



## Stockage d'énergie par pompage thermique (procédé SEPT)

Certaines questions peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Leur énoncé est repéré 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.

Dans le contexte actuel, la problématique de la gestion des ressources énergétiques est devenue un enjeu économique majeur. Il est particulièrement important de disposer de moyens de stockage d'énergie qui permettent une meilleure utilisation des sources d'énergie maîtrisables comme les centrales thermiques, mais aussi des sources intermittentes comme les éoliennes ou les centrales solaires. Dans ce contexte et devant les défis posés par la protection de l'environnement, les moyens de stockage existants risquent de devenir insuffisants pour intégrer davantage d'énergies intermittentes dans la production électrique. Cette limitation explique un intérêt récent pour les technologies de stockage.

Ce sujet concerne un nouveau procédé de stockage d'énergie à échelle industrielle, le procédé SEPT (Stockage d'Électricité par Pompage Thermique), breveté en 2007. L'énergie est stockée en modifiant, à l'aide d'une machine thermique, la température de deux échangeurs de grande taille appelés régénérateurs. La machine peut fonctionner en pompe à chaleur ou en moteur thermique.

### I Analyse thermodynamique du procédé SEPT

La machine est constituée de deux turbomachines, pouvant fonctionner en compresseur ou en turbine et assurant la circulation d'un gaz caloporteur (de l'argon) entre deux enceintes. Les enceintes contiennent un solide divisé (céramique réfractaire, galets de basalte...) qui échange de l'énergie thermique avec le gaz caloporteur. La machine comprend également un convertisseur électromécanique réversible pouvant fonctionner en moteur ou en générateur. On passe de la phase de stockage à celle de déstockage en changeant le sens de circulation du fluide caloporteur (figures 1 et 2).

En mode stockage d'énergie (figure 1), le cycle fonctionne en pompe à chaleur, consommant de l'énergie d'origine électrique pour transférer de l'énergie thermique depuis une enceinte basse pression B vers une enceinte haute pression H. Ces enceintes sont des régénérateurs (échangeurs thermiques gaz-solide), au travers desquels passe le gaz caloporteur, entraîné par une paire de turbomachines reliées à un moteur électrique.

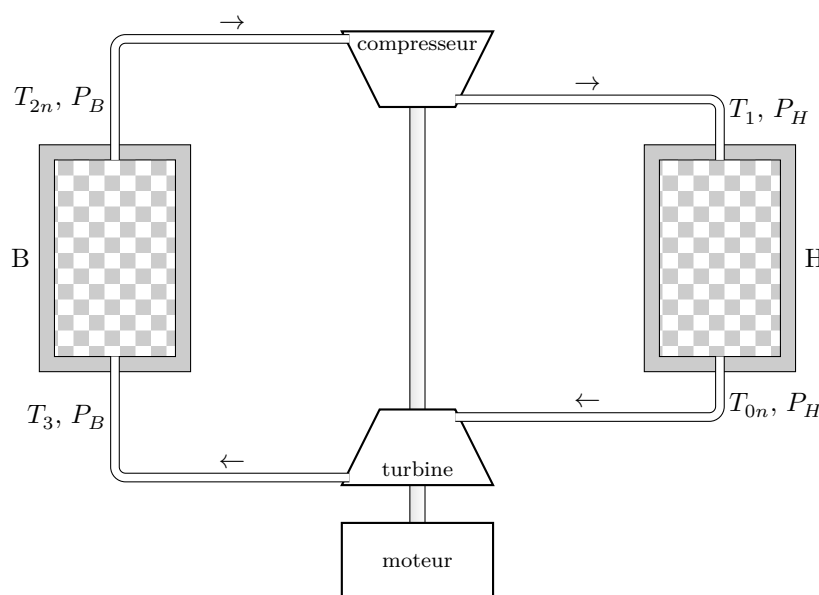


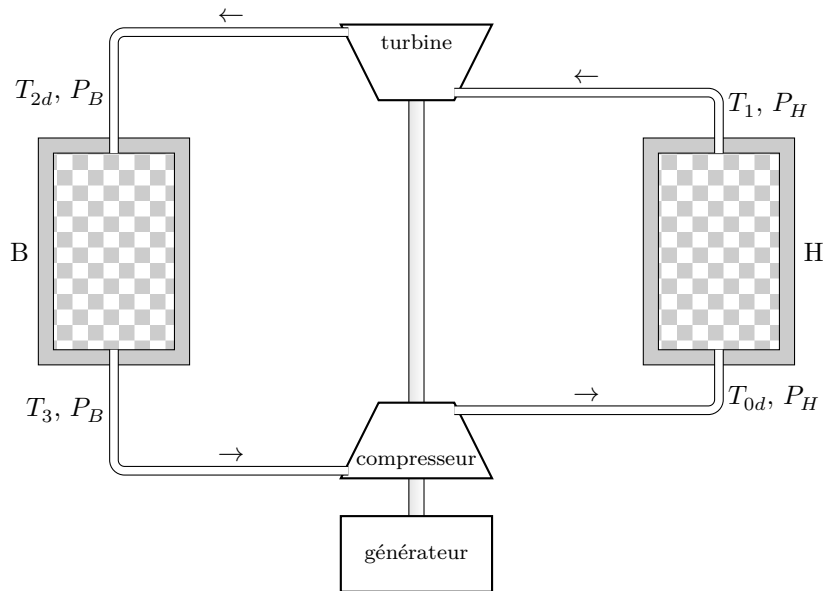
Figure 1 Fonctionnement en mode stockage d'énergie

### I.A – Schématisation simplifiée du procédé

On schématise le dispositif de façon très simplifiée en considérant que les enceintes basse et haute pression sont des sources de chaleur, de températures respectives  $T_B$  et  $T_H$  uniformes et constantes, avec  $T_H > T_B$ . Le cycle des transformations subies par le gaz caloporteur est alors un cycle ditherme.

**Q 1.** En phase de stockage, la machine fonctionne comme une pompe à chaleur. Définir le coefficient de performance d'une telle machine et déterminer sa valeur maximale, en précisant à quelles conditions cette valeur maximale est atteinte (théorème de Carnot).

**Q 2.** En phase de déstockage (figure 2), la machine fonctionne comme un moteur thermique. Définir l'efficacité de ce moteur et déterminer sa valeur maximale en précisant dans quelles conditions cette valeur maximale est atteinte.



**Figure 2** Fonctionnement en mode production d'énergie

**Q 3.** Montrer que, dans les conditions de validité du théorème de Carnot, l'énergie stockée peut être intégralement récupérée.

**Q 4.** Dans un diagramme  $(T, s)$ , représenter les cycles de Carnot pour les phases de stockage et de déstockage.

### I.B – Étude de la phase de stockage

On s'intéresse désormais à une modélisation plus réaliste de la machine dans laquelle on tient compte des inhomogénéités de température dans les enceintes. Celles-ci sont tellement grandes que l'on peut considérer que leur température est indépendante du temps.

Le gaz pénètre dans l'enceinte H à la température  $T_1 = 1273$  K et en sort à la température  $T_{0n} = 293$  K. Après décompression dans la turbine, il pénètre dans l'enceinte B à la température  $T_3 = 203$  K et en sort à la température  $T_{2n} = 773$  K.

Les irréversibilités dues aux turbomachines ont un impact important sur le rendement du stockage. Le gaz neutre utilisé est de l'argon assimilé à un gaz parfait, de coefficient isentropique  $\gamma = 1,67$ , de masse molaire  $40,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  et de capacité thermique massique  $c_p$ . Il décrit un cycle de Brayton constitué d'une évolution isobare dans chaque enceinte (B et H) reliées par deux transformations adiabatiques lorsque le gaz traverse le compresseur et la turbine (figure 3).

**Q 5.** Reproduire schématiquement le cycle isentropique de la figure 3 en identifiant les éléments traversés par le fluide dans chaque étape du cycle.

On note  $w_c$  le travail massique réellement échangé par le fluide avec les parties mobiles du compresseur et  $w_{c\text{is}}$  le travail idéal correspondant en supposant la compression isentropique. De même, on note  $w_t$  le travail massique réellement échangé par le fluide avec les parties mobiles de la turbine et  $w_{t\text{is}}$  ce travail idéal dans les conditions isentropiques. On définit le rendement par rapport à l'isentropique du compresseur et de la turbine par

$$\eta_{cs} = \frac{w_{c\text{is}}}{w_c} \quad \text{et} \quad \eta_{ts} = \frac{w_t}{w_{t\text{is}}}.$$

**Q 6.** Comparer  $T_1$ , la température réelle en sortie de compresseur et  $T_{1\text{is}}$  cette température dans les conditions isentropiques. Justifier.

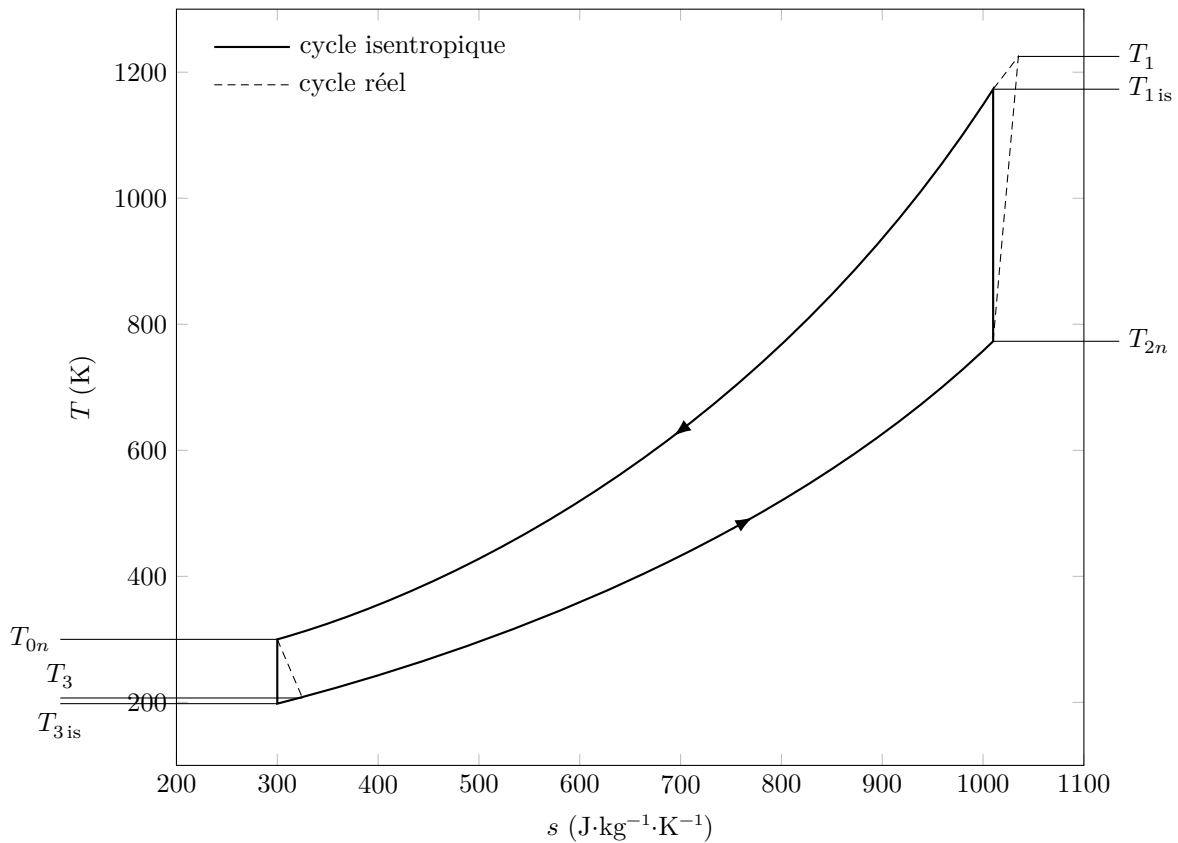


Figure 3

**Q 7.** On note  $h_{et}$ ,  $h_{st}$ ,  $h_{ec}$  et  $h_{sc}$  les enthalpies massiques réelles du fluide en entrée et sortie de la turbine et du compresseur et  $h_{stis}$  et  $h_{scis}$  les enthalpies massiques du fluide en sortie de la turbine et du compresseur en supposant les conditions isentropiques. Montrer que

$$\eta_{cs} = \frac{h_{scis} - h_{ec}}{h_{sc} - h_{ec}} \quad \text{et} \quad \eta_{ts} = \frac{h_{et} - h_{st}}{h_{et} - h_{stis}}$$

L'objectif de la suite de cette partie est de montrer la nécessité de deux paires de turbomachines (celles en stockage ne peuvent pas être utilisées en déstockage) et de déterminer le rendement théorique du procédé SEPT.

On note  $\Psi = \left(\frac{P_H}{P_B}\right)^{1-1/\gamma}$ .

**Q 8.** En utilisant les rendements par rapport à l'isentropique des deux turbomachines lors du stockage, exprimer les températures  $T_1$  et  $T_3$  en fonction de  $T_{0n}$ ,  $T_{2n}$ ,  $\Psi$ ,  $\eta_{cs}$  et  $\eta_{ts}$ .

On définit l'énergie massique  $e_s$  mise en jeu lors du stockage par  $e_s = c_p((T_1 - T_{2n}) + (T_3 - T_{0n}))$ .

**Q 9.** Justifier cette expression.

**Q 10.** Exprimer  $e_s$  en fonction de  $T_{0n}$ ,  $T_{2n}$ ,  $c_p$ ,  $\Psi$ ,  $\eta_{cs}$  et  $\eta_{ts}$ .

**Q 11.** Calculer la valeur numérique de  $e_s$  avec  $T_{0n} = 293$  K,  $T_{2n} = 773$  K,  $\eta_{cs} = \eta_{ts} = 0,96$  et  $\Psi = 1,55$ .

### I.C – Positionnement du procédé SEPT par rapport aux autres modes de stockage

Parmi les autres modes de stockage d'énergie, on peut citer l'hydraulique gravitaire, l'air comprimé électriquement (procédé CAES), les batteries, le stockage magnétique d'énergie (procédé SMES) ou encore le stockage d'hydrogène (utilisable par exemple dans les piles à combustibles). La figure 4 positionne ces divers modes de stockage en termes de puissance et de capacité énergétique.

