

Le sujet comporte quatre parties indépendantes.

Merci de suivre les conseils suivants :

- **laisser un espace en début de copie pour la note et les commentaires ;**
- laisser une marge à chaque page pour les commentaires et décompte des points ;
- respecter et indiquer la numérotation des questions ;
- souligner ou encadrer les résultats.

Partie I — Convertisseur de puissance (CCINP PSI 2025)

L'arrivée des panneaux photovoltaïques et le développement des véhicules électriques ont fait entrer les convertisseurs de puissance dans l'habitat.

Q1. Citer les noms des convertisseurs d'électronique de puissance qui permettent la conversion :

1.a) du continu vers l'alternatif ;

1.b) de l'alternatif vers le continu ;

1.c) du continu vers le continu par modification de la valeur moyenne.

On considère le convertisseur dont le montage est donné sur la figure I-1. La source d'énergie s'assimile à une source de tension continu parfaite U . Elle alimente une charge qui filtre les harmoniques de courant, de sorte que le courant $i_{ch}(t)$ qui la traverse est supposé parfaitement sinusoïdal. Les interrupteurs K_i sont tous constitués par l'association parallèle d'une diode D_i et d'un transistor T_i . Les diodes D_i sont supposées parfaites.

Par souci de lecture, seul l'interrupteur K_1 a été décomposé par l'association du transistor T_1 et de la diode D_1 .

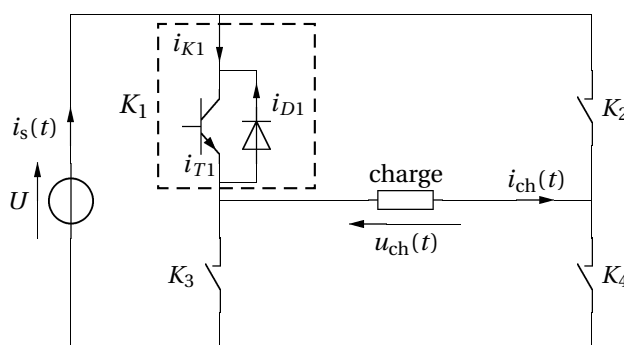


FIGURE I-1 – Convertisseur de puissance

Q2. On rappelle la caractéristique courant-tension du transistor T_1 (figure I-2) ainsi que la convention d'orientation de l'interrupteur K_1 . Tracer la caractéristique courant-tension de cet interrupteur K_1 .

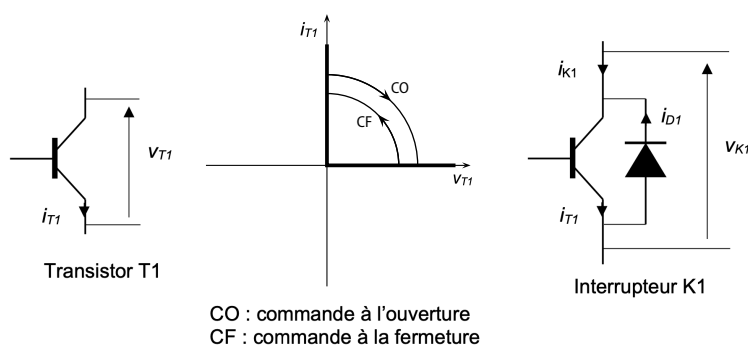


FIGURE I-2 – Caractéristique courant-tension

Sur une période T du convertisseur, la loi de commande des interrupteurs assure le fonctionnement suivant :

- K_1 est fermé sur l'intervalle de temps $\left[\frac{T}{12}, \frac{7T}{12} \right]$;
- K_2 est fermé sur l'intervalle de temps $\left[\frac{5T}{12}, \frac{11T}{12} \right]$;
- K_3 est fermé sur l'intervalle de temps $\left[\frac{7T}{12}, \frac{13T}{12} \right]$;
- K_4 est fermé sur l'intervalle de temps $\left[-\frac{T}{12}, \frac{5T}{12} \right]$.

Q3. Tracer l'allure de $u_{ch}(t)$ sur une période du convertisseur et déterminer en fonction de U sa valeur moyenne U_{moy} et sa valeur efficace U_{eff} .

Q4. Décrire le protocole expérimental de la mesure des tensions U_{moy} et U_{eff} à l'aide d'un multimètre analogue à celui de la figure I-3.



FIGURE I-3 – Multimètre

On donne l'allure de $i_{ch}(t)$ (figure I-4) de la forme $i_{ch}(t) = I_{max} \sin(\omega t + \varphi)$. La date $t = 0$ coïncide avec le début de la période du convertisseur décrite précédemment.

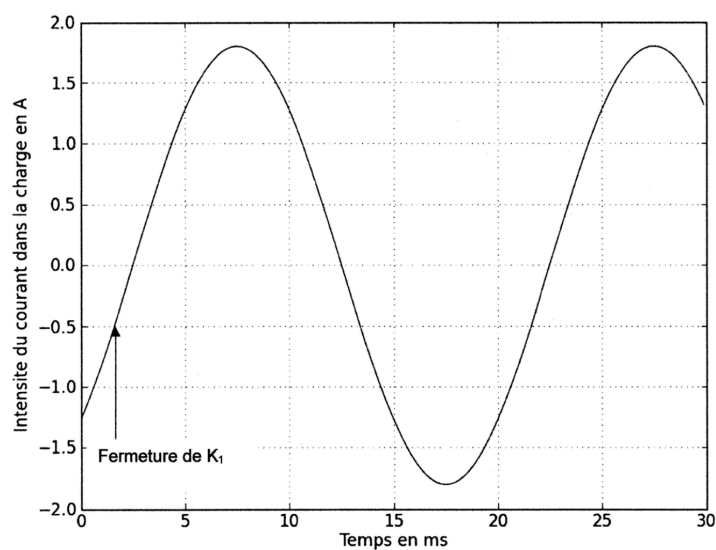


FIGURE I-4 – Allure de $i_{ch}(t)$

Q5. Évaluer la période T du convertisseur. Commenter.

