CB de Physique-Chimie 2024

PSI - Lycée du Parc des Loges

Durée 4H

N.B. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Calculatrices autorisées

Le sujet comporte trois parties indépendantes

Partie I - Utilisation des métaux et contrôle non-destructif

Le fer est extrêmement sensible à la corrosion et en particulier en milieu marin. C'est un problème industriel préoccupant. Chaque seconde, environ 5 tonnes d'acier sont transformées en oxydes de fer dans le monde. Outre cet aspect économique, il ne faut pas négliger les enjeux liés à la sécurité des biens et des personnes via la solidité et la durabilité des véhicules et des infrastructures.

La corrosion peut être uniforme ou localisée sous forme de rayures ou de piqûres. C'est le phénomène de piqûres qui est le plus sournois. Plus difficilement détectable, il aboutit très rapidement à une perforation totale, contrairement à la corrosion uniforme.

Dans le but de contrôler les infrastructures métalliques, il a été développé des méthodes de contrôle non destructifs (CND) utilisant des capteurs à courants de Foucault (**document** ci-dessous) ou à ultrasons.

Vue globale du capteur.

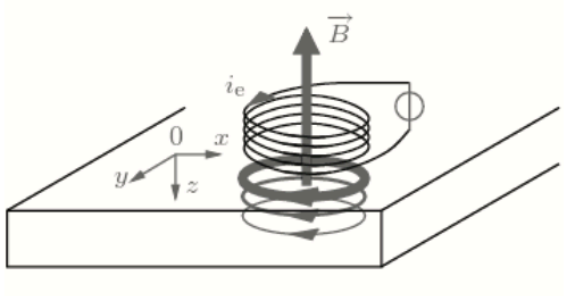


Schéma de la bobine excitatrice
et distribution des courants de Foucault.

Document - Capteurs à courants de Foucault

Le principe général du CND à courants de Foucault est le suivant : une bobine excitatrice génère un champ magnétique variable qui diffuse dans le matériau à sonder. Il se développe alors des courants de Foucault dont la géométrie des lignes de courants est affectée en cas de défaut du type fissure, caverne ou autres. Une sonde enregistre la réponse de ces courants de Foucault, image d'un défaut local dans la structure.

Compte-tenu de leur faible coût et de leur facilité d'utilisation, ces CND à courants de Foucault sont très utilisés. Ils présentent néanmoins quelques inconvénients.

En particulier, les défauts masqués en surface et profondément noyés dans l'épaisseur des conducteurs sont plus difficiles à détecter sur les structures en acier, qu'avec les autres métaux.

Les défauts du type piqûres micrométriques orthogonales à la surface locale des conducteurs sont quasi-indétectables.

Un décollement ou une inclinaison trop importante de la sonde du CND par rapport à la surface de la pièce amenuise la détection.

Chimie

Structure cristallographique du fer et masse volumique

Le fer, sous sa forme allotropique α, cristallise à pression normale et en dessous de 910 °C, dans une structure cubique centrée (**figure 1**).

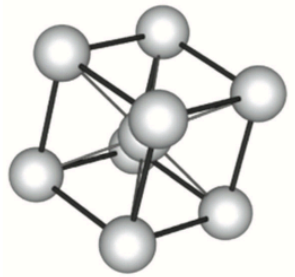


Figure 1 - Structure cubique centrée

Q1. Combien y-a-t-il d'atomes par maille ?
On rappelle que le paramètre de maille, noté a, correspond à la longueur d'une arête de la maille. En déduire la relation entre a et le rayon atomique du fer R_{Fe}.

Q2. Soit M_{Fe} la masse molaire du fer, N_a la constante d'Avogadro et ρ_{Fe} la masse volumique du fer.
Déterminer la relation entre M_{Fe}, R_{Fe}, N_a et ρ_{Fe}.
L'application numérique donne $\rho_{Fe} = 7{,}9\ 10^{n}$ kg.m^{-3}. Préciser l'ordre de grandeur de ρ_{Fe} en donnant simplement la valeur numérique de l'exposant entier n.

Physique

Paramètres électriques d'une bobine et courants de Foucault

On considère une bobine d'axe z, sans noyau, d'inductance propre L_H et de résistance électrique R_Ω, parcouru par un courant électrique $i_e(t) = I_{eff}\sqrt{2}\cos(\omega t)$. On note H_b la longueur de cette bobine. Il règne alors dans cette bobine un champ magnétique : $\vec{B} = B(t)\vec{e}_z = \mu_0 n i_e(t)\vec{e}_z$, où n est le nombre de spires par unité de longueur de la bobine et μ_0 la perméabilité magnétique du vide.

On place intégralement à l'intérieur de cette bobine un tube métallique de même axe z que la bobine représentée à la **figure 5**. On note R_t son rayon moyen, e son épaisseur supposée très fine devant le rayon R_t et H_t sa longueur supposée inférieure à celle de la bobine ($H_t < H_b$).

Ce conducteur métallique est caractérisé par sa conductivité électrique γ. D'un point de vue magnétique, il est ici assimilé à du vide.

On négligera les effets de bord. Le repère utilisé sera celui des coordonnées cylindriques (r, θ, z) de base : $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$.