**Q 12.** Comparer le procédé SEPT aux autres méthodes de stockage d'énergies présentées dans la figure 4.

**Q 13.** Déterminer un ordre de grandeur du débit massique d'argon dans une installation SEPT typique.

La porosité  $\varepsilon$ , dont l'influence sur le stockage sera étudiée ultérieurement, correspond au rapport du volume occupé par le fluide sur le volume total de l'enceinte. Le projet SETHER de l'agence nationale de la recherche prévoit la réalisation d'un prototype d'installation SEPT pour laquelle le volume total des enceintes de 10 mètres de hauteur serait  $V_e = 20\,000$  m<sup>3</sup>.

**Q 14.** En prenant pour masse volumique de l'argon  $\rho_{Ar} = 1,8$  kg·m<sup>-3</sup> et une porosité  $\varepsilon = 40$  %, déterminer la masse totale d'argon dans cette installation, en négligeant la masse d'argon contenue dans les canalisations qui relient les enceintes entre elles.

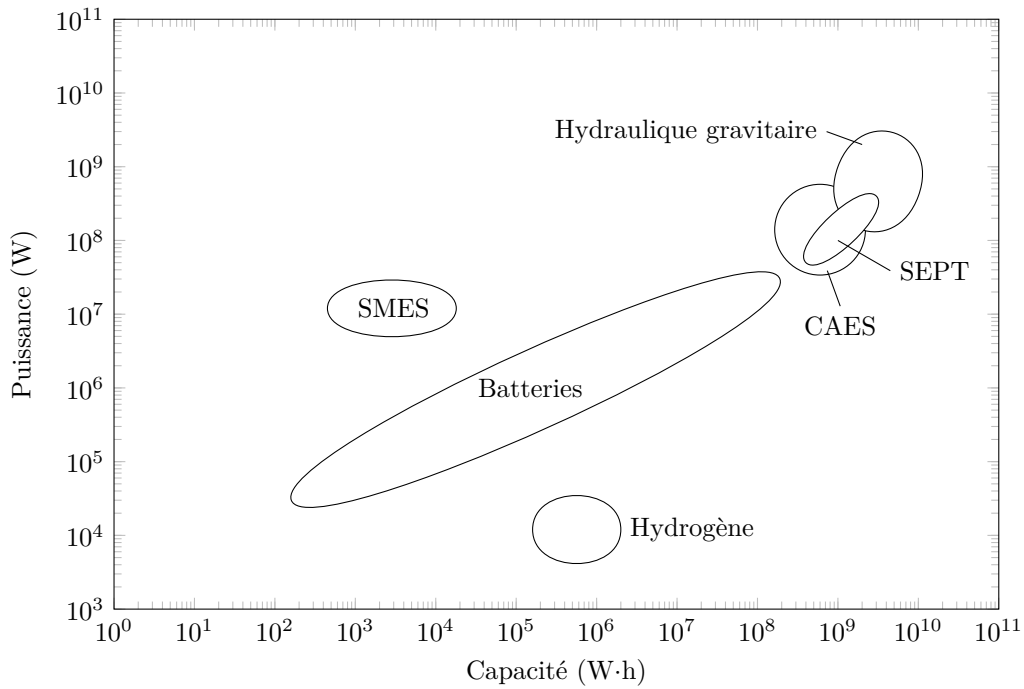


Figure 4

**Q 15.** Déterminer un ordre de grandeur de l'énergie massique que peut stocker une batterie automobile d'une masse de 10 kg et d'une capacité de 50 A·h sous 12 V (figure 5) et comparer à l'énergie massique stockée par une installation SEPT typique. La masse volumique du solide emplissant (incomplètement) les enceintes sera prise égale à  $2,5 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .



Figure 5

### I.D – Étude de la phase de déstockage

La figure 6 présente les deux cycles de stockage et de déstockage. Les débits massiques d'argon sont supposés identiques lors des deux phases.

En déstockage, le gaz circule dans le sens opposé de celui du stockage, ce qui était une compression de  $T_{2n}$  à  $T_1$  lors du stockage devient une détente de  $T_1$  à  $T_{2d}$ .

**Q 16.** Montrer que

$$T_{0d} = T_{0n} \left( 1 + \frac{\Psi - 1}{\eta_{cd}} \right) \left( 1 + \frac{\eta_{ts}(1 - \Psi)}{\Psi} \right)$$

$$T_{2d} = T_{2n} \left( 1 + \frac{\Psi - 1}{\eta_{cs}} \right) \left( 1 + \frac{\eta_{td}(1 - \Psi)}{\Psi} \right)$$

où  $\eta_{cd}$  et  $\eta_{td}$  sont les rendements par rapport à l'isentropique du compresseur et de la turbine pendant la phase de déstockage.

**Q 17.** Montrer que  $T_{0d} \geq T_{0n}$  et que  $T_{2d} \geq T_{2n}$ .

**Q 18.** Dans quels cas aurait-on toujours  $T_{0d} = T_{0n}$  et  $T_{2d} = T_{2n}$  ? Cela est-il réaliste ?

**Q 19.** À chaque cycle de déstockage, la température du gaz à la sortie des enceintes doit augmenter, ce qui chauffe le matériau des enceintes. Proposer une solution pour évacuer l'excédent d'énergie en ramenant le gaz à sa température nominale.

Industriellement, afin de simplifier l'évacuation de l'excédent d'énergie, on impose généralement  $T_{2d} = T_{2n}$ .

**Q 20.** Montrer qu'il y a nécessité d'avoir un rapport de pression isentropique en stockage  $\Psi$  différent de celui en déstockage  $\Psi_d$  et donc d'utiliser deux paires de turbomachines (compresseur et turbine) différentes.

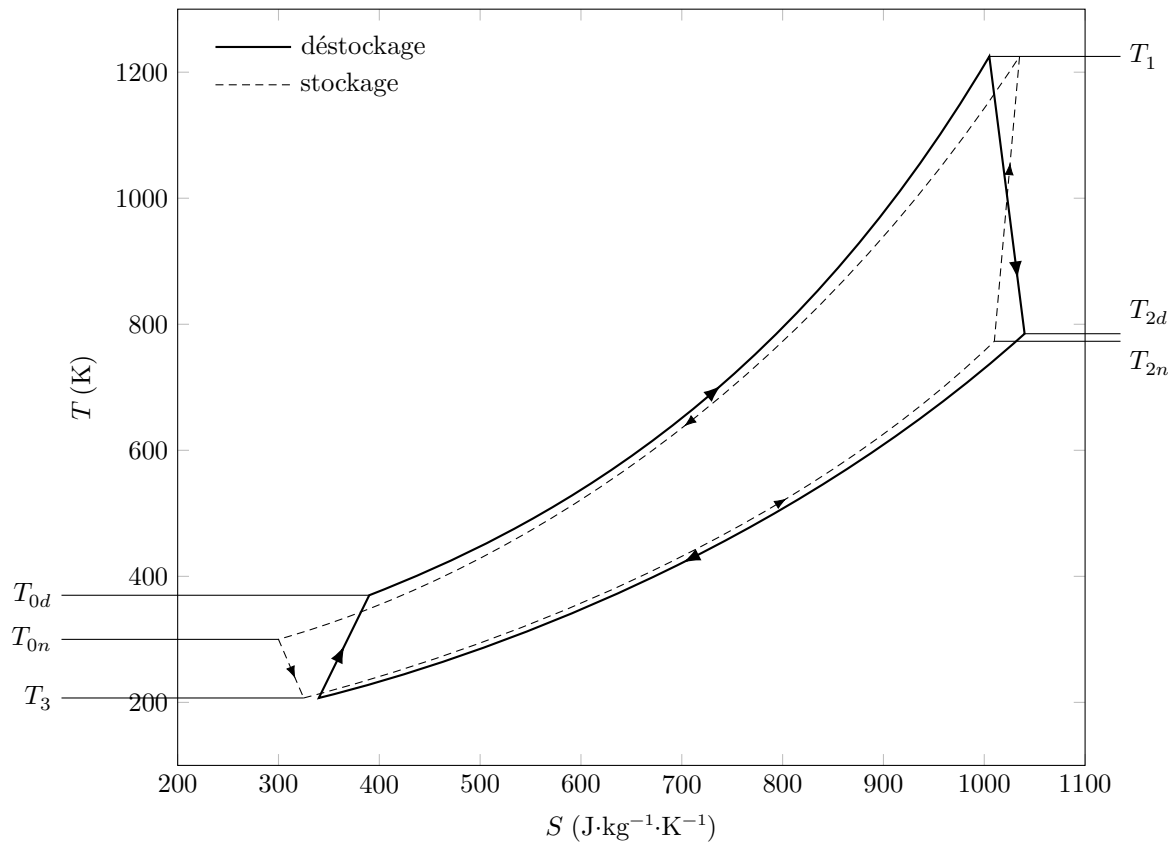


Figure 6

- Q 21.** Exprimer  $\Psi_d$  en fonction des rendements  $\eta_{cs}$  et  $\eta_{td}$  et de  $\Psi$ . Vérifier le résultat obtenu sur un cas limite.
- Q 22.** Comparer les rapports de pression au déstockage et au stockage.
- Q 23.** Par la même méthode qu'à la question 10, exprimer  $e_d$ , énergie massique mise en jeu lors du déstockage. Le rendement théorique du procédé SEPT est défini par  $\Gamma = \frac{-e_d}{e_s}$ .

La température  $T_1$  étant limitée par la température maximum que peut supporter la turbomachine pour laquelle le fluide évolue entre  $T_1$  et  $T_2$ , il est intéressant d'étudier le rendement théorique en fonction de celle-ci. La figure 7 représente les tracés du rendement théorique du procédé SEPT en fonction de  $T_1$  pour différentes valeurs de  $\eta$ , rendement isentropique supposé égal pour les quatre machines et pour  $T_{0n} = 300$  K et  $\Psi = 1,55$ .

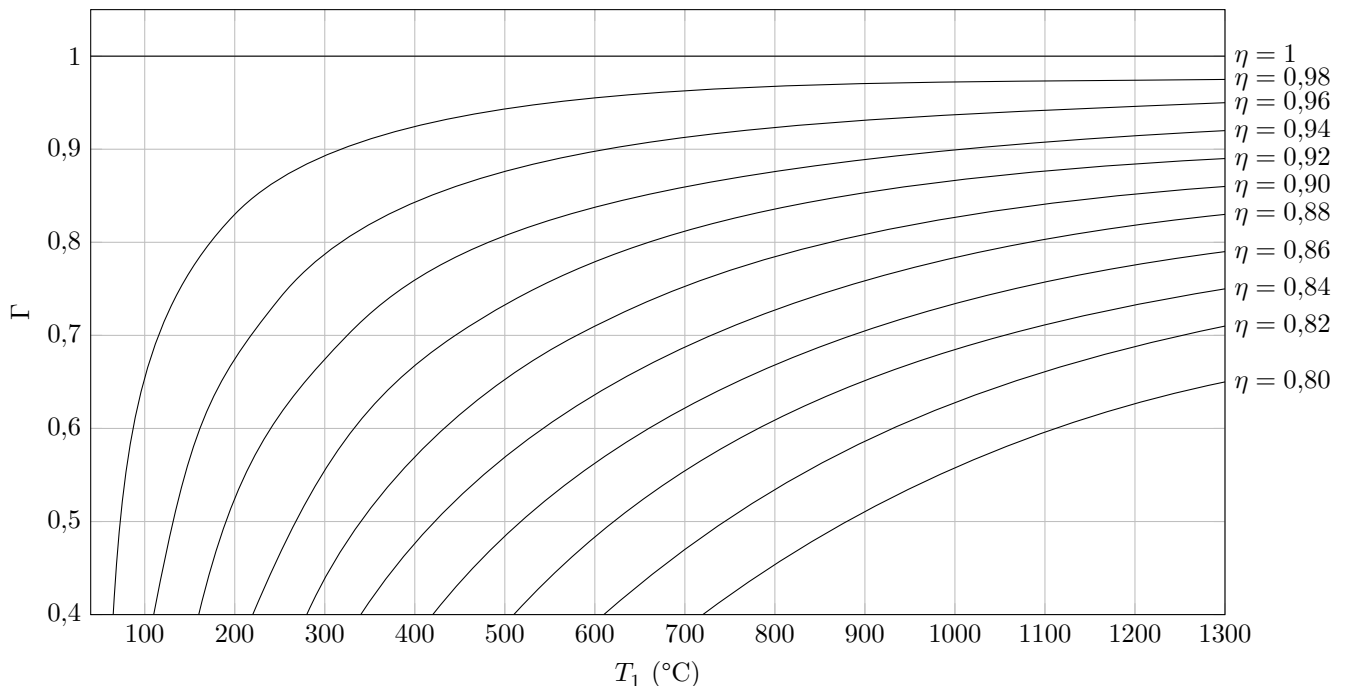


Figure 7

**Q 24.** À quelles conditions peut-on obtenir un rendement théorique de 90 % en supposant que la turbomachine chaude ne peut pas dépasser 1000 °C ?

**Q 25.** Montrer que le choix des turbomachines nécessite un compromis entre rendement isentropique et résistance aux températures élevées.

**Q 26.** Le rendement théorique étudié précédemment correspond à la limite supérieure du rendement réel puisqu'il ne prend en compte que les pertes liées aux irréversibilités des turbomachines. Citer d'autres facteurs susceptibles d'expliquer la différence entre le rendement réel et le rendement théorique.

## II Analyse de quelques caractéristiques des régénérateurs

Le régénérateur est un dispositif de stockage d'énergie thermique et son fonctionnement comprend deux périodes. Pendant la période « chaude », le gaz chaud circule et se refroidit au contact des parois solides ce qui correspond à un stockage de chaleur. Pendant la période « froide », le gaz froid circule et se réchauffe ce qui permet la récupération de la chaleur stockée.

### II.A – Influence de la porosité du milieu

La porosité  $\varepsilon$  est le rapport du volume occupé par le fluide sur le volume total de l'enceinte solide. On peut montrer que l'efficacité du stockage thermique augmente avec la porosité du régénérateur jusqu'à une valeur de porosité de l'ordre de 50 % qui correspond à un optimum.

On s'intéresse à un régénérateur solide à milieu granulaire que nous modéliserons de manière simplifiée comme un empilement de sphères identiques. On considère deux modes d'empilement : cubique et cubique à faces centrées (figure 8).