Q6. La charge est-elle de nature inductive ou capacitive? Évaluer le déphasage φ .

Q7. On désigne par $i_{K1}(t)$, $i_{T1}(t)$, $i_{D1}(t)$ et $i_s(t)$ les intensités des courants qui traversent respectivement l'interrupteur K_1 , le transistor T_1 , la diode D_1 et la source d'énergie.

Associer à chaque des grandeurs $i_{K1}(t)$, $i_{T1}(t)$, $i_{D1}(t)$ et $i_s(t)$ un des chronogrammes de la figure I-5.

Q8. Dans le cadre de notre application, est-il absolument nécessaire de commander T_1 à la fermeture dès la date $t = \frac{T}{12}$? Sinon, à partir de quelle date est-ce nécessaire?

Q9. Déterminer la puissance moyenne délivrée par la source de tension constante U en fonction de U , I_{\max} et φ .

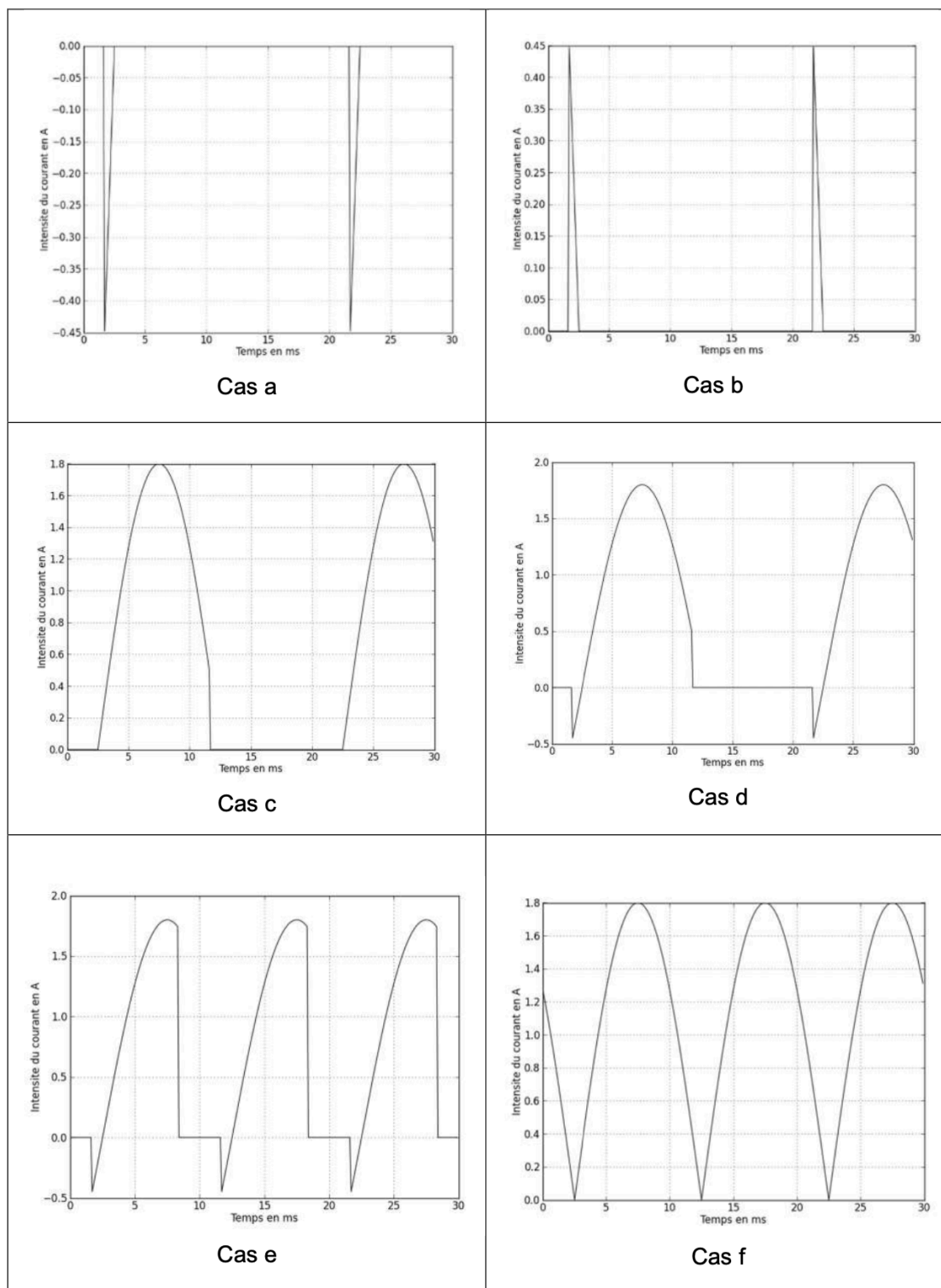


FIGURE I-5 – Allure des intensités des différents courants électriques

Partie II – Le vélo hybride (Centrale PSI 2025)

