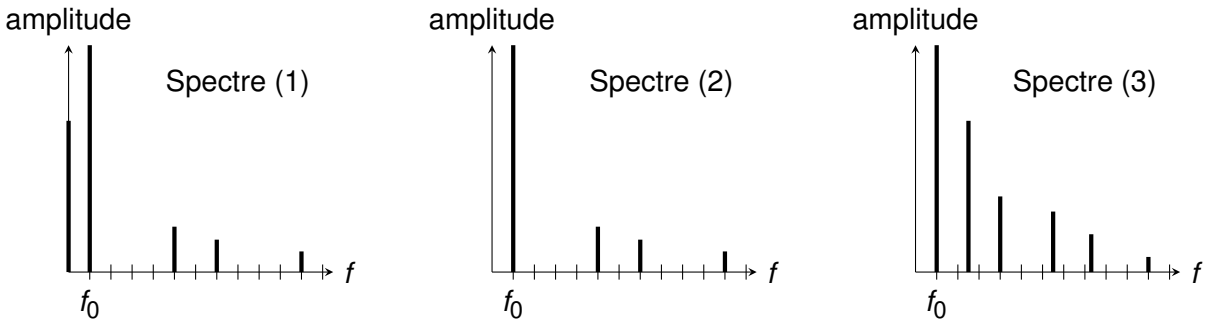
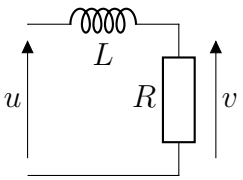


FIGURE 5 – Spectres à identifier pour le signal $u(t)$.

II.A.2 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.

Q2. Comment la cellule R, L doit-elle transformer le spectre de la tension u ? En déduire le type de filtrage à réaliser.

Q3. 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

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

Q4. Comment choisir la fréquence de coupure $f_c = \omega_c/2\pi$ en fonction de f_0 ?

II.B 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 6.

.

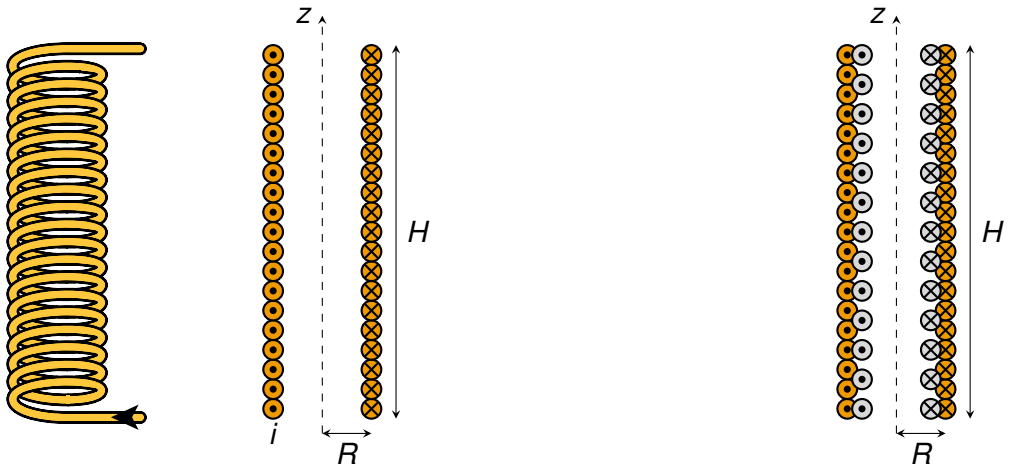


FIGURE 6 – Modélisation du transformateur. Gauche : schéma d'un solénoïde unique. Droite : modélisation du transformateur par deux solénoïdes imbriqués.

II.B.1 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 6. 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. On se place en coordonnées cylindriques d'axe (Oz).

Q5. À l'aide de l'étude des symétries et des invariances, justifier que le champ magnétique créé par le solénoïde n'a qu'une seule composante non nulle selon $\overrightarrow{e_z}$ et que celle-ci ne dépend que de la distance r à l'axe du solénoïde : $\overrightarrow{B} = B_z(r)\overrightarrow{e_z}$.