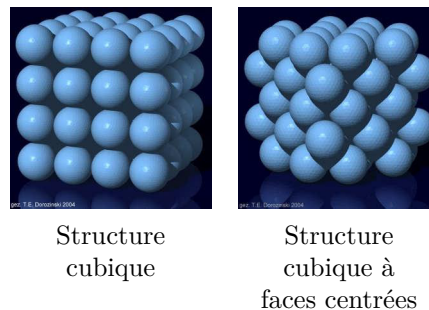


Figure 8

**Q 27.** Exprimer puis calculer la porosité théorique de chaque structure. Pourquoi dit-on que l'empilement cubique à faces centrées est un empilement compact ?

**Q 28.** Quel mode d'empilement serait le mieux adapté au remplissage d'un régénérateur ?

En réalité, lorsque les sphères sont empilées dans l'enceinte sans précautions particulières, il n'apparaît aucune périodicité, l'empilement est aléatoire et la porosité est comprise entre 0,36 et 0,40.

### II.B – Influence d'autres paramètres

#### II.B.1) Fronts thermiques et influence du coefficients d'échange

La partie I a étudié le régime établi de l'installation, mais celle-ci a besoin d'un certain nombre de cycles de stockage et de déstockage « transitoires » avant d'atteindre un régime périodique stabilisé (figure 10).

En effet, en mode stockage, l'enceinte  $H$ , initialement à la température uniforme  $T_0$ , est alimentée en gaz chaud à  $T_1$  par le haut et se réchauffe progressivement du haut vers le bas. Une zone de transition existe, se traduisant par une variation progressive de  $T_1$  à  $T_0$ . Cette zone est appelée « front thermique » (figure 9).

Un modèle développé par T.E.W. Schumann permet d'obtenir les profils de température à l'intérieur de l'enceinte. Les courbes de la figure 11 donnent les températures du fluide et du solide granulaire en fonction de  $z$ , position verticale dans l'enceinte, à différents instants et pour deux valeurs du coefficient conducto-convectif  $h$  entre ces deux milieux.

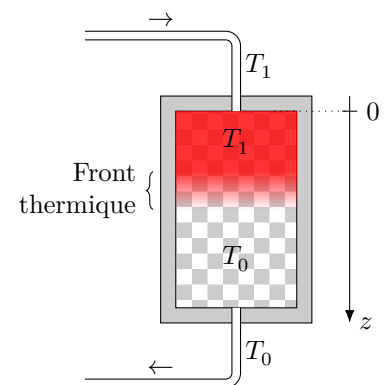


Figure 9

**Q 29.** D'après les courbes de la figure 11, comment varie la différence de température entre le fluide et le solide avec  $h$  ? Commenter.

**Q 30.** Expliquer, à l'aide de la figure 11, qu'un coefficient d'échange  $h$  plus élevé permet d'arrêter le stockage plus tard et donc de stocker d'avantage d'énergie dans le régénérateur.

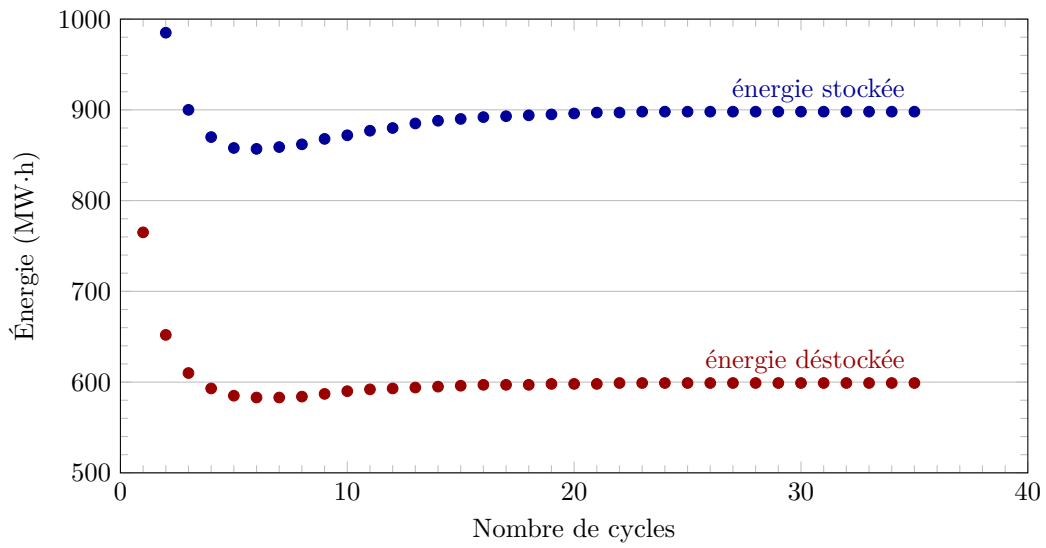


Figure 10

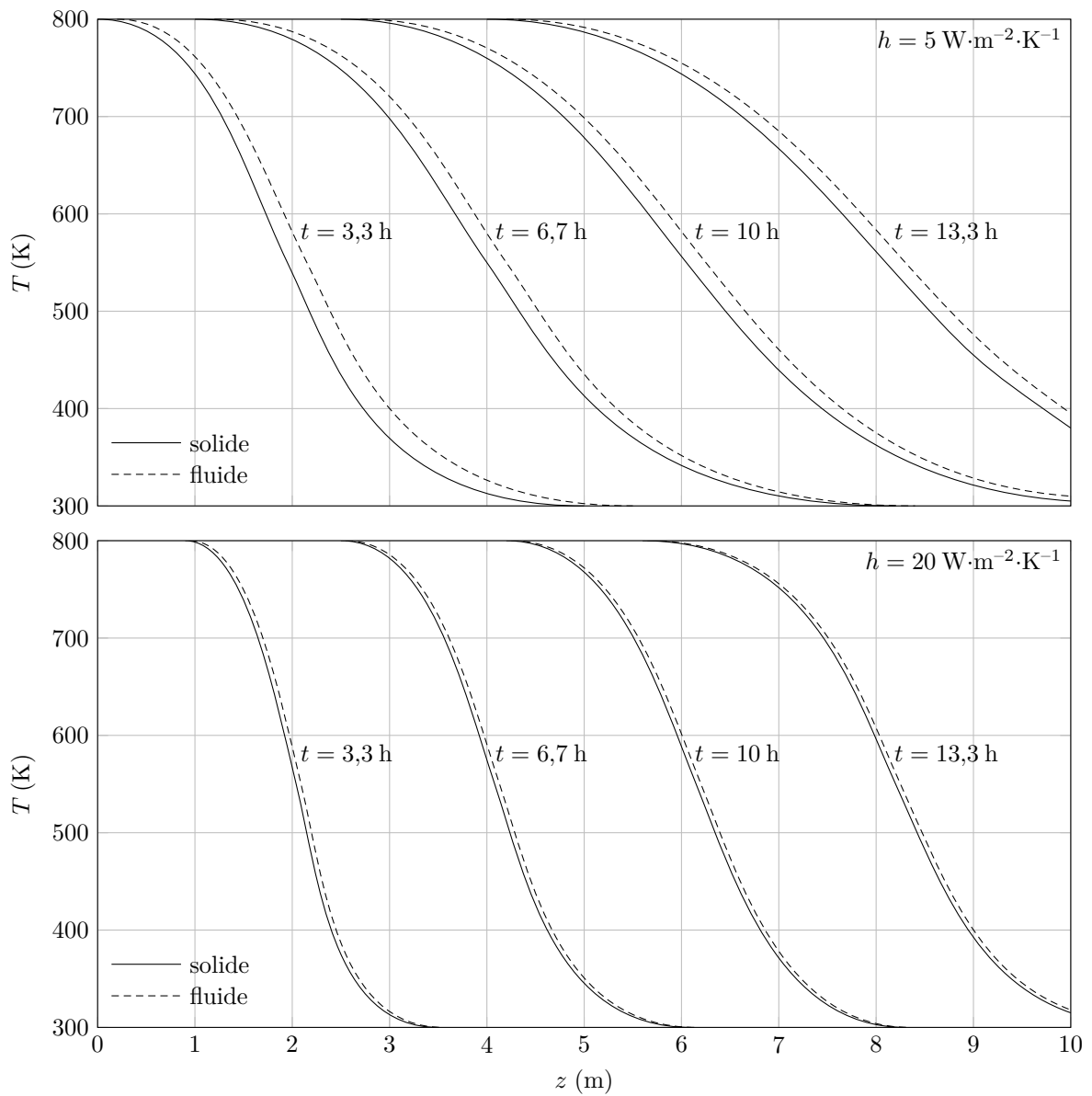


Figure 11

**Q 31.** Rappeler à quelles conditions un échange thermique entre un fluide (de température  $T_f$ ) et un solide (de température  $T_s$ ) peut être considéré réversible. Quelle devrait être la valeur de  $h$  pour que l'entropie créée lors du transfert gaz-solide soit nulle ?

### II.B.2) Influence de la largeur des enceintes

On considère pour cette question une enceinte ayant la forme d'un parallélépipède rectangle de base carrée, de largeur  $L_e$  et de hauteur  $H_e$ . La figure 12 présente l'évolution du rendement de l'installation en fonction de la largeur des enceintes.

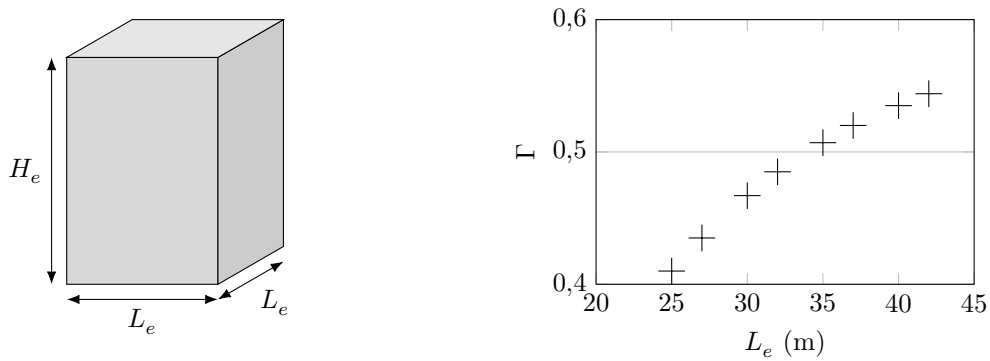


Figure 12 Rendement avec enceinte parallélépipédique

Q 32. Expliquer l'évolution du rendement en fonction de  $L_e$ .

### II.B.3) Influence du débit massique de gaz

La figure 13 présente l'évolution du rendement d'une installation SEPT en fonction du débit massique du gaz.

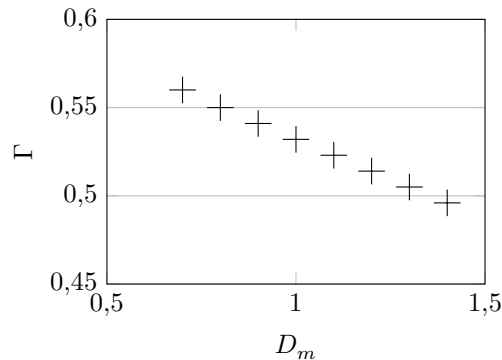


Figure 13 Rendement en fonction du débit du fluide

Q 33. Expliquer l'évolution du rendement avec le débit du gaz.

### II.C – Évolution thermique des enceintes pendant les pauses

Une installation SEPT devra quotidiennement stocker et déstocker de l'énergie à des moments de la journée bien précis déterminés par l'évolution journalière du coût de l'énergie électrique (figure 14).

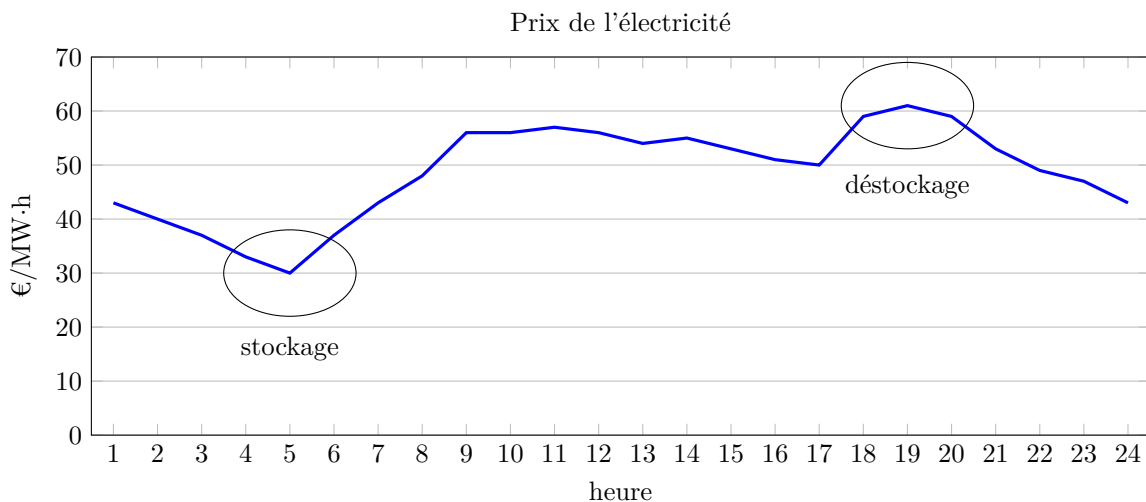


Figure 14 Phases quotidiennes de stockage et déstockage dans une installation SEPT

Entre ces périodes, le système est à l'arrêt pendant quelques heures et on observe une diffusion thermique axiale (selon  $Oz$ ) qu'on se propose d'évaluer afin de déterminer s'il est nécessaire de la prendre en compte dans l'efficacité globale du procédé.



On considère l'enceinte de la figure 12 de largeur  $L_e = 10$  m, pendant une période d'arrêt de durée  $\Delta t = 24$  h. Les matériaux réfractaires sont de porosité  $\varepsilon = 44\%$ , de conductivité thermique  $\lambda = 0,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et affichent un gradient thermique uniforme  $\frac{dT}{dz} = 200 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$ .

**Q 34.** Évaluer un ordre de grandeur de l'énergie thermique diffusée axialement et la comparer à l'énergie interne de cette enceinte  $U = 1,7 \times 10^{12}$  J. Conclure.