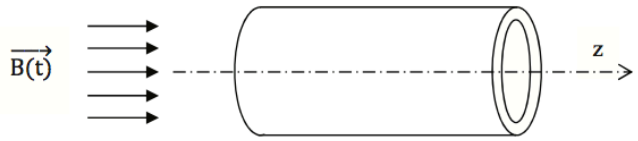


Figure 5 - Tube métallique conducteur

Q8. Expliquez pourquoi des courants électriques prennent naissance dans le tube conducteur. Les lignes de courants induits sont-elles colinéaires à $\vec{e}_r$, à $\vec{e}_\theta$ ou à $\vec{e}_z$?

Q9. On note $\vec{j}_e$ la densité volumique de courant associée à ces courants induits, aussi appelés courants de Foucault.
Préciser l'unité de $\vec{j}_e$.
Rappeler l'expression de l'équation de Maxwell-Faraday. $E = -\frac{r}{2}\frac{dB}{dt}$
Par un calcul de circulation sur un contour qu'on définira, déterminer l'expression du champ électrique induit dans la bobine (i.e. dans le tube) en fonction de B(t) et de r.
En déduire l'expression de $\vec{j}_e$ en fonction de γ, B(t) et de r.

Q10. Le tube conducteur est suffisamment fin pour considérer que $r = R_t$ dans tout le tube.
Déterminer en fonction des paramètres géométriques du tube, du champ magnétique B(t) et de la conductivité électrique γ, la puissance instantanée $P_{c.f.}(t)$ dissipée par les courants de Foucault.
En déduire que la puissance moyenne $P_{c.f.}$, dissipée par les courants de Foucault dans le tube, est de la forme $P_{c.f.} = C.\omega^2.I_{eff}^2$. Préciser l'expression de C en fonction de μ_0, γ, n et des caractéristiques géométriques du tube.
On note R'_Ω la résistance apparente de la bobine en présence du tube conducteur.
Donner l'expression de R'_Ω puis comparer simplement R'_Ω et R_Ω.

Q11. Dans le cas où le tube conducteur présente une fissure orthoradiale parallèle au plan $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta)$ (**figure 6a**), la distribution des courants de Foucault est-elle modifiée ? Qu'en est-il pour la puissance $P_{c.f.}$?
Dans le cas où le tube conducteur présente une fissure axiale parallèle à l'axe z'z, (**figure 6b**), la distribution des courants de Foucault est-elle modifiée ? Qu'en est-il pour la puissance $P_{c.f.}$?

a) Fissuration orthoradiale b) Fissuration axiale

Figure 6 - Tube fissuré

Q12. Rappeler la loi de Lenz.
La présence de courants de Foucault modifie-t-elle l'inductance apparente L'_H de la bobine ?
Si oui, comparer simplement L'_H et L_H.

Diffusion d'un champ magnétique dans un matériau conducteur semi-infini

Le matériau étudié ici est considéré comme homogène et isotrope. Il possède une conductivité électrique γ et une perméabilité magnétique μ. La relation entre le champ magnétique $\vec{B}$ et l'excitation magnétique $\vec{H}$ dans le matériau est de la forme $\vec{B} = \mu\vec{H}$.

L'air extérieur est assimilable d'un point de vue magnétique au vide.

Le matériau est soumis à une excitation magnétique extérieure dans l'air de la forme $\vec{H}_{ext} = H_0\cos(\omega t)\vec{e}_y$, à laquelle on associe le modèle complexe $\underline{\vec{H}}_{ext} = H_0 e^{j\omega t}\vec{e}_y$. Cette excitation est produite par un système de courants de fréquence f.

Dans toute cette partie, on néglige les effets de bord et on associe classiquement à toute grandeur sinusoïdale de la forme $x(t) = X_{max}\cos(\omega t + \varphi)$ la grandeur complexe $\underline{x}(t) = X_{max}e^{j(\omega t+\varphi)}$.

Le matériau occupe le demi-espace correspondant aux x > 0 (**figure 7,** page suivante).

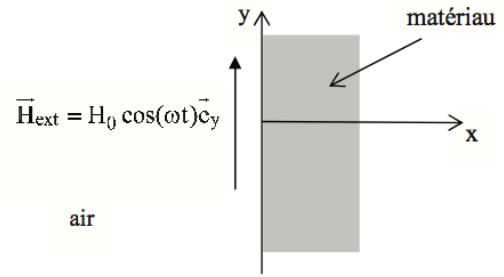


Figure 7 - Matériau conducteur

On cherche à exprimer le champ magnétique qui règne dans le conducteur sous la forme $\vec{B} = B(x,t)\vec{e}_y$. On lui associe le champ magnétique complexe $\underline{\vec{B}}(x,t) = \underline{B}(x)e^{j\omega t}\vec{e}_y$ où $\underline{B}(x)$ est une fonction à valeur complexe. On a $\vec{B}(x,t) = Re(\underline{\vec{B}}(x,t))$ où $Re(\underline{x}(t))$ correspond à la partie réelle de la fonction complexe $\underline{x}(t)$.

Q13. En s'aidant de la loi d'Ohm locale, écrire, dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires, les quatre équations locales satisfaites par les champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ à l'intérieur du matériau.
En déduire que $\underline{\vec{B}}(x,t)$ est solution d'une équation aux dérivées partielles de la forme $D.\Delta\underline{\vec{B}}(x,t) - \dfrac{\partial\underline{\vec{B}}(x,t)}{\partial t} = \vec{0}$. On exprimera D en fonction de γ et de μ.
Préciser l'unité de D. Comment nomme-t-on ce type d'équation ? Citer un autre domaine de la physique où on rencontre ce type d'équation.

Q14. En déduire l'équation différentielle du second ordre à coefficients constants vérifiée