On peut montrer (cf 2e année avec le théorème d'Ampère) que le champ magnétique s'exprime $\overrightarrow{B} = \mu_0 \dfrac{N}{H} i \overrightarrow{u_z}$.

Q6. 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.2 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 6, mais ne sont pas reliés électriquement. Le solénoïde 1 est parcouru par un courant i_1, créant un champ $\overrightarrow{B_1}$.

Q7. Calculer le flux $\varphi_{1\to 2}$ du champ $\overrightarrow{B_1}$ au travers d'une spire du solénoïde 2 , puis le flux total $\phi_{1\to 2}$ du champ $\overrightarrow{B_1}$ au travers du solénoïde 2.

Q8. 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.B.3 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 7. 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 II.A. 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.

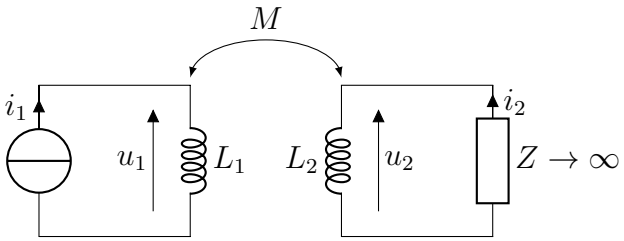


FIGURE 7 – Schéma électrique équivalent du transformateur.

Q9. Exprimer la force électromotrice induite dans chaque circuit, en fonction de L_1, M, i_1 et i_2 dans le circuit de gauche ; en fonction de L_2, M, i_1 et i_2 dans le circuit de droite.

Q10. Représenter le circuit électrique équivalent à chaque circuit. Indiquer également les tensions u_1 et u_2. En déduire en toute généralité les tensions u_1 et u_2 en fonction de L_1, L_2, M, i_1 et i_2.

Q11. Pourquoi l'hypothèse d'impédance infinie permet de considérer le courant i_2 nul ? Simplifier en conséquence les expressions précédentes.

Q12. 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.

Q13. Un transformateur de sortie d'une centrale solaire assurant une conversion 1kV → 1000kV compte typiquement 500 spires au primaire. Combien en compte-t-il au secondaire ?

II.C 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 8, 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.