### II.D – Notions sur les modèles de conductivité effective d'un milieu poreux

L'étude précédente nécessite une connaissance de la conductivité thermique  $\lambda$  du milieu poreux. La conductivité thermique d'un tel système, dite conductivité thermique effective, intègre logiquement dans sa définition, les paramètres primaires que sont les conductivités thermiques intrinsèques des particules solides  $\lambda_s$  et du gaz  $\lambda_g$  ( $\lambda_s > \lambda_g$ ) ainsi que le rapport volumique entre ces deux phases, représenté par la porosité  $\varepsilon$ .

Quel que soit le modèle utilisé pour calculer la conductivité thermique effective d'un milieu granulaire, celle-ci est toujours comprise entre deux valeurs extrêmes,  $\lambda_{\min}$  et  $\lambda_{\max}$ . Une situation limite correspond à un milieu où le vecteur densité de flux de chaleur est perpendiculaire aux strates (modèle série, figure 15). L'autre situation limite correspond à une disposition des strates parallèle à la direction de la densité du flux de chaleur (modèle parallèle, figure 15).

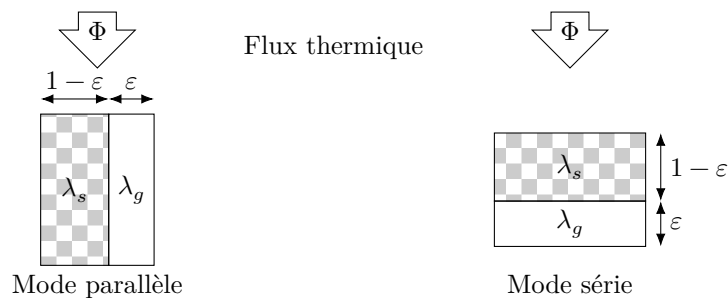


Figure 15

**Q 35.** Exprimer les conductivités dans les deux situations limites en fonction de  $\varepsilon$ ,  $\lambda_s$  et  $\lambda_g$ . Valider les expressions obtenues en considérant des cas limites.

**Q 36.** Montrer que l'une de ces deux expressions limites est toujours supérieure à l'autre. Déterminer  $\lambda_{\min}$  et  $\lambda_{\max}$ .

On donne, pour l'argon  $\lambda_g = 0,018 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et pour le sable utilisé  $\varepsilon = 0,47$  et  $\lambda_s = 0,40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

**Q 37.** Calculer les valeurs numériques de  $\lambda_{\min}$  et  $\lambda_{\max}$ .

### II.E – Mesure de la conductivité thermique effective du milieu granulaire utilisé pour les enceintes du procédé S.E.P.T.

On place un fil métallique, de rayon  $r_0$  au centre d'un bloc du matériau à étudier (sable et argon) de façon à ce qu'il le traverse verticalement. Le fil est relié à une alimentation électrique qui lui fournit un échelon de courant. On relève au cours du temps la variation de la résistance électrique du fil, ce qui permet de déterminer sa température.

On modélise ce dispositif par un fil de longueur infini plongé dans un espace totalement rempli du matériau à étudier. L'ensemble est initialement à la température uniforme  $T_0$ . À partir du temps  $t = 0$ , on applique l'échelon de courant et le fil produit un flux thermique constant par unité de longueur  $\varphi_L$ . On suppose que les transferts thermiques s'effectuent seulement par conduction. Le matériau est incompressible, de masse volumique constante  $\rho$ , de conductivité thermique  $\lambda$  et de capacité thermique massique  $c_p$ .

On admet que la répartition de température dans le matériau présente une symétrie cylindrique autour du fil électrique. On se place donc en coordonnées cylindriques  $(r, \theta, z)$  en prenant le fil comme axe, autrement dit,  $r = 0$  correspond au centre du fil.

**Q 38.** Établir l'équation différentielle vérifiée par  $T(r, t)$ , la température du matériau en fonction du temps.

On pourra introduire la diffusivité thermique du matériau définie par  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ .

**Q 39.** À un instant  $t$  donné, quelle est, en ordre de grandeur, la longueur caractéristique de variation de la température avec  $r$  ?

La résolution de l'équation précédente nécessite d'exprimer la condition limite sur la surface du fil chaud en  $r = r_0$ .

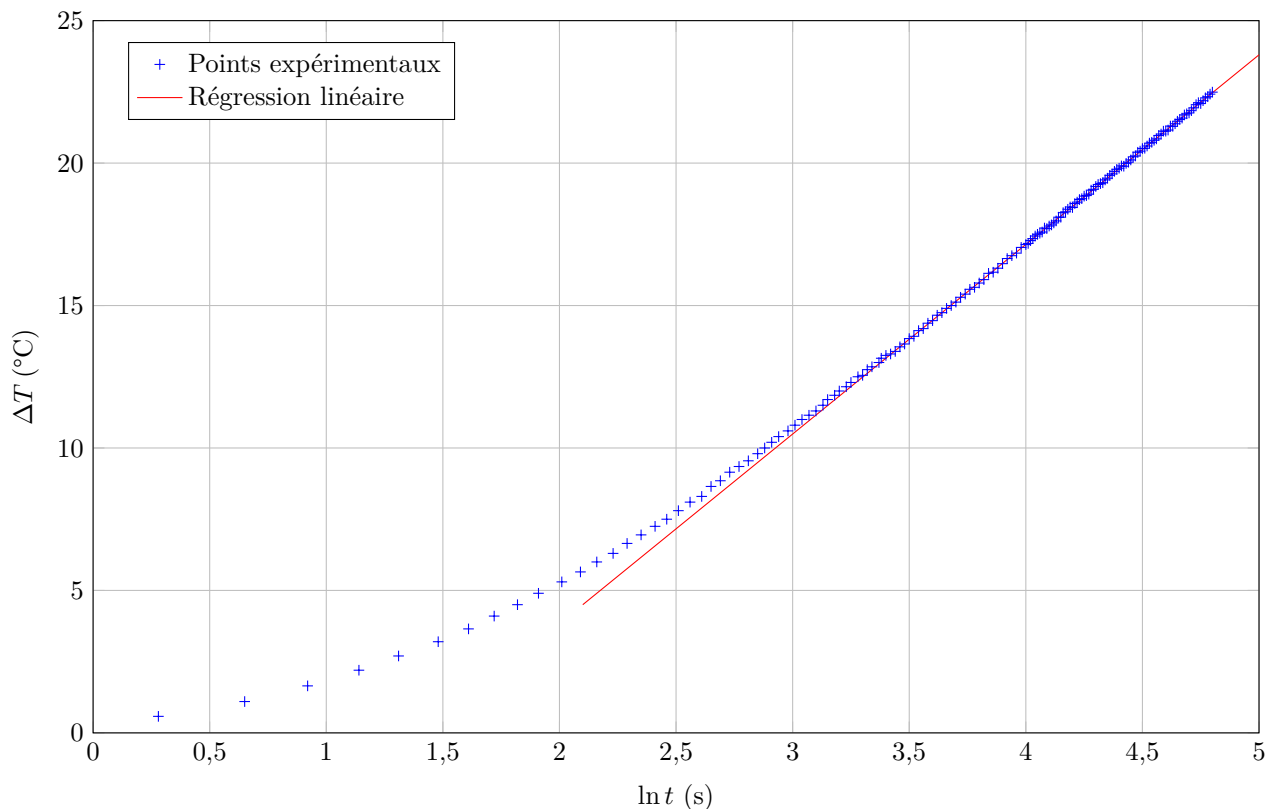
**Q 40.** Exprimer  $\frac{\partial T}{\partial r}(r_0, t)$  en fonction de  $\lambda$ ,  $r_0$  et  $\varphi_L$ .

Compte tenu de cette condition limite et si on néglige le rayon du fil devant la longueur caractéristique de variation de la température avec  $r$ , la solution de l'équation de la question 38 s'écrit

$$T(r, t) = T_0 + \frac{\varphi_L}{4\pi\lambda} E\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad \text{avec} \quad E(x) = \int_x^{+\infty} \frac{e^{-u}}{u} du.$$

Pour des valeurs de  $x$  petites devant 1, on peut utiliser l'approximation  $E(x) = -\gamma - \ln(x)$  où  $\gamma$  est une constante.

**Q 41.** Donner une expression approchée de  $T(r_0, t)$  aux temps longs en précisant l'échelle de temps pertinente. La figure 16 présente le relevé expérimental de  $\Delta T = T(r_0, t) - T_0$  en fonction du temps pour les enceintes d'un procédé SEPT.



**Figure 16**

**Q 42.** Montrer que ces mesures sont en accord avec les résultats théoriques précédents.

**Q 43.** Estimer un ordre de grandeur de la conductivité thermique effective du régénérateur étudié sachant que le fil utilisé a une longueur  $l = 20$  cm et qu'il émet un flux thermique total  $\varphi = 0,64$  W.

**Q 44.** Commenter le résultat.

### Données

Constante d'Avogadro	$\mathcal{N}_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante de Boltzmann	$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
Constante des gaz parfaits	$R = k_B \mathcal{N}_A = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

Opérateur laplacien en coordonnées cylindriques

$$\Delta V = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$

• • • FIN • • •

# Physique-chimie 1

## Présentation du sujet

Le sujet traite du stockage d'énergie par pompage thermique (procédé SEPT). Il est constitué de deux parties indépendantes et aborde quasi-exclusivement le programme de thermodynamique à l'exception de quelques questions de chimie.

## Analyse globale des résultats

Le sujet, composé de 44 questions, est de longueur raisonnable compte tenu de la durée de l'épreuve. Il comporte plusieurs questions de cours ou d'application directe, permettant aux candidats rigoureux de valoriser leurs acquis de l'année.

Certaines questions (Q5, Q6, Q12, Q23, Q24, Q26, Q29) étaient au moins partiellement accessibles par lecture directe du sujet. Traiter proprement ces questions de cours et d'application directe permettait de se situer au-dessus de la moyenne !

On peut ainsi noter que sur certaines copies par ailleurs relativement faibles, les questions de cours, plutôt bien traitées, ont conduit à un total de points sensiblement égal à celui de candidats ayant bien mieux compris le sujet dans son ensemble (et traité plus de questions), mais n'ayant pas apporté un soin suffisant à la rédaction.

Le sujet comporte un nombre non négligeable de questions faisant appel à une analyse qualitative du problème physique. Ces questions, bien que largement abordées, ont trop souvent donné lieu à des réponses peu précises, ou encore paraphrasant l'énoncé. Ce type de réponse n'a pas été valorisé.

Tout comme les années précédentes, les applications numériques données avec un nombre de chiffres significatifs non pertinent ou une mauvaise unité n'ont pas été valorisées.

Les études thermodynamiques en système ouvert et en système fermé sont trop souvent confondues. Les champs d'application de ces deux études sont alors incompris et leurs mises en œuvre, de fait, incohérentes. Certains confondent également enthalpie et énergie interne.

Le jury a été cette année plus particulièrement frappé par les confusions ou le manque de justesse du vocabulaire employé. On peut citer par exemple :

- variation au lieu d'écart ou différence ;
- réversible / renversable ;
- isentropique / isotherme ;
- réversible / adiabatique ;
- isentropique / adiabatique ;
- transformation / réaction ;
- travail / travail utile ;
- loi de Fick / loi de Fourier ;
- stockage de puissance...

La présentation de certaines copies est particulièrement peu soignée, ce qui empêche parfois la compréhension des éléments apportés par le candidat. Ces copies ont été pénalisées par un **malus de présentation**. À contrario, certains candidats font preuve d'une grande rigueur de présentation, qui a été valorisée par un **bonus**.

## Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

### Partie I

**Q1.** Une démonstration était attendue pour cette question de cours. De nombreux candidats n'ont pas défini les grandeurs employées ( $Q_c, W...$ ) ou commis des erreurs de signe (selon qu'on algébrise ou non les transferts d'énergie). Le coefficient de performance (COP) était à exprimer en fonction de  $T_H$  et  $T_B$  et non pas de  $T_c$  et  $T_f$ .

Cette question était notée sur 5 points, répartis de la façon suivante :

- définition du COP, les termes étant explicités ;
- traduction du premier principe de la thermodynamique ;
- traduction du second principe de la thermodynamique ;
- traduction du théorème de Carnot ;
- expression du COP en fonction de  $T_H$  et  $T_B$ .

**Q3.** Une analyse du produit du COP de la pompe à chaleur et de l'efficacité du moteur était attendue.

**Q4.** Le tracé de deux cycles non forcément rectangulaires mais correctement orientés suffisait à obtenir les points.

**Q5.** Les éléments sont généralement correctement positionnés sur le cycle bien que l'ensemble soit rarement justifié. Il était nécessaire, comme demandé dans le sujet, de reproduire le cycle de la figure 3 pour espérer avoir les points.

**Q6.** L'inégalité se déduisait par simple lecture graphique. La justification de l'inégalité a par contre posé problème, les raisonnements étant souvent peu rigoureux.

**Q7, Q8.** De nombreux manques rédactionnels conduisent à des notes moyennes sur ces questions. Le cadre d'application des lois de Laplace n'est par exemple que rarement totalement explicité. Beaucoup de candidats ne font pas la différence entre premier principe et premier principe en écoulement stationnaire, ou encore « aménagent » le premier principe en écoulement stationnaire de façon à faire apparaître les signes « - » de l'expression de  $\eta_{ts}$ .

Pour la question 7, notée sur 5 points, il fallait :

- citer le premier principe en écoulement stationnaire (ou industriel) (« premier principe » ne suffit pas) ;
- préciser que les variations d'énergies potentielle et cinétique sont négligées ;
- préciser que la transformation est adiabatique.

On obtient alors :

- $\Delta h = w$  ;
- les expressions recherchées.

**Q9.** Les réponses ont souvent consisté à tenter de retrouver l'expression fournie, sans la rigueur nécessaire.

**Q10.** Cette question a été généralement bien traitée lorsque les résultats de Q8 étaient corrects.

**Q11.** De nombreuses erreurs sur l'application numérique, en raison notamment d'une expression de  $c_p$  fautive (confusions entre capacité molaire et massique...).