Certaines questions, peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Elles sont repérées par une barre en marge. Il est alors demandé d'expliciter clairement la démarche, les choix et de les illustrer, le cas échéant, par un schéma. Le barème valorise la prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

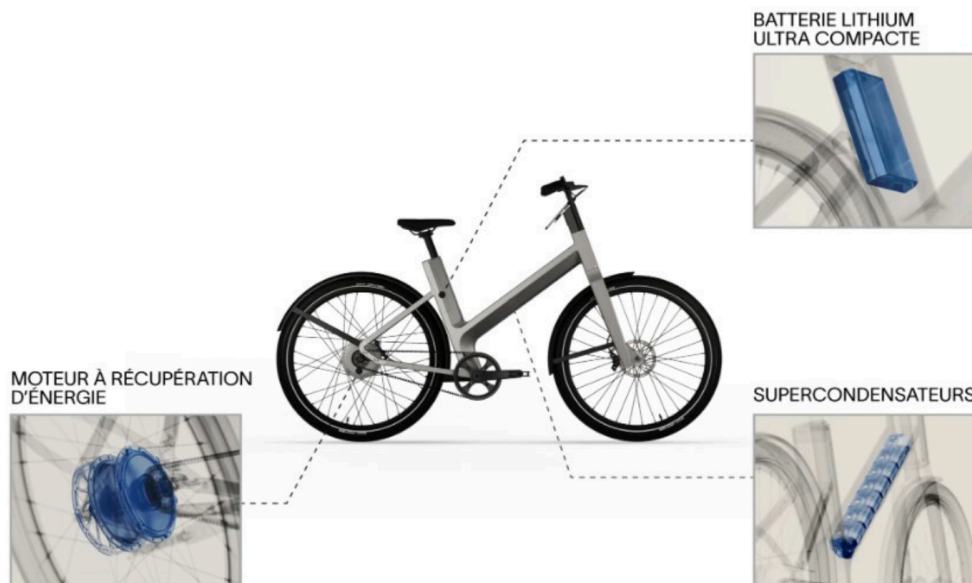


FIGURE II-1 – Les différents éléments du vélo hybride

On s'intéresse à un vélo hybride qui associe des supercondensateurs, pour une récupération rapide de l'énergie, à une petite batterie lithium-ion de 80 Wh (650 grammes) pour améliorer l'autonomie. En ville, l'autonomie de ce vélo est celle d'un vélo classique doté d'une batterie de 400 Wh. Le vélo est équipé de roues de 26 pouces (rayon $R_r = 0,35$ m).

L'articulation entre les supercondensateurs et la batterie lithium-ion du vélo hybride est présenté figure II-2.

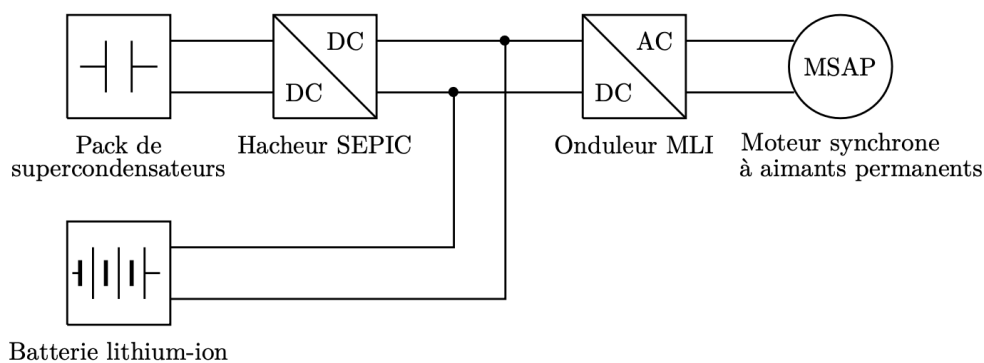


FIGURE II-2 – Schéma de fonctionnement du vélo hybride

Interface entre les supercondensateurs et l'ensemble onduleur-moteur synchrone

Contrairement à la batterie lithium-ion, les supercondensateurs sont soumis à de fortes variations de tension. Cela impose l'utilisation d'un hacheur pour les connecter au reste de l'électronique du vélo.

Ce convertisseur est de type SEPIC (*Single Ended Primary Inductor Converter*), représenté sur la figure II-3.

On utilisera les caractéristiques de fonctionnement et hypothèses suivantes :

- les interrupteurs travaillent à la fréquence de découpage $f = 300$ kHz et avec le rapport cyclique α ;
- sur une période de fonctionnement, l'interrupteur K_1 est fermé sur l'intervalle $[0, \alpha T]$, ouvert sur l'intervalle $[\alpha T, T]$ et l'interrupteur K_2 est ouvert sur l'intervalle $[0, \alpha T]$, fermé sur l'intervalle $[\alpha T, T]$;
- chaque raisonnement sera mené dans l'hypothèse d'un régime périodique établi ;
- on considérera, sauf mention contraire, les composants de commutation comme idéaux ;