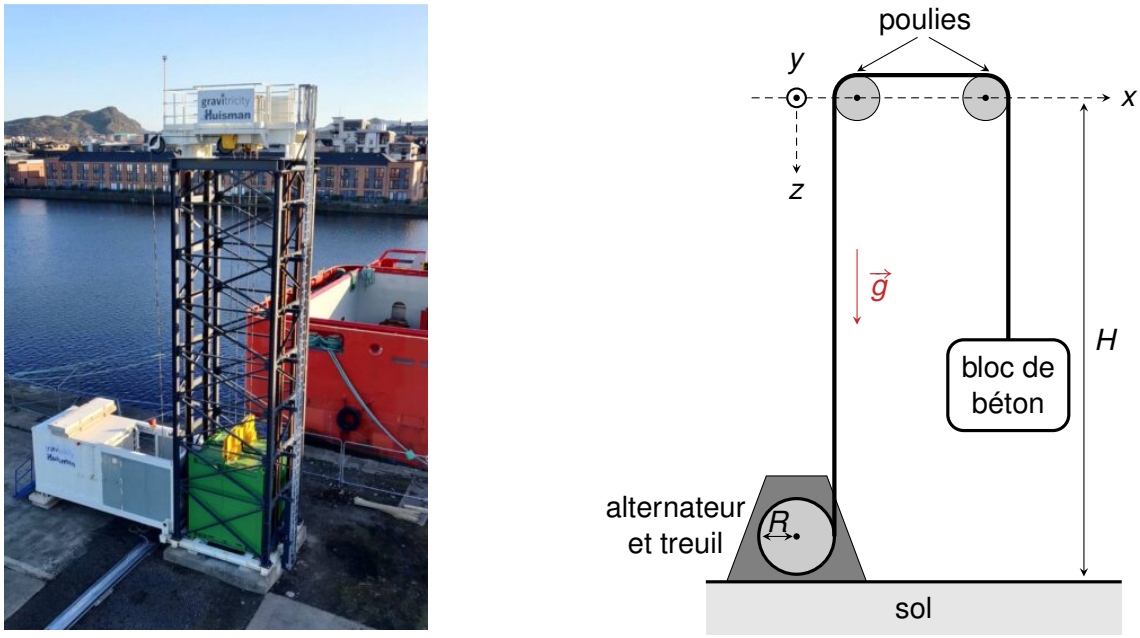


FIGURE 8 – Démonstrateur Gravitricity.

II.C.1 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

$$v = R\Omega$$

Q14. Appliquer le principe fondamental de la dynamique* au bloc de béton.

Q15. La deuxième équation régissant le fonctionnement du dispositif s'écrit

$$J\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t} = RT + \Gamma_{\text{alt}}$$

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

II.C.2 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 $\Gamma_{\text{alt}} = 0$.

Q16. Montrer que le mouvement de chute se fait à accélération constante

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

Q17. En déduire les expressions de $v(t)$ et $z(t)$ en fonction de a_0.

Q18. 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.

II.C.3 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 $\mathcal{P}_e = 250$ kW. On suppose que toute la puissance mécanique prélevée est restituée au réseau électrique, si bien que que

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

Q19. Exprimer la vitesse de chute v_0 au cours de cette phase en fonction de $\mathcal{P}_{\text{e}}, m$ et g.

Q20. On donne $a_0 = 1,5$ m · s^{-2}. Estimer numériquement v_0, t_0 et $z(t_0)$.

Q21. 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.

∗. Probablement bientôt renommé le « NLB »

III L'œil *(D'après G2E BCPST 2019)*

L'ensemble de l'œil est modélisé par une unique lentille convergente, et la rétine par un écran situé à la distance constante $d = 20$ mm de la lentille. Pour un œil sans défauts, le punctum proximum (=point le plus proche pouvant être vu net) est de l'ordre de 20 cm et le punctum remotum (=point vu net sans accommoder) est à l'infini.

On note f' la distance focale image de la lentille, A le point objet sur l'axe optique observé, et A' son image par la lentille modélisant l'œil.

Q1. Rappeler la relation de conjugaison de Descartes.

Q2. Où se forme une image vue nettement par l'œil ? En déduire $\overline{OA'}$.

Q3. Quelle est la valeur de la distance focale lorsque l'œil regarde un objet à l'infini ? Faire une construction géométrique dans cette configuration.

L'œil observe maintenant un objet situé à 20 cm de lui (au punctum proximum).

Q4. Que vaut $\overline{OA}$? Où se forme l'image vue nettement ? En déduire $\overline{OA'}$.
Établir l'expression de la distance focale.

Q5. Faire une construction géométrique dans cette configuration.

Q6. Comparer les deux valeurs de la distance focale. Commenter l'action du cristallin dans la réfraction.

Un patient myope voit flou les objets situés à plus d'un mètre de distance. Il cherche des lentilles de contact pour corriger ce défaut.

Q7. Rappeler ce qu'est la vergence d'une lentille.

Q8. Montrer que deux lentilles accolées sont équivalentes à une lentille unique dont la vergence est la somme des vergences des deux lentilles.

Q9. Calculer la vergence de l'œil du patient lorsqu'il regarde un objet situé à 1 mètre de distance.

Q10. Calculer la vergence de la lentille de contact à placer sur l'œil du patient pour qu'il puisse voir net un objet à l'infini.

Données numériques

$9^{1/5} 1,6\,;\ 9^{2/5} = 2,4\,;\ \dfrac{20}{11} \approx 1,8$

Constante d'Avogadro	$\mathcal{N}_A = 6,0.10^{23}\ \text{mol}^{-1}$
Constante molaire des gaz parfaits	$R = 8,3\ \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
Perméabilité magnétique du vide	$\mu_0 = 1,3.10^{-6}\ \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$

Document réponse à rendre avec votre copie

NOM : _____ ; Prénom : _____ Page .../...