**Q12.** Question très souvent bien traitée. Cependant, on retrouve souvent des explications avec des adjectifs non-définis du type « Le procédé SEPT est le plus *performant* » (pour alimenter un téléphone

portable ?) ou bien « Le procédé SEPT est le plus *adapté* » (pour faire quoi ?) ou encore « Le procédé SEPT est le plus *fiable* ».

**Q13.** Des ordres de grandeur souvent aberrants et non critiqués.

**Q14.** L'application numérique fréquente  $m = 14\,400\text{ kg}$  n'a pas été valorisée (5 chiffres significatifs !). De même le volume des deux enceintes était clairement  $V_e$  et non  $2V_e$ .

**Q15.** Beaucoup d'erreurs sur les unités. Le passage du Wh au Joule pose problème.

**Q16.** Beaucoup de réponses allusives. Le résultat étant fourni, une démonstration précise était attendue. Il était ainsi nécessaire d'expliciter les rendements  $\eta_{cd} = \frac{T_{0d\text{ is}} - T_3}{T_{0d} - T_3}$  et  $\eta_{cd} = \frac{T_1 - T_{2d}}{T_1 - T_{2d\text{ is}}}$  en fonction des températures.

**Q17.** Question mal traitée, les démonstrations étant rarement rigoureuses. Par exemple, pour montrer que  $ab \geq 1$ , il ne suffit pas de prouver que  $a \geq 1$  et  $b > 0$  !

**Q18, Q19.** Réponses souvent bien argumentées.

**Q21.** Assez peu de bonnes réponses pour ce calcul. Les formes données sont rarement simplifiées.

**Q24, Q25.** Le graphique est rarement correctement exploité et la notion de compromis rarement vraiment dégagée.

**Q26.** L'effet Joule est souvent mentionné pour désigner toute dissipation d'énergie sous forme thermique quelle qu'en soit l'origine. Certains candidats parlent de « fuite » d'argon pour justifier d'une baisse de rendement.

## Partie II

**Q27.** Le cours de cristallographie est souvent bien connu et les réponses correctement justifiées et rédigées. La structure cubique, qui n'est pas au programme, se déduisait de la figure 8. Porosité et compacité ont cependant été le plus souvent confondues.

**Q28.** Il suffisait ici de faire référence à l'énoncé ce que beaucoup ont bien fait.

**Q29.** Exploitation généralement correcte des courbes de température. La justification nécessitait la loi de Newton, non exigible, qui aurait dû être rappelée dans l'énoncé.

**Q30.** La question était complexe. Très peu de candidats ont fait le lien entre la montée en température du fond de l'enceinte et la condition d'arrêt liée à la température de sortie. De même pour l'augmentation de la capacité de stockage.

**Q32, Q33.** Trop de candidats se sont contentés de décrire l'évolution de  $\Gamma$  en fonction de  $L_e$  ou de  $D_m$  (ce qui ne constitue pas une explication !), sans faire le lien avec la vitesse de l'écoulement.

**Q34.** Cette question a souvent été bien traitée.

**Q35, Q36.** De fréquentes confusions entre expressions série et parallèle, des problèmes de dimension dans les résistances thermiques du solide et du gaz. On ne peut pas sommer les conductivités ou leurs inverses « d'après le cours d'électricité » ! Des cas limites aberrants auraient dû alerter les candidats sur un problème de démarche. Le jury a d'ailleurs valorisé les candidats qui, sans forcément trouver leur erreur, ont noté l'incohérence des valeurs limites trouvées. Ils ont en effet fait preuve de sens physique.

**Q38.** Le système étudié n'est pas toujours défini ! Beaucoup d'erreurs conduisent à des expressions non homogènes. Trop peu de candidats sont capables de mettre en œuvre un bilan de façon rigoureuse. Par exemple, le calcul de transfert thermique est souvent mal mené en oubliant la dépendance en  $r$  de la surface du cylindre. Le bilan est souvent mené avec l'énergie interne, le travail des forces de pression n'étant alors la plupart du temps pas explicité.

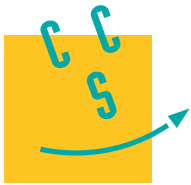
**Q39 – Q44.** Questions souvent bien traitées par les candidats qui les ont abordées.

## Conclusion

Il est recommandé aux futurs candidats :

- de ne pas aller trop vite sur les questions proches du cours. **Il est beaucoup plus pertinent de traiter un peu moins de questions en prenant le temps de justifier les raisonnements.** Le jury, en détaillant dans ce rapport le barème de certaines questions, souhaite une réelle prise de conscience de ces manques rédactionnels.
- **d’exprimer les valeurs numériques avec un nombre approprié de chiffres significatifs** et de ne pas hésiter à commenter ces valeurs.

Cette année, en raison de la pandémie, le concours s’est déroulé dans des conditions très particulières. Le jury tient particulièrement à féliciter l’ensemble des candidats pour la résilience et la motivation dont ils ont fait preuve.



## Étude simplifiée du vol d'un Airbus A320

Un formulaire et certaines valeurs numériques sont regroupées en fin d'énoncé.

### I L'Airbus A320 en vol

#### I.A – Éléments de description d'une aile

On considère un avion de ligne de type Airbus A320. L'avion, de masse  $m = 60\,000$  kg supposée constante, est équipé de deux turboréacteurs (un sous chaque aile) délivrant une poussée totale  $\vec{F}$ . La figure 1 rappelle la signification des termes utiles à la description d'une aile.

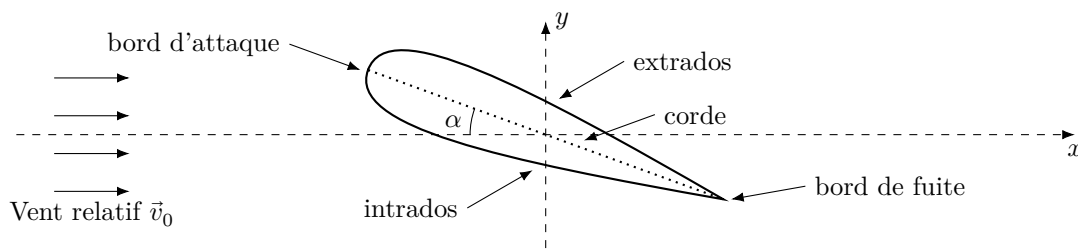


Figure 1

Chaque aile mesure environ 12 mètres de long et sa corde 3 mètres en moyenne. Le profil de chaque aile est supposé symétrique.

On se place dans le référentiel de l'avion  $(O, x, y)$  (figure 1). L'aéronef est dans un flux d'air unidirectionnel et stationnaire, dit vent relatif, de vitesse  $\vec{v}_0 = v_0 \vec{e}_x$  et d'angle d'incidence  $\alpha$  par rapport à l'aile. L'écoulement de l'air est partout supposé incompressible, homogène et stationnaire. Chaque aile subit alors une force de portance d'intensité  $\frac{1}{2} \rho S v_0^2 C_y$  et une force de traînée d'intensité  $\frac{1}{2} \rho S v_0^2 C_x$  où  $\rho$  est la masse volumique de l'air et  $S$  la surface portante de l'aile. La valeur des coefficients  $C_x$  et  $C_y$  varie avec l'angle d'incidence comme indiqué figure 2. Pour l'écoulement autour de l'aile, dans le cadre de ces hypothèses, vitesse  $v$  et pression  $P$  sont liées par la relation de Bernoulli  $P + \frac{1}{2} \rho v^2 = P_t = \text{Cte}$ .  $P_t$  est appelé *pression totale*.

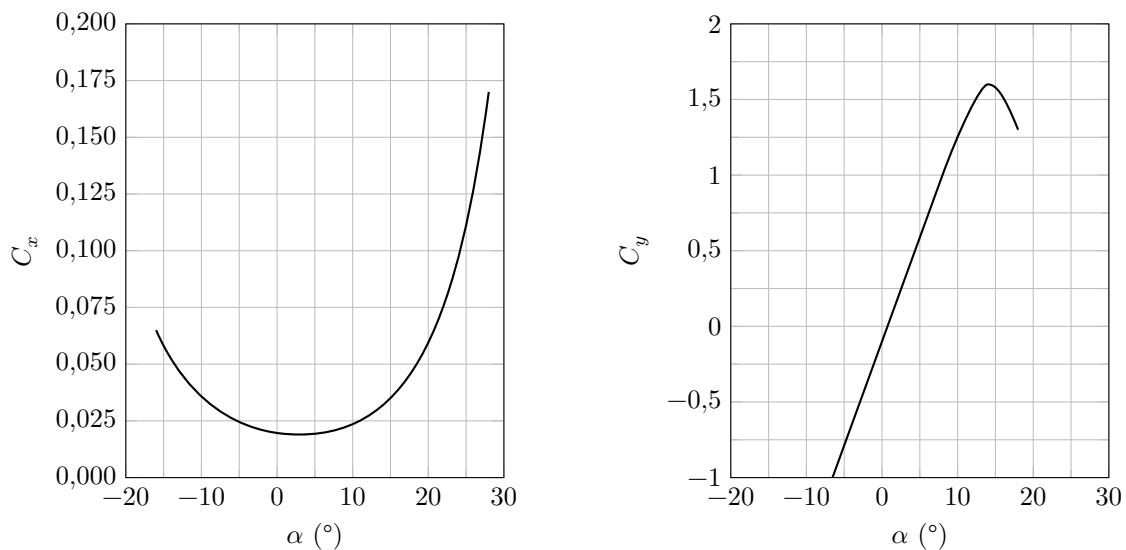


Figure 2

**Q 1.** Recopier sommairement le schéma de la figure 1 en y faisant figurer la résultante aérodynamique  $\vec{R}$  ainsi que ses composantes suivant les axes  $(Ox)$  et  $(Oy)$ , notées  $\vec{R}_x$  et  $\vec{R}_y$ .

On appelle *angle de calage*, l'angle  $\beta$  que fait la corde des ailes avec l'axe longitudinal du fuselage de l'avion (figure 3). Pour l'avion étudié, il vaut  $3^\circ$ . On appelle *assiette* l'angle que fait l'axe longitudinal de l'avion avec l'horizontale et *pente* l'angle que fait le support de la vitesse du centre de masse de l'avion (sa trajectoire) avec l'horizontale. En vol horizontal (pente nulle) et à assiette nulle, la vitesse du centre de masse de l'avion est dirigée suivant son axe longitudinal. En phase de montée ou de descente, le pilote peut modifier l'assiette à pente constante, modifiant ainsi l'angle d'incidence.

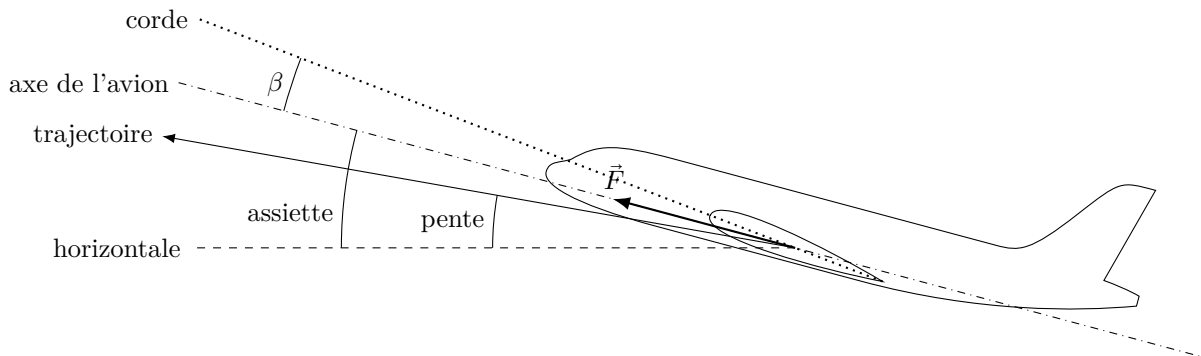


Figure 3

On suppose que le centre de poussée de l'avion correspond à son centre de masse et que la force de poussée totale  $\vec{F}$  produite par les deux turboréacteurs est dirigée selon l'axe longitudinal du fuselage (figure 3). On assimile les coefficients aérodynamiques  $C_x$  et  $C_y$  de l'avion à ceux des ailes. La vitesse du centre de masse de l'avion est considérée constante dans le référentiel terrestre, supposé galiléen.

**Q 2.** On considère l'avion en vol de croisière à pente et assiette nulles (trajectoire confondue avec l'axe de l'avion). Écrire, dans ces conditions, l'équation, dite de sustentation, liant la masse de l'avion  $m$  à  $C_y$  et l'équation, dite de propulsion, liant  $F$  à  $C_x$ .

**Q 3.** Estimer numériquement la vitesse de croisière et la poussée nécessaire à son maintien.

### I.B – Rôle des ailes

En notant  $P_0$  la pression en avant de l'avion,  $P$  la pression en un point de l'aile et  $P_t$  la pression totale en ce même point, on définit le coefficient de pression en ce point par  $K_p = \frac{P - P_0}{P_t - P_0}$ . La figure 4 donne l'allure du coefficient de pression d'une aile d'A320 pour trois valeurs d'angle d'incidence en fonction de la position le long de l'intrados et de l'extrados, 0 représentant le bord d'attaque et 1 le bord de fuite. La courbe en trait continu correspond à l'extrados, les pointillés à l'intrados. À incidence nulle, les courbes pour l'intrados et l'extrados sont confondues.