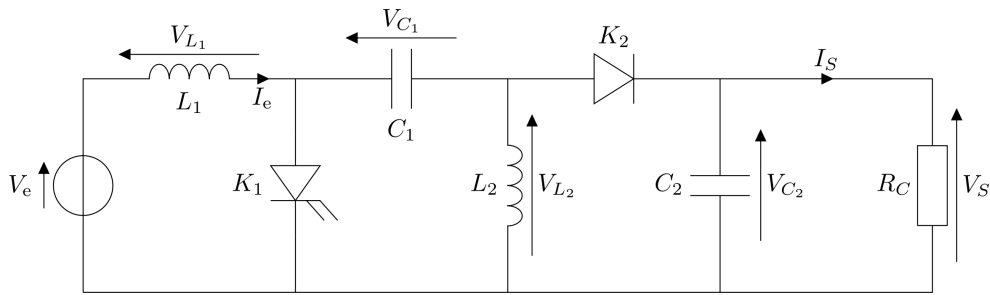


FIGURE II-3 – Le convertisseur SEPIC

- la tension de sortie sera $V_s = 36 \text{ V}$;
- la tension d'entrée V_e est celle aux bornes du pack de supercondensateurs. Elle est supposée constante. Sa valeur est comprise entre 27 V et 54 V ;
- l'intensité du courant de sortie est considérée comme constante. Sa valeur est $I_s = 10 \text{ A}$;
- on tolère des ondulations relatives (par rapport aux valeurs moyennes) de 10% pour l'intensité du courant d'entrée I_e et de 1% pour la tension de sortie V_s .

Q1. À partir d'un bilan de puissance, calculer la valeur moyenne maximale du courant d'entrée $I_{e,\max}$.

Q2. Montrer que les valeurs moyennes de V_{L_1} et V_{L_2} sont nulles. En déduire la valeur moyenne $\langle V_{C_1} \rangle$ de la tension aux bornes du condensateur de capacité C_1 .

Par la suite, on considère que $V_{C_1}(t) \simeq \langle V_{C_1} \rangle$.

Q3. En utilisant les hypothèses précédentes, tracer le chronogramme de la tension aux bornes de la bobine d'inductance L_2 : $V_{L_2}(t)$.

Q4. En déduire le gain du convertisseur $\frac{V_s}{V_e}$ en fonction de α . Quel est l'intérêt du convertisseur SEPIC?

En réalité, ce gain est limité par les résistances internes des différents composants. En tenant compte de la résistance interne $R_L = 0,1 R_C$ de la bobine d'inductance L_1 , le gain devient

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha) \left(1 + \frac{R_L}{R_C} \frac{1}{(1 - \alpha)^2} \right)}.$$

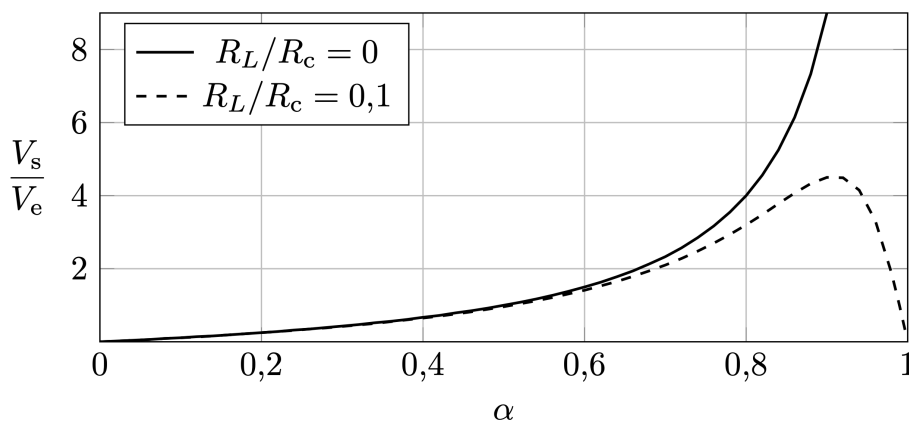


FIGURE II-4 – Gain en fonction du rapport cyclique

Q5. Calculer les deux valeurs extrêmes du rapport cyclique α pour les valeurs extrêmes de la tension d'entrée V_e . Commenter ces résultats. Que se passerait-il si on laissait les supercondensateurs se décharger totalement?

Dans les deux questions suivantes, on prendra les valeurs approchées $\alpha = 0,4$ pour $V_e = 54 \text{ V}$ et $\alpha = 0,6$ pour $V_s = 27 \text{ V}$.

Q6. Calculer la valeur minimale de l'inductance L_1 permettant que l'ondulation du courant d'entrée soit inférieure à 10% de sa valeur moyenne I_e , quelle que soit la valeur de la tension d'entrée dans l'intervalle $[27 \text{ V}; 54 \text{ V}]$.

Q7. En supposant le courant de sortie I_s constant, calculer la valeur minimale de C_2 permettant de limiter l'ondulation maximale de la tension de sortie V_s à 1% de sa valeur moyenne, prise égale à 36 V , pour une tension d'entrée $V_e = 36 \text{ V}$.

Partie III – Observation côtière (Centrale MP 2025)

Lorsqu'ils circulent au voisinage des côtes, les courants marins de surface exercent une influence sur les activités humaines se déroulant en mer, près du rivage. Ils jouent également un rôle déterminant dans l'érosion du littoral et dans la dégradation d'infrastructures côtières, phénomènes en cours d'aggravation sous l'effet de l'évolution du climat. Ce problème analyse une technique de télédétection permettant l'observation de ces courants jusqu'à des distances de l'ordre de 100 km.

Certaines questions, peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Elles sont repérées par une barre en marge. Il est alors demandé d'explicitier clairement la démarche, les choix et de les illustrer, le cas échéant, par un schéma. Le barème valorise la prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

On note j l'unité imaginaire telle que $j^2 = -1$.