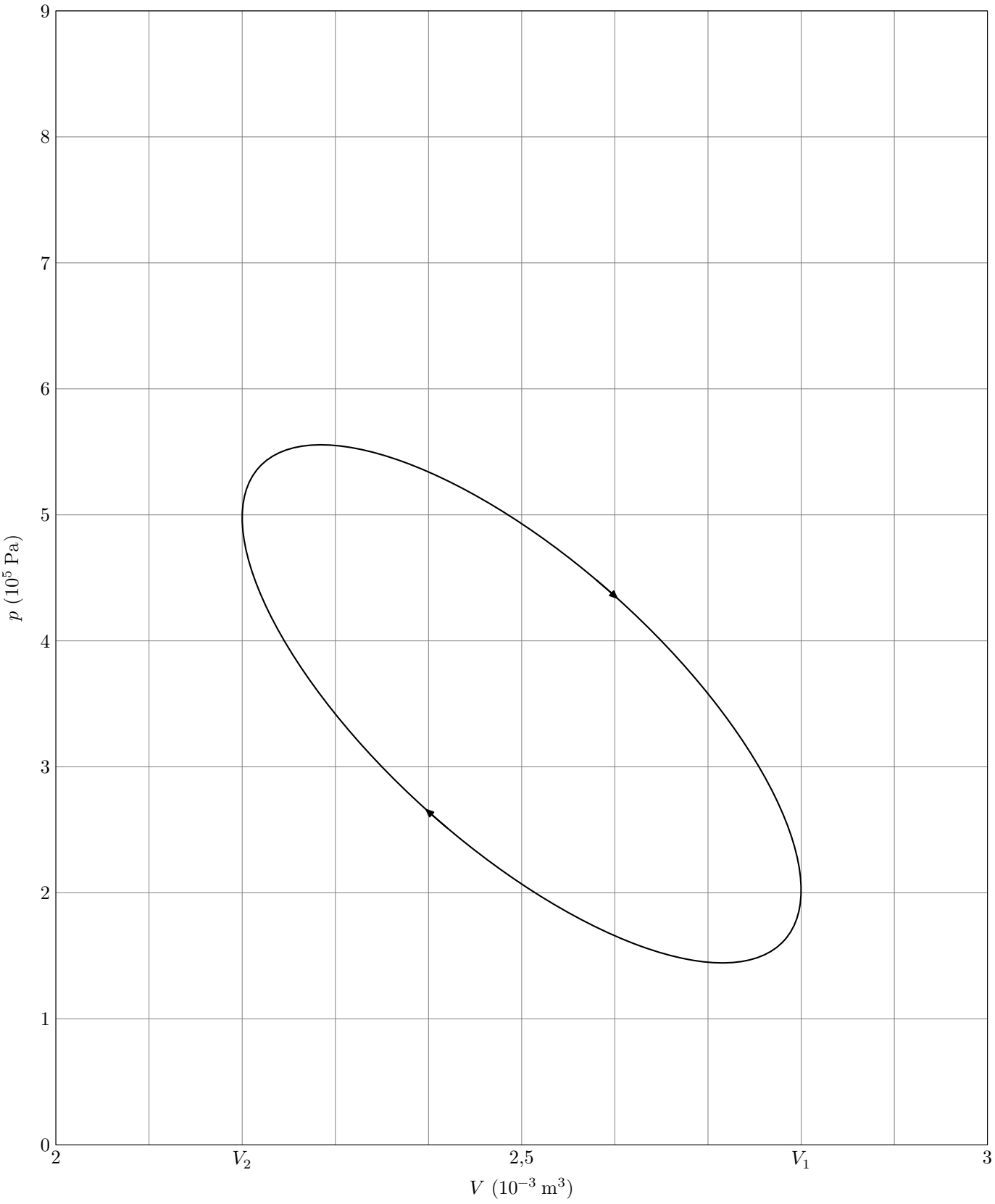


FIGURE 9 – Allure du cycle réel d'un moteur Stirling dans le diagramme (p, V)