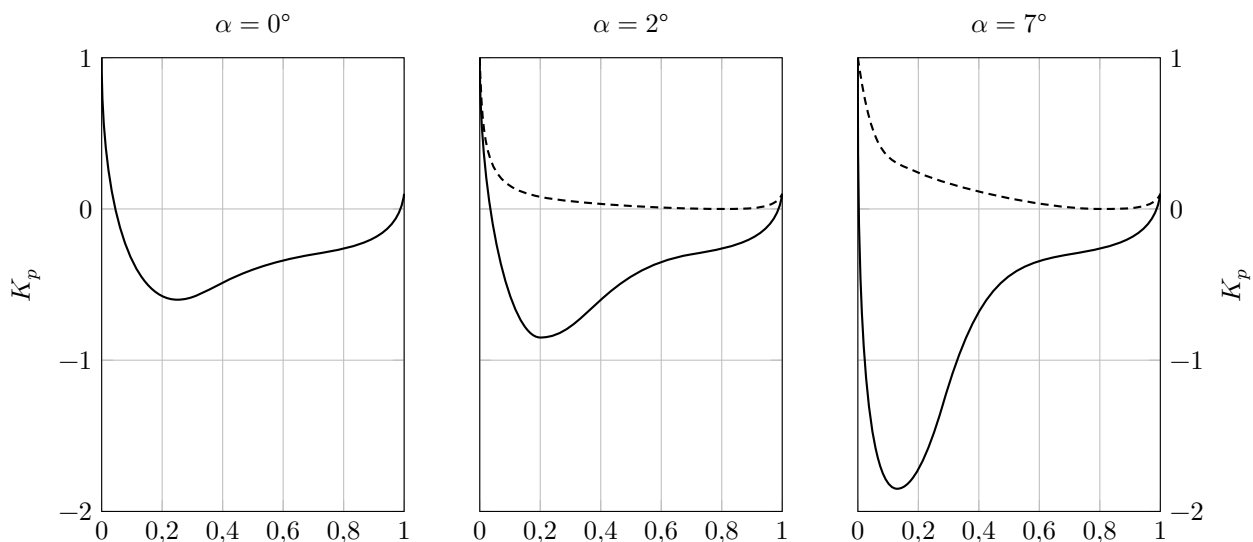


Figure 4

**Q 4.** À l'aide de la figure 4, expliquer l'existence d'une force de portance pour les angles d'incidence non nuls.

**Q 5.** Justifier que cette force de portance est nulle pour un angle d'incidence nul.

**Q 6.** À partir de la figure 2, en considérant que la trajectoire est horizontale et que l'assiette est non nulle, expliquer l'existence d'une vitesse minimale  $v_{\min}$ , dite *vitesse minimale de sustentation*, en-deçà de laquelle la sustentation ne peut plus être assurée. On dit alors que l'avion *décroche*.



- Q 7. Exprimer la vitesse  $v_{\min}$ .
- Q 8. Pour l'aile considérée, estimer la valeur numérique de l'incidence permettant de voler à  $v_{\min}$ .
- Q 9. Estimer la valeur numérique de  $v_{\min}$  pour l'aile considérée.
- Q 10. Pourquoi cette situation risque-t-elle de se présenter en phase d'atterrissage ?

Afin de permettre un atterrissage en sécurité, les ailes d'avion sont équipées de becs sur le bord d'attaque et de volets sur le bord de fuite. Ces éléments mobiles permettent de modifier le profil de l'aile et de faire ainsi varier ses coefficients aérodynamiques et sa surface portante. La figure 5 montre l'influence des becs et des volets sur le  $C_y$  de l'aile.

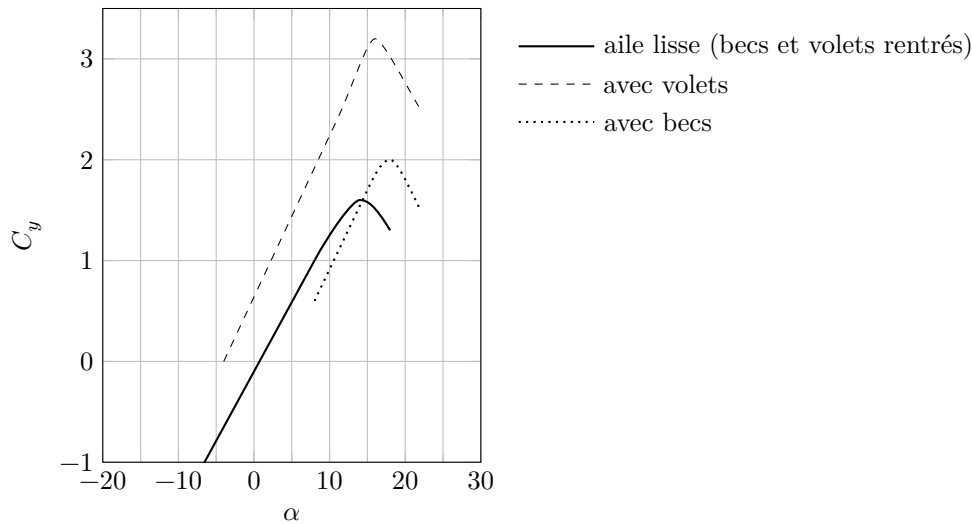


Figure 5

- Q 11. En s'appuyant sur la figure 5 et en sachant que, pour des raisons de sécurité, l'atterrissage doit se faire à  $250 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , discuter qualitativement le rôle des becs et des volets.

### I.C – Le vol plané

Le rendement d'une aile se caractérise par sa finesse, notée  $f$ . Considérons un avion en l'air qui coupe ses moteurs et poursuit en vol plané descendant (sans propulsion) à vitesse constante sur une pente constante avec une assiette non nulle. La finesse de l'avion est définie comme le rapport entre la distance horizontale parcourue avant d'atteindre le sol et la hauteur de chute.

- Q 12. À partir d'un schéma représentant les forces s'exerçant sur l'avion, exprimer la finesse de l'aile en fonction du rapport  $C_y/C_x$ .

La figure 6 présente la *polaire de type Eiffel* de l'aile d'un A320. Il s'agit de la courbe représentant, pour un nombre de Reynolds donné, la valeur de  $C_y$  en fonction de celle de  $C_x$  pour chaque valeur de l'angle d'incidence.

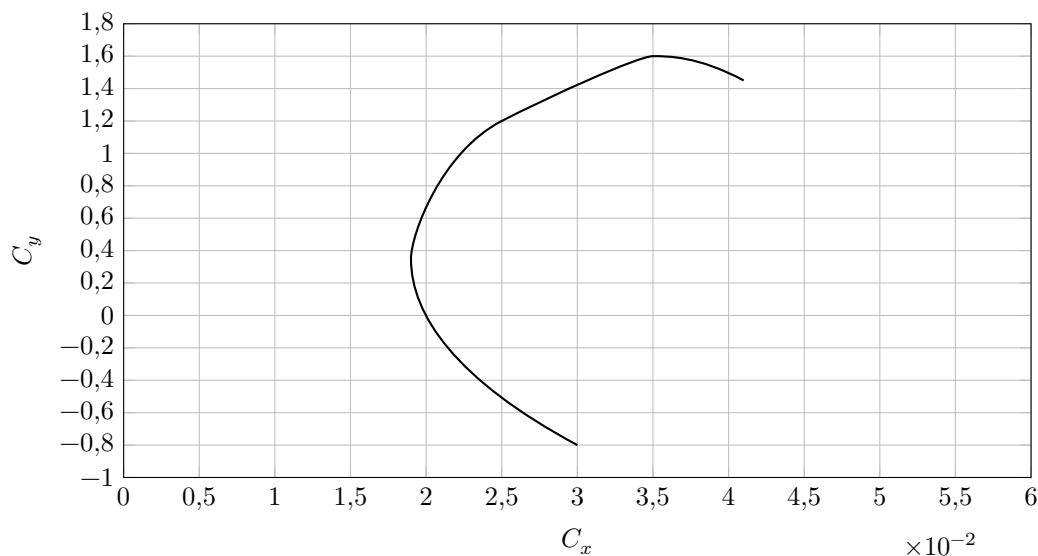


Figure 6

- Q 13. Comment se traduit graphiquement la finesse maximale sur la polaire de type Eiffel ?
- Q 14. En utilisant la figure 6, évaluer numériquement la finesse maximale de l'aile considérée.

**Q 15.** En déduire la distance horizontale maximale que peut parcourir l'avion en vol plané en cas de panne de moteur à 1000 mètres au dessus du sol.

**Q 16.** En réalité, la finesse de l'avion complet (ailes, fuselage, moteurs, empennage, dérive...) est deux fois moins importante que celle de ses ailes. Proposer une explication.

## II Turboréacteur double corps, avec soufflante, à flux séparés

Cette partie étudie, de façon simplifiée, le fonctionnement du turboréacteur double-flux séparés et double-corps du type CFM56 qui équipe l'Airbus A320. Pour cela, on se place dans le cadre d'un test au sol sur un banc d'essai fixe. La figure 7 présente le schéma de principe simplifié du turboréacteur.

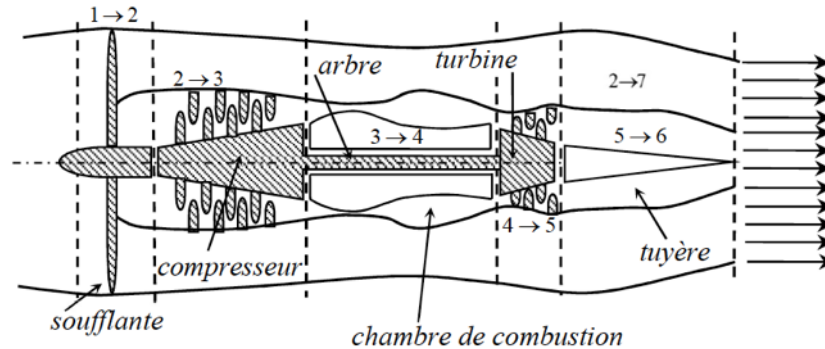


Figure 7

L'air est aspiré (étape  $1 \rightarrow 2$ ) par la soufflante à la température  $T_1 = 288 \text{ K}$  et à la pression  $P_1 = 1 \text{ bar}$ . Il se divise ensuite en deux flux, le flux primaire de débit massique  $D_{m1}$  et le flux secondaire de débit massique  $D_{m2}$ . On note  $\beta = D_{m2}/D_{m1} = 5,7$  le facteur de by-pass (taux de dilution) et  $D_m = D_{m1} + D_{m2}$  le débit massique total. Le flux primaire, dit *flux chaud* du fait de son passage dans la chambre de combustion, décrit dans le corps principal du turboréacteur les étapes suivantes :

- $2 \rightarrow 3$ , compression de  $P_2$  à  $P_3$  par un compresseur axial ;
- $3 \rightarrow 4$ , dans la chambre de combustion où le carburant est injecté, le mélange air-carburant est chauffé par combustion. La flamme est confinée au voisinage des injecteurs alimentés par un débit de kérosène ici négligé devant celui de l'air qui traverse la chambre. La température (température de flamme) s'abaisse ensuite rapidement dans la chambre pour atteindre une valeur compatible avec la tenue des matériaux de la turbine. Les caractéristiques de l'air ne sont pas modifiées par la combustion. On prendra en sortie de la chambre de combustion  $T_4 = 1450 \text{ K}$ . La chambre est supposée isobare ;
- $4 \rightarrow 5$ , détente partielle dans la turbine axiale ;
- $5 \rightarrow 6$ , détente dans la tuyère, de la pression  $P_5$ , à vitesse supposée nulle, jusqu'à la pression ambiante  $P_6 = 1 \text{ bar}$  où une première contribution à la poussée est produite.

Le flux secondaire, dit *flux froid*, s'écoule sans perte de charge autour du corps principal et passe directement dans une tuyère séparée de la première où l'essentiel de la poussée est produite. En sortie de cette tuyère  $P_7 = 1 \text{ bar}$  et la température est notée  $T_7$ .

Les taux de compression de la soufflante et du compresseur sont respectivement donnés par  $P_2/P_1 = 2$  et  $P_3/P_2 = 13$ .

On suppose que le régime est stationnaire et que l'énergie potentielle de pesanteur du fluide est partout négligeable devant les autres grandeurs énergétiques. De même on négligera partout l'énergie cinétique du fluide sauf en sortie des tuyères. Les évolutions dans la tuyère, la turbine et le compresseur sont supposées adiabatiques et réversibles. Le système ne comporte aucune pièce mobile en dehors de la turbine, du compresseur et de la soufflante. Le compresseur, la turbine et la soufflante ont un arbre commun supposé sans perte mécanique. On néglige aussi les pertes mécaniques dans le compresseur et dans la turbine.

**Q 17.** On modélise le kérosène par le décane  $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ . En s'appuyant sur une modélisation qui sera justifiée, exprimer puis évaluer l'élévation maximale de température lors de la combustion d'une mole de décane en présence de la quantité juste suffisante d'air. Les produits obtenus sont du dioxyde de carbone et de l'eau.

Dans le cadre des hypothèses du problème, hormis dans la chambre de combustion, le travail massique utile reçu par le gaz pour une transformation de l'état  $i$  vers l'état  $j$  est donné par

$$w_{i \rightarrow j} = C_{p \text{ mass}}(T_j - T_i) + \frac{1}{2}(c_j^2 - c_i^2)$$

où  $c_i$  est la vitesse du gaz dans l'état  $i$  et  $c_j$  celle du gaz dans l'état  $j$  et où  $C_{p \text{ mass}}$  désigne la capacité thermique massique du gaz.

**Q 18.** Établir l'expression de la pression  $P_j$  en fonction de  $T_i$ ,  $T_j$ ,  $P_i$  et du coefficient isentropique de l'air  $\gamma$ .

- Q 19.** En exploitant le couplage mécanique entre turbine, compresseur et soufflante, établir les expressions littérales et les valeurs numériques des températures  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_5$  et de la pression  $P_5$  en sortie de turbine.
- Q 20.** Établir l'expression littérale et la valeur numérique de  $c_6$ , vitesse du gaz du flux chaud à la sortie de la tuyère.
- Q 21.** Établir également l'expression littérale et la valeur numérique de  $c_7$ , vitesse du gaz du flux froid à la sortie de la tuyère.
- Q 22.** Par un bilan de quantité de mouvement sur une surface de contrôle judicieusement choisie, justifier que les poussées produites par les tuyères relatives aux flux chaud et froid sont respectivement données par :  $F_c = D_{m1}c_6$  et  $F_f = D_{m2}c_7$ .
- Q 23.** Exprimer la poussée  $F$  du turboréacteur complet uniquement en fonction de  $D_m$ , des vitesses d'éjection  $c_6$  et  $c_7$  et du facteur de by-pass.
- Q 24.** En déduire l'expression et la valeur numérique de la poussée par unité de débit massique  $D_m$ , dite *poussée spécifique* du turboréacteur, notée  $F_s$ .
- Q 25.** Quel est le pourcentage de la poussée assurée par le flux chaud ?
- Q 26.** Lors d'un essai au sol sur banc fixe, le turboréacteur délivre une poussée de 20 kN. Quel débit massique  $D_m$  doit alors assurer la soufflante ?
- Q 27.** Ce débit massique permet-il d'obtenir la même valeur de la poussée en vol de croisière ? Justifier qualitativement.