Principe de l'observation côtière

En 1955, D.D. Crombie découvre que la réflexion d'une onde radio sur la mer produit un écho caractéristique, qu'il interprète comme l'interaction du champ électromagnétique avec les vagues agitant la surface de l'eau. On peut ainsi observer à distance l'état de la mer à l'aide d'un radar côtier émettant une onde HF (haute fréquence, entre 3 et 30 MHz) et recevant l'onde rétrodiffusée (ou réfléchie) par l'interface entre l'air et l'eau (figure III-1).

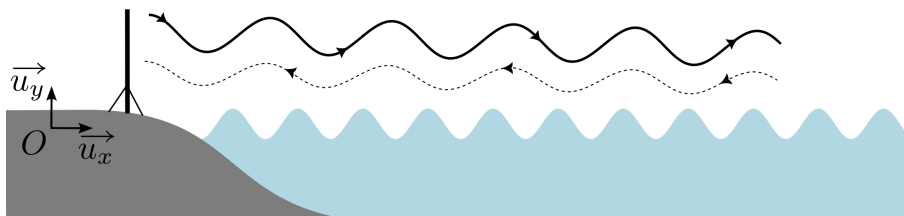


FIGURE III-1 – Radar côtier émettant une onde HF vers la surface de la mer et recevant l'onde rétrodiffusée

Dans le cas de vagues se déplaçant avec une vitesse $\vec{v}_x = U \vec{u}_x$, si le radar émet une onde harmonique de fréquence f , la fréquence de l'onde réfléchie est décalée par effet Doppler.

En plus des vagues, la surface de la mer est soumise à des courants de surface, ce qui ajoute un décalage de la fréquence f_r de l'onde reçue. On a alors

$$f_r - f = \pm f_B + f_D$$

le signe permettant de distinguer le cas où les vagues s'approchent du rivage du cas où elles s'en éloignent.

1 — Mesure d'une différence de fréquence par détection synchrone

On considère deux signaux sinusoïdaux $v_1(t) = A \cos(2\pi f_1 t)$ et $v_2(t) = B \cos(2\pi f_2 t + \varphi_0)$, où A , B et φ_0 sont des constantes, dont on souhaite mesurer l'écart de fréquence $f_2 - f_1$, supposé très inférieur aux fréquences f_1 et f_2 .

Le montage de détection synchrone qui permet d'y parvenir est représenté schématiquement sur la figure III-2 : il est formé d'un multiplieur analogique \mathcal{M} (qui donne une tension de sortie proportionnelle au produit de ses deux tensions d'entrée) et d'un filtre \mathcal{F} dont la nature sera étudiée plus loin.

Q1. Exprimer à un facteur près le signal intermédiaire v_i , puis justifier que son spectre fait apparaître les fréquences $f_2 + f_1$ et $|f_2 - f_1|$. Indiquer le type de filtrage qui permet d'obtenir, à la sortie du filtre, un signal v_d de fréquence $|f_2 - f_1|$.

Le traitement des signaux radars fait intervenir des composants spécifiques aux hautes fréquences. Pour des ultrasons au contraire, avec des fréquences de l'ordre de 10^4 Hz, des composants usuels disponibles dans un lycée (résistances, condensateurs, bobines d'auto-induction) fonctionneraient.

Q2. Proposer pour \mathcal{F} un schéma électrique de filtre passif convenable, sans préciser pour l'instant les valeurs des composants. Un filtre d'ordre 1 est acceptable, mais le jury valorisera d'avantage un filtre d'ordre 2, plus efficace.

Q3. Exprimer la fonction de transfert du montage de la question précédente. Pour $f_1 \approx f_2 \approx 40$ kHz, proposer des valeurs réalistes pour les composants du filtre \mathcal{F} .

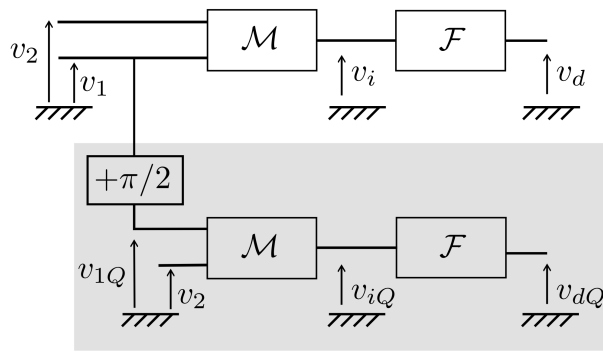


FIGURE III-2 – Principe d'un montage de détection synchrone. Jusqu'à la question **Q3** incluse, la partie inférieure sur fond gris n'a pas à être considérée.

À l'issue du filtrage, v_d est pratiquement sinusoïdal et mesurer sa fréquence revient à mesurer $|f_2 - f_1|$, ce qui était le but à atteindre. Cependant, dans le cas de l'effet Doppler (où $f_1 = f$ et $f_2 = f_r$), il est important de connaître le *signe* de $f_2 - f_1$. Pour cela, on complète le montage de la figure III-2 par une seconde voie (représentée sur fond gris) dans laquelle on applique des opérations analogues après avoir déphasé v_1 de $+\pi/2$ (démodulation en quadrature).

Q4. Dans l'hypothèse d'un filtrage idéal, exprimer le signal v_{dQ} et expliquer comment son observation conjointe à celle de v_d permet d'obtenir le signe de $f_2 - f_1$.