### III NOx et production de gaz à effet de serre

En consommant du kérosène, les moteurs d'avions entraînent le rejet de nombreux polluants parmi lesquels les monoxyde d'azote NO et dioxyde d'azote NO<sub>2</sub>, regroupés sous l'appellation NOx. Ces composés sont responsables d'une augmentation de la production d'ozone O<sub>3</sub>, gaz à effet de serre, dans la basse atmosphère.

Le monoxyde d'azote NO est obtenu par oxydation du diazote N<sub>2</sub> à haute température lors de la phase de combustion, modélisée par l'équation de réaction



**Q 28.** Calculer l'enthalpie standard de réaction associée à la réaction (III.1). Commenter.

**Q 29.** En se plaçant dans l'approximation d'Ellingham, évaluer la fraction molaire de monoxyde d'azote NO présente à l'équilibre dans de l'air chauffé à 1450 K.

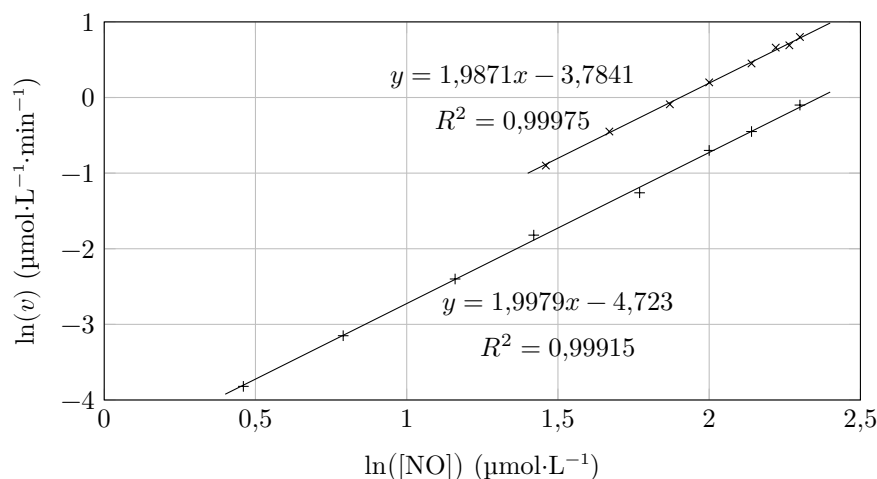
Dans un deuxième temps, il y a production de dioxyde d'azote NO<sub>2</sub> à partir du monoxyde d'azote NO, modélisée par l'équation de réaction



pour laquelle on donne l'expression de l'enthalpie libre standard de réaction dans le cadre de l'approximation d'Ellingham :  $\Delta_r G^\circ(T) = -114,4 + 0,1462T$  en kJ·mol<sup>-1</sup> pour  $T$  en K.

La figure 8 fournit pour cette réaction les résultats d'une étude cinétique réalisée à 400 K, où  $v$  représente la dérivée temporelle de l'avancement volumique de la réaction. Les concentrations initiales utilisées dans cette étude sont

- expérience 1 (tracé avec ×) :  $[\text{O}_2]_0 = 5,0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $[\text{NO}]_0 = 10 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $[\text{NO}_2]_0 = 0$  ;
- expérience 2 (tracé avec +) :  $[\text{O}_2]_0 = 2,0 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $[\text{NO}]_0 = 10 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $[\text{NO}_2]_0 = 0$ .

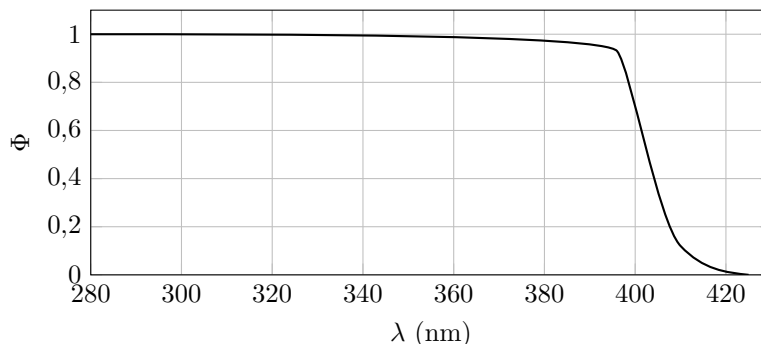


**Figure 8**

**Q 30.** Commenter le choix de la température retenue pour l'étude cinétique.

**Q 31.** Utiliser les résultats précédents pour proposer une loi de vitesse pour la réaction III.2. Déterminer la valeur numérique de la constante de vitesse à la température considérée. La forme obtenue pour la loi de vitesse était-elle prévisible ?

La production d'ozone initiée par les NOx dans la troposphère débute par la photodissociation du dioxyde d'azote NO<sub>2</sub> en NO et O. Il s'agit de la seule source d'atome d'oxygène susceptible de former de l'ozone O<sub>3</sub> par combinaison avec le dioxygène O<sub>2</sub>. La figure 9 donne l'évolution du rendement quantique primaire de dissociation, noté  $\Phi$ , en fonction de la longueur d'onde de la radiation monochromatique incidente. Ce rendement est défini comme la fraction de molécules dissociées par rapport au nombre de photons absorbés.



**Figure 9**

**Q 32.** Proposer un schéma de Lewis pour la molécule de dioxyde d'azote NO<sub>2</sub>.

**Q 33.** Évaluer l'énergie de liaison ON, aussi appelée enthalpie standard de dissociation, dans NO<sub>2</sub>. Commenter la valeur trouvée.

## IV Aluminium et alliage 2024

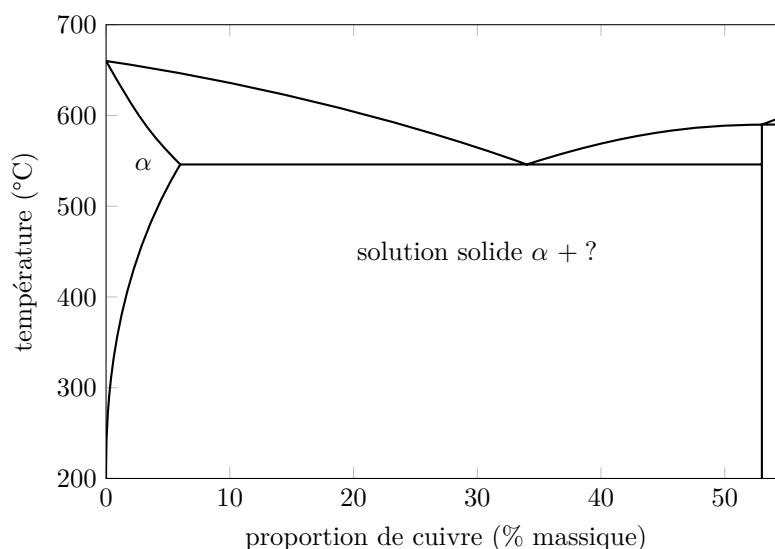
L'aluminium métal Al, de rayon atomique 143 pm, cristallise suivant une structure de type cubique à faces centrées (c.f.c.).

**Q 34.** L'acier possède une densité  $d = 7,8$ . Justifier l'emploi d'alliages d'aluminium plutôt que de l'acier en aéronautique.

La limite d'élasticité de l'aluminium pur (60 à 70 MPa) est nettement insuffisante pour supporter les contraintes imposées en service aéronautique, ce qui impose son utilisation sous forme d'alliages (58 % en masse dans un airbus A320), comme l'alliage 2024 utilisé dans la structure et le revêtement du fuselage des avions, dont on se propose d'étudier quelques caractéristiques.

Dans ce qui suit, l'alliage 2024 sera assimilé à un alliage aluminium-cuivre à 4 % de cuivre en masse.

La figure 10 donne un extrait du diagramme binaire liquide-solide d'un mélange aluminium-cuivre. Les deux métaux présentent une « miscibilité partielle » pour de faibles teneurs en cuivre ; ils forment alors une solution solide  $\alpha$ , mélange intime des deux métaux (domaine de gauche sur le diagramme).



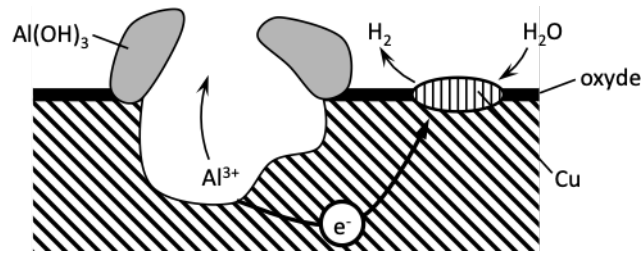
**Figure 10**

**Q 35.** Le diagramme de la figure 10 montre qu'il existe un composé défini. Déterminer sa composition Al<sub>x</sub>Cu, avec  $x$  entier.

**Q 36.** Reproduire très schématiquement ce diagramme binaire en indiquant pour chaque domaine la nature des phases en présence.

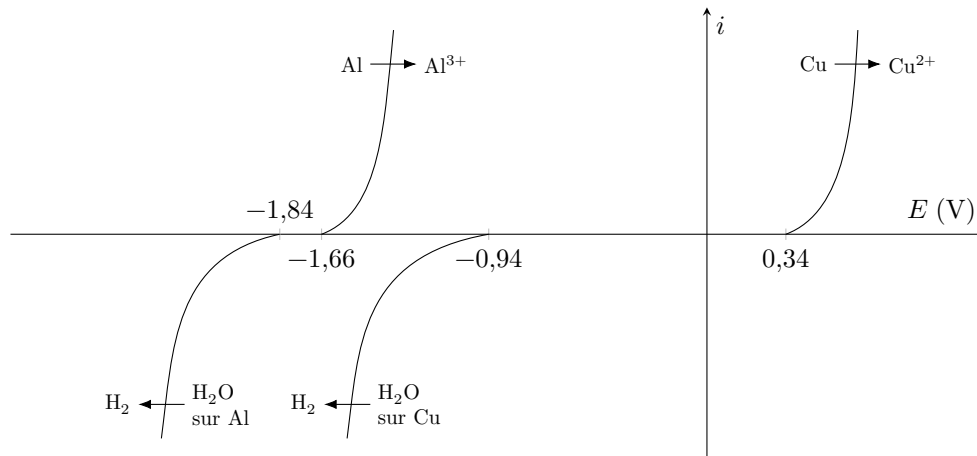
**Q 37.** Calculer le pourcentage massique des phases en présence dans l'alliage 2024 à l'équilibre à la température de 300 K.

L'alliage 2024 est relativement sensible à la corrosion, en particulier en milieu salin (cas des aéroports situés en bord de mer). La figure 11 présente de façon schématique le processus de corrosion par piqures en milieu marin (pH environ égal à 8).



**Figure 11** Phénomène de corrosion par piqure (d'après *Techniques de l'ingénieur*, Corrosion des alliages d'aluminium, Re-boul M.)

**Q 38.** L'étude de la corrosion de l'alliage passe par le tracé des courbes courant-potential pour les métaux concernés (aluminium et cuivre). Donner le schéma de principe du montage à trois électrodes utilisé, en précisant la nature et le rôle des électrodes utilisées et expliquer la nécessité d'utiliser trois électrodes plutôt que deux. Les courbes courant-potential obtenues ont l'allure représentée figure 12.



**Figure 12**

**Q 39.** Écrire la demi-équation électronique associée au couple de l'eau  $H^+/H_2$  en milieu acide, puis en milieu basique.

**Q 40.** Calculer le potentiel standard apparent (à  $pH = 14$ ) d'oxydoréduction du couple  $H_2O/H_2$  et justifier à posteriori le tracé des courbes courant-potential correspondantes.

**Q 41.** Écrire l'équation de réaction modélisant la transformation observée lors du phénomène de corrosion par piqures.

**Q 42.** Après avoir reproduit schématiquement les branches anodique et cathodique impliquées dans le processus, placer le potentiel de corrosion et indiquer comment relever la valeur du courant de corrosion. Justifier l'appellation de pile de corrosion.

En présence d'ions chlorure  $Cl^-$ , les ions aluminium III  $Al^{3+}$  conduisent à la formation quantitative de l'ion  $AlCl_4^-$ . Par ailleurs, la formation de l'ion aluminium III  $Al^{3+}$  en présence d'ion chlorure entraîne une acidification locale du milieu. Le pH en fond de piqure atteint ainsi une valeur inférieure à 3.

**Q 43.** En supposant les surtensions à vide inchangées, positionner de façon qualitative les courbes anodique et cathodique modifiées, en justifiant succinctement le cas échéant la modification effectuée. Commenter.

La figure 13 donne les diagrammes potentiel-pH pour les couples de l'eau et de l'aluminium à la concentration de travail  $c_t = 1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  et à  $25^\circ\text{C}$ .

**Q 44.** Établir l'équation de la frontière séparant les domaines de l'ion aluminium  $Al^{3+}$  et de l'hydroxyde d'aluminium solide  $Al(OH)_3$ .

**Q 45.** Expliquer comment le phénomène de corrosion par piqure est susceptible d'être enrayeré par la passivation de la cavité créée.