2 — Mesure de distance par modulation de fréquence

La mesure de la distance des éléments réflecteurs fonctionne elle aussi par détection synchrone grâce à une modulation de la fréquence de l'onde émise. Alors qu'un signal de fréquence f_0 varie selon $\cos(2\pi f_0 t)$, le champ électrique émise par l'antenne est proportionnel à la tension $v_e(t)$, T_m -périodique et définie sur une période par

$$\forall t \in [0, T_m[, \quad v_e = A \cos \Phi(t) \quad \text{avec} \quad \Phi(t) = 2\pi \left(f_0 + \frac{Bt}{2T_m} \right) t. \quad (1)$$

La grandeur positive B , homogène à une fréquence et très inférieure à f_0 , est appelée largeur de bande. La période de répétition T_m est de l'ordre de quelques dixièmes de secondes et f_0 de l'ordre de 10 MHz.

On définit la *fréquence instantanée* $f(t)$ de v_e par $f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt}(t)$.

Q5. Exprimer $f(t)$ et tracer schématiquement le graphe de ses variations sur deux périodes.

La cible qui réfléchit l'onde, supposée ici immobile, se trouve à la distance d de l'antenne émettrice. À l'instant t , la station radar dispose du signal d'émission $v_e(t)$ et du signal d'écho $v_r(t)$. Ce dernier provient de la réflexion par la cible du signal émis un peu plus tôt, de sorte que sa fréquence $f_r(t)$ à l'instant t est celle que possédait v_e à l'instant $t - \tau$.

Q6. Donner l'expression de τ . Pour $d = 10$ km, vérifier qu'il est très inférieur à T_m , puis représenter sur un même graphique les variations de $f(t)$ et $f_r(t)$. Les deux courbes seront légendées et tracées en deux couleurs distinctes. Pour ce graphique seulement, on prendra $\tau = T_m/10$.

Les signaux $v_e(t)$ et $v_r(t)$ sont appliqués à l'entrée du montage de détection synchrone (représenté figure III-2 et étudié dans la section I).

Q7. Exprimer la fréquence f_d du signal démodulé v_d . Montrer que sa mesure permet d'accéder à la distance d de la cible, qu'on exprimera en fonction de c , B et T_m .

3 — Analyse spectrale par TFD

L'analyse spectrale par TFD est une technique couramment mise en œuvre dans les oscilloscopes numériques et les logiciels accompagnant les cartes d'acquisition. Son calcul est généralement conduit par l'algorithme de transformée de Fourier rapide (de sigle fréquemment rencontré FFT).

On considère un signal analogique $v(t)$ dont on a prélevé N_e échantillons $v_n = v(t_n)$ aux instants $t_n = nT_e$ avec $n \in \{0, 1, 2, \dots, N_e - 1\}$. La TFD permet d'afficher N_e valeurs $|S(f_k)|$ associées aux fréquences $f_k = k/(N_e T_e)$ avec

$k \in \{0, 1, 2, \dots, N_e - 1\}$. Selon les paramètres N_e et T_e choisis pour l'échantillonnage, ces nombres $|S(f_k)|$ constituent une représentation plus ou moins fidèle du spectre de v .

Q8. Expliquer en quoi consiste le phénomène de « repliement de spectre » et comment s'en prémunir.

L'échantillonnage sur une durée finie limite la capacité à distinguer, dans le spectre de v , des composantes harmoniques possédant des fréquences f_1 et f_2 très proches. On appelle *résolution spectrale* la valeur de $|f_2 - f_1|$ en dessous de laquelle cette distinction est impossible; elle s'identifie ici à la *précision* δf sur l'échelle des fréquences. À titre d'exemple, on a représenté sur la figure III-3 la TFD de la fonction $v(t)$ suivante, qui comporte un léger bruit aléatoire $\epsilon(t)$ superposé :

$$v(t) = A \cos(2\pi f_1 t) + A \cos(2\pi f_2 t) + \epsilon(t) \quad \text{avec} \quad A = 2 \text{ V}, \quad f_1 = 150 \text{ Hz}, \quad f_2 = 160 \text{ Hz} \quad |\epsilon(t)| < 0,1 \text{ V}. \quad (2)$$

Sur le spectre de gauche, $N_e = 100$, $T_e = 2$ ms; sur celui de droite $N_e = 100$, $T_e = 0,5$ ms. Ces valeurs numériques ont été choisies dans un but illustratif et n'ont aucun lien avec celles mises en jeu dans le traitement des signaux radars.

Pour plus de lisibilité, le graphique a été restreint aux fréquences inférieures à 250 Hz.

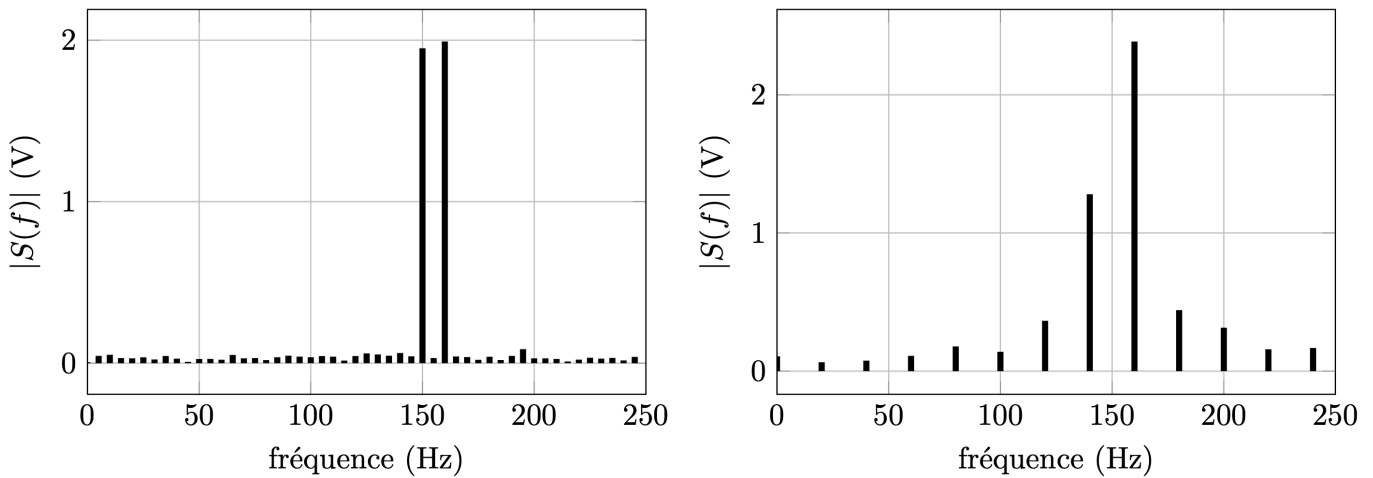


FIGURE III-3 – Exemples de spectres obtenus par TFD du signal donné par l'expression (2) pour deux choix de paramètres d'échantillonnage

Q9. Commenter ces deux spectres et analyser leur capacité à révéler les composantes spectrales de $v(t)$. Exprimer en fonction de N_e et T_e la précision en fréquence δf (identique à la résolution spectrale), et donner sa valeur numérique dans chacun des deux cas.

Dans les radars océanographiques, une double TFD permet d'obtenir simultanément les informations relatives à la vitesse v_x de la cible (soit $f_r - f = \pm f_B + f_D$), et celles relatives à sa distance ($f_r - f$ est lié à la distance d).

Comme annoncé au début de la partie, on traite *séparément* ces deux phénomènes dans les sous-sections III.2 et III.3 respectivement, comme si chacun existait indépendamment de l'autre.

1 Limite et résolution en vitesse

Sur chaque rampe de modulation, de durée T_m , un échantillon de v_d est acquis et on répète cette opération N fois pour une durée d'acquisition $T_a = NT_m$. Les données sont ici $f = 29,85$ MHz, $f_B = 0,56$ Hz, $T_m = 0,262$ s et $B = 125$ kHz (radar WERA de la société Helzel Messtechnik).

Q10. Indiquer jusqu'à quelle fréquence maximale on peut obtenir le spectre pour en déduire $f_r - f$. En déduire la valeur maximale de f_D atteignable et la vitesse v_x associée. On rappelle que ces grandeurs ont été reliées l'une à l'autre dans la question Q7.

Q11. Pour $N = 4096$, fournir la résolution spectrale de la mesure $f - f_r$. En déduire la résolution Δv_x sur la vitesse v_x .

2 Limite et résolution en distance

Au sein d'une unique rampe de modulation de durée $T_m = 0,262$ s, M échantillons équidistants de v_d sont acquis en vue du calcul de la TFD.

Q12. Exprimer la valeur maximale $f_{d,\max}$ de f_d que l'on peut déduire de l'analyse de ce spectre. Pour une portée de radar d_{\max} égale à 50 km, proposer une valeur de M compatible. On rappelle que d et f_d ont été reliées l'une à l'autre dans la question **Q7**.

Q13. Indiquer quelle est la résolution spectrale sur la mesure de f_d . En déduire la résolution en distance Δd . Pour information, la société Helzel Messtechnik indique de l'utilisateur peut paramétrer le radar et choisir des résolutions de 0,3 km, 0,6 km et 1,2 km.

Partie IV – Origine du *Blue Fire* (Centrale TSI 2025)

Le *Blue Fire* est l'une des montagnes russes du parc d'attraction Europa-Park, situé à Rust, en Allemagne. Elle est en service depuis le 4 avril 2009. Le nom de l'attraction a été choisi en référence à la couleur de la flamme émise par la combustion du gaz naturel, vecteur énergétique important.

1 — Gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile présent naturellement dans les roches poreuses du sous-sol, exploité par l'homme pour répondre à une partie de ses besoins énergétiques. Il est principalement utilisé pour la production d'électricité, le chauffage et comme carburant.

Le terme « gaz naturel » fait spécifiquement référence à un mélange d'hydrocarbures gazeux principalement composé de méthane (CH_4) mais contenant aussi d'autres alcanes (butane, propane...), et parfois un faible pourcentage de dioxyde de carbone (CO_2), de diazote (N_2), de sulfure d'hydrogène (H_2S) ou d'hélium (He).

Q1. Donner les formules de Lewis de la molécule de méthane, de la molécule de diazote et de la molécule de dioxyde de carbone.

Dans la suite, pour simplifier, on pourra assimiler le « gaz naturel » à du méthane pur. Au cours de la combustion du méthane, celui-ci réagit avec le dioxygène de l'air pour former de l'eau et du dioxyde de carbone, supposés à l'état de vapeur.

Q2. Établir l'équation de réaction modélisant la combustion du méthane.

Q3. Déterminer la valeur de l'enthalpie standard de réaction de cette réaction, et commenter son signe.