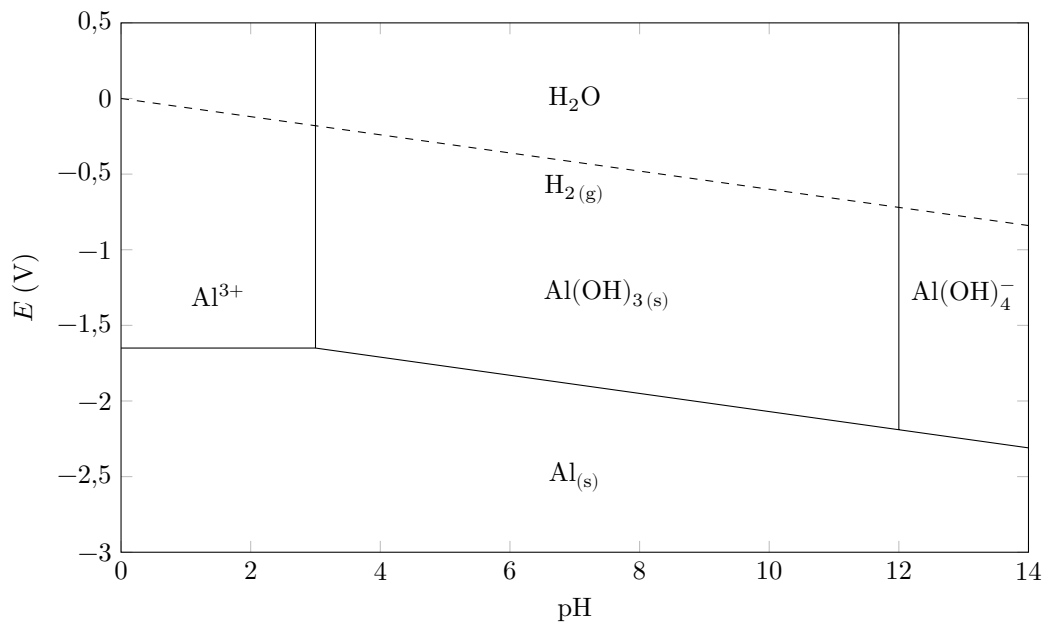


Figure 13

## Données

Sauf indication contraire, les valeurs dépendantes de la température sont fournies à 298 K.

Accélération de la pesanteur terrestre

$$g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Composition de l'air

$$\text{N}_2 : 80 \%, \text{O}_2 : 20 \%$$

Masse volumique de l'air sous une pression de 1 bar

$$\rho = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Viscosité dynamique de l'air

$$\eta = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Coefficient isentropique de l'air

$$\gamma = 1,4$$

Capacité thermique massique à pression constante de l'air

$$C_{p \text{ mass}} = 1,0 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

Constante des gaz parfaits

$$R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Constante de Boltzmann

$$k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$$

Constante de Planck

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Vitesse de la lumière dans le vide

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Constante d'Avogadro

$$\mathcal{N}_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Constante de Faraday

$$F = 9,64 \times 10^3 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Énergie de liaison ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

$$\text{N} - \text{O} : 210 ; \text{N} = \text{O} : 630$$

Produit de solubilité de  $\text{Al}(\text{OH})_3$

$$\text{p}K_s = 33$$

Produit ionique de  $\text{H}_2\text{O}$

$$\text{p}K_e = 14$$

Potentiels standard redox

$$\text{Al}^{3+}/\text{Al}_{(s)} : -1,66 \text{ V}$$

$$\text{H}^+/\text{H}_{2(\text{g})} : 0,00 \text{ V}$$

$$\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}_{(s)} : 0,34 \text{ V}$$

Surtensions à vide

$$\eta_{c0}(\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2) : -0,1 \text{ V sur Cu}, -1 \text{ V sur Al}$$

## Enthalpies standard de formation, entropies molaires et capacités thermiques à pression constante

	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}(\text{l})$	$\text{CO}_2(\text{g})$	$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	$\text{O}_2(\text{g})$	$\text{N}_2(\text{g})$	$\text{NO}(\text{g})$
$\Delta_f H^\circ$ ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	-249,7	-393,5	-241,8			90,4
$S_m^\circ$ ( $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	545,8	213,8	188,8	205,0	191,5	210,6
$C_p^\circ$ ( $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	233,1	38,5	36,2	29,3	28,7	



## Physique-chimie 2

### Présentation du sujet

Le sujet PSI Physique-Chimie 2 propose aux candidats une étude simplifiée du vol d'un Airbus A320. Le sujet, comportant deux parties de physique et deux de chimie, aborde des domaines variés du programme de physique et de chimie de CPGE.

- *L'Airbus A320 en vol* (éléments de description d'une aile, rôle des ailes et vol plané) : étude de la portance, de la traînée, du risque de décrochage pour terminer sur la finesse de l'avion.
- *Turboréacteur double corps, avec soufflante, à flux séparés* : étude de l'évolution d'un fluide en écoulement dans un turboréacteur et notamment calcul de la poussée et de la poussée spécifique.
- *$NO_x$  et production de gaz à effet de serre* : thermodynamique des réactions chimiques, cinétique de la production de dioxyde d'azote, schéma de Lewis du dioxyde d'azote.
- *Aluminium et alliage 2024* : diagramme binaire liquide-solide d'un mélange aluminium-cuivre, étude de la corrosion de l'alliage.

Les compétences évaluées dans ce sujet sont diverses, complètes et de difficultés différentes et graduées : questions proches du cours, raisonnements simples, raisonnements plus complexes, exploitation de graphes.

La plupart des savoir-faire exigibles en filière PSI doivent être mis en œuvre : schématisation, algébrisation, application numérique, rigueur de l'argumentation, esprit critique, limites d'un modèle.

### Analyse globale des résultats

Les parties I et II (56 % des points du barème) nécessitaient une durée d'appropriation indispensable à la mise en place du raisonnement et les candidats s'y sont investis. En moyenne, ils récupèrent 63 % des points sur ces deux parties.

La plupart des candidats ont abordé les quatre parties du problème. Le barème a valorisé ceux qui argumentent au détriment de ceux qui survolent les questions pour en traiter davantage. Le jury regrette la stratégie de grappillage de points de certains candidats souvent accompagnée d'une rédaction indigente. Certaines questions s'enchaînaient dans les deux premières parties ; les candidats qui y ont consacré une durée minimale en rédigeant avec précision ont été récompensés de leur choix.

Plus de 80 % des points du barème étaient affectés à des *questions de cours* ou d'*application directe du cours*, aux *applications numériques*, nombreuses dans ce sujet et qu'il ne fallait pas négliger, et enfin aux *raisonnements simples et commentaires simples*.

Les nombreuses questions de cours ont été traitées de manière inégale. Seuls les candidats rédigeant de manière complète et précise obtiennent l'intégralité des points sur ces questions. Les correcteurs constatent qu'une majorité des candidats rencontre des difficultés à récupérer les points associés aux questions simples.

Répondre à la totalité de certaines parties n'était pas insurmontable. Les quatre parties ont été presque intégralement résolues dans certaines copies et des candidats ont quasiment obtenu la note maximale dans les parties I et II pourtant plus délicates que les deux autres.



## Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Les correcteurs attendent des copies respectueuses du lecteur : lisibles, sans rature et rédigées de manière compréhensible. Un mot ou une phrase barrée proprement n'est pas sanctionné à condition que le candidat ne récrive pas par-dessus.

Le jury conseille aux futurs candidats de travailler les points suivants.

- *Ne pas utiliser d'abréviations* ou de raccourcis (PFD, BAME, « par Laplace »...).
- *Définir toutes les grandeurs* nécessaires à la rédaction, non introduites par l'énoncé. En chimie, ne pas employer  $h$  (respectivement  $\omega$ ) à la place de l'activité de l'ion  $\text{H}_3\text{O}^+$  (respectivement  $\text{OH}^-$ ) sans avoir défini cette notation.
- *Utiliser un vocabulaire précis* ne laissant aucun doute sur la compréhension des phénomènes et sur la validité de la réponse. Quelques exemples : une différence entre deux grandeurs n'est pas toujours une variation ; « vitesse constante » n'est pas équivalent à « en équilibre » même si ça se traduit par une accélération nulle, un potentiel électrique n'est pas une tension.
- *Utiliser les notations conventionnelles*. L'enthalpie standard de réaction se note  $\Delta_r H^\circ$  et non  $\Delta_r H$ , un potentiel standard redox  $E^\circ$  et non  $E$ .
- *Éclairer le raisonnement* par un **schéma**, par un **tableau d'avancement** plutôt que de rédiger un long discours.

Les correcteurs sanctionnent, en particulier :

- les réponses incomplètes ou contradictoires ;
- l'absence de rédaction. Une copie de concours ne peut être une suite d'équations ou de formules lâchées sans argumentation. Les lois ou théorèmes utilisés doivent être cités et les conditions d'application rappelées ;
- l'absence de rigueur (égalités entre un vecteur et un scalaire, application numérique sans unité, schéma non légendé) ;
- l'utilisation de notations incorrectes.

Les applications numériques constituaient plus du quart du barème. Prendre le temps de les effectuer de manière soignée permet d'assurer une note correcte. Les candidats doivent réfléchir au nombre de chiffres significatifs. Dans la partie I, de nombreuses applications numériques nécessitaient d'extraire des valeurs des coefficients  $C_x$  et  $C_y$ . Ces coefficients ne pouvant être déterminés avec plus de deux chiffres significatifs, donner un résultat numérique de la vitesse de croisière ou de la poussée avec trois ou quatre chiffres significatifs n'est pas raisonnable.

Les résultats littéraux doivent, au préalable, être contrôlés en analysant l'homogénéité et la pertinence des paramètres.

### I L'Airbus A320 en vol

**Q2.** La totalité des points a été attribuée aux candidats qui ont rédigé correctement (système étudié, référentiel d'étude, théorème utilisé), qui ont correctement projeté l'expression vectorielle et qui n'ont pas oublié qu'un avion a deux ailes.

**Q3.** Les candidats doivent prendre le temps d'extraire de la figure 2 les valeurs des coefficients  $C_x$  et  $C_y$  en utilisant une règle et en étant attentifs aux échelles en abscisse et ordonnée. Une simple lecture « à la volée » n'est pas acceptable.

**Q4 – Q6, Q10, Q11, Q16.** Questions qualitatives valorisées dans le barème (un tiers de la partie I). Le jury attend des réponses concises, précises et qui font référence aux documents fournis s'ils sont utilisés. Une réponse floue ou présentant deux arguments contradictoires n'est pas recevable. Il en est de même d'une réponse avec un argument correct et un autre faux ou hors sujet. Ce n'est pas au correcteur de choisir parmi une liste proposée par le candidat.

**Q12.** Un schéma était indispensable pour répondre à la question. Une démonstration est attendue pour espérer obtenir les points. Des candidats ont répondu en deux lignes grâce à un schéma bien tracé, mettant en évidence deux triangles rectangles semblables. L'un permettait de relier la tangente d'un angle au rapport  $C_y/C_x$  et l'autre de relier cette même tangente à la finesse de l'avion.

**Q13.** Retracer l'allure de la polaire de type Eiffel de la figure 6 puis la compléter permet de répondre plus rapidement que par une longue explication.

**Q14, Q15.** Les coordonnées du point de la polaire associé à la finesse maximale devaient être écrits pour obtenir les points.

## II Turboréacteur double corps

**Q17.** Question classique pour laquelle le jury attend une rédaction soignée : équation de réaction bien écrite, tableau d'avancement construit, justification de  $\Delta H = 0$  pour le milieu réactionnel et expression littérale correcte de la capacité thermique du système en fin de réaction. La valeur de l'élévation maximale de température ne peut être donnée avec quatre chiffres significatifs au regard des approximations effectuées. 2476 K doit donc être écrit  $2,5 \times 10^3$  K.

**Q18.** *Toutes* les conditions d'application de la loi de Laplace doivent être rédigées.

## III NO<sub>x</sub> et production de gaz à effet de serre

**Q29.** Un tableau d'avancement bien construit à partir de quantités initiales identifiées en diazote et dioxygène aurait évité des erreurs ou des réponses injustifiées. Trop de candidats confondent les fractions molaires en diazote et dioxygène en début de réaction (respectivement égales à 0,8 et 0,2) avec celles à l'équilibre. On pouvait faire l'hypothèse de telles valeurs à condition d'avoir calculé au préalable la constante d'équilibre et d'avoir prédit un faible avancement. Une validation à posteriori de cette hypothèse est appréciée.

**Q30.** Donner le signe de l'enthalpie libre standard de réaction  $\Delta_r G^\circ$  n'est pas un indicateur du sens d'avancement d'une réaction chimique. Dans cette question, le jury attendait que les candidats relient la température choisie à la température en sortie du turboréacteur ou qu'ils évoquent un compromis entre vitesse de réaction élevée et bon rendement thermodynamique. Toute réponse pertinente et claire est valorisée.

**Q31.** Question très mal réussie. Seulement 5 % des candidats trouvent les deux ordres partiels par rapport aux réactifs en argumentant correctement.

**Q32.** Le jury attend un décompte du nombre total d'électrons de valence. Plusieurs schémas de Lewis ont été acceptés à condition de respecter les huit doublets d'électrons, l'électron célibataire, les charges formelles et le non dépassement de l'octet pour les éléments appartenant à la deuxième ligne de la classification périodique.

## IV Aluminium et alliage 2024

**Q34.** Une rédaction minimale est attendue (décompte des atomes dans la maille, lien entre le rayon atomique et le paramètre de maille et expression littérale de la masse volumique ou de la densité) pour obtenir l'intégralité des points attribués à l'argumentation (25 % des candidats). Des candidats confondent

population de la maille et coordinence, volume de la maille et volume des atomes. Affirmer que « l'aluminium est plus léger que l'acier » n'est pas suffisant pour justifier son emploi en aéronautique. Le jury attendait une remarque plus précise reliant ce choix à une plus faible consommation de carburant (10 % des candidats).

**Q38.** Question de cours dont le taux de réussite aurait dû être plus élevé. Le jury a été désagréablement surpris de lire moins de 10 % de montages à trois électrodes corrects, complets et bien légendés. Le nombre de schémas sans générateur de tension ou de courant est surprenant ; ces dipôles doivent être représentés avec les symboles conventionnels. Seulement 5 % de bonnes réponses pour les rôles des électrodes.

**Q39.** Un candidat sur deux écrit correctement les deux demi-équations électroniques.

**Q40 – Q45.** Les candidats à l'aise avec les phénomènes d'oxydoréduction et notamment de corrosion ont récupéré des points précieux sur ces questions, à l'unique condition d'une rédaction claire et d'une argumentation sans ambiguïté.

## Conclusion

Les futurs candidats ne doivent pas négliger une compétence indispensable dans une copie de concours : « communiquer, à l'écrit comme à l'oral ». Dans une épreuve de physique-chimie, un candidat ne peut se contenter de répondre par des formules, des réponses non rédigées et des résultats non commentés. Une argumentation précise est attendue et son absence est sanctionnée.

De plus, une bonne prestation ne peut être réalisée avec des connaissances très superficielles ou parcel-laires. Les meilleures copies traduisent un travail régulier tout au long des deux années de préparation ainsi que le suivi des conseils des enseignants concernant la rédaction, le contrôle des résultats et bien sûr l'acquisition des notions principales du programme.