Q4. Déterminer la valeur de l'énergie thermique libérée par la combustion complète d'un mètre cube de méthane pur assimilé à un gaz parfait, à la température initiale $T = 0^\circ\text{C}$ sous une pression fixée de 1,013 bar. Cette quantité est nommée *pouvoir calorifique inférieur* (ou PCI). Comparer à sa valeur tabulée pour le gaz naturel commercial, comprise entre 9,2 et 10,2 kWh · m⁻³ suivant le type de gaz et l'altitude.

En 2023, la France a consommé 33,9 milliards de m³ de gaz naturel tous usages confondus — volume calculé dans les conditions de la question **Q4** — la quasi-totalité étant importée. Par ailleurs, son empreinte carbone totale est estimée pour 2023 par l'INSEE à 644 millions de tonnes équivalent CO_2 . L'empreinte carbone de la France représente la quantité de gaz à effet de serre (GES) induite par la demande finale intérieure d'un pays.

Q5. Estimer la proportion due à la consommation de gaz naturel dans l'empreinte carbone totale de la France en 2023.

On cherche maintenant à estimer la température dans la flamme bleue produite par la combustion du méthane qui a donné son nom au *Blue Fire*. Celle-ci peut être modélisée en première approche comme un réacteur adiabatique fermé dans lequel se déroule la transformation. Ce réacteur est constitué initialement d'air d'une part — de composition molaire de 80 % de N_2 et 20 % de O_2 — et de méthane d'autre part. Les réactifs sont supposés en proportions stœchiométriques dans ce réacteur, et le mélange gazeux avant combustion est initialement à la température $T_i = 20^\circ\text{C}$. Les capacités thermiques à pression constante des différents gaz seront supposées indépendantes de T , de valeurs précisées dans les données numériques.

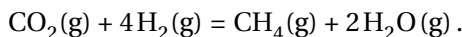
Q6. Proposer une estimation numérique de la température de la flamme bleue en détaillant la démarche.

2 — Le Power to Gaz

Le *power to gaz* est une technologie qui permet de convertir l'électricité excédentaire, souvent issu de sources renouvelable comme l'éolien ou le solaire, en gaz. Ce procédé se déroule en plusieurs étapes :

1. **Électrolyse de l'eau** : l'électricité est utilisée pour décomposer l'eau en dihydrogène et en dioxygène.
2. **Méthanation** : l'hydrogène produit est ensuite combiné avec du dioxyde de carbone pour produire du méthane.

La réaction modélisant la transformation ayant lieu au cours de la méthanation est la réaction de Sabatier :



Les conditions opératoires pour la méthanation sont cruciales pour optimiser le rendement de la réaction. Généralement, la réaction se déroule à des températures entre 200 °C et 400 °C, sous une pression comprise entre 20 et 30 bars.

Le *power to gaz* présente plusieurs avantages, tant sur le plan industriel qu'environnemental :

- **Stockage de l'énergie** : il permet de stocker l'électricité excédentaire sous forme de gaz, qui peut être utilisé ultérieurement pour produire de l'électricité ou comme carburant.
- **Réduction des émissions de CO₂** : en utilisant le CO₂ capturé dans l'atmosphère ou issu de procédés industriels, le *power to gas* contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- **Intégration des énergies renouvelables** : cette technologie facilite l'intégration des énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire) dans le réseau électrique, en offrant une solution de stockage flexible.
- **Diversification des sources énergétiques** : le méthane produit peut être injecté dans le réseau de gaz naturel existant, diversifiant ainsi les sources d'approvisionnement en énergie.

Q7. Déterminer les valeurs de l'enthalpie standard de réaction et l'entropie standard de réaction pour la réaction de Sabatier à 298 K.

Q8. On suppose les enthalpies et entropies standard de réaction indépendantes de la température. Déterminer la valeur de la constante d'équilibre de cette réaction à $T = 400$ °C. Commenter.

Q9. En s'appuyant sur la loi de van't Hoff fournie dans les données, déterminer si une augmentation de température favorise ou défavorise le rendement de cette réaction. En déduire que le choix de la température du milieu réactionnel résulte d'un compromis que l'on précisera.

Données utiles pour le traitement du sujet

- Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273$.
- Définition du kWh : 1 kWh est l'énergie consommée par un dispositif de puissance 1 kW pendant une durée d'une heure.
- Masses molaires : $M(\text{H}) = 1,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(\text{C}) = 12,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(\text{O}) = 16,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Données thermodynamiques à 298 K :

	H ₂ (g)	N ₂ (g)	O ₂ (g)	CO ₂ (g)	CH ₄ (g)	H ₂ O(g)
$\Delta_f H^{\circ}$ en kJ · mol ⁻¹				-393,5	-74,6	-241,8
S_m° en J · K ⁻¹ · mol ⁻¹	130,7	191,6	205,2	213,8	186,3	188,8

- Capacités thermiques moyennes à pression constante des différents gaz, calculées sur l'intervalle de température [298 K, 3500 K] :

	H ₂ (g)	N ₂ (g)	O ₂ (g)	CO ₂ (g)	CH ₄ (g)	H ₂ O(g)
$C_{p,m}$ en J · K ⁻¹ · mol ⁻¹	29,2	30,1	32,3	45,4	44,5	37,6

- Loi de van't Hoff : $\frac{d \ln K^{\circ}}{dT} = \frac{\Delta_r H^{\circ}}{RT^2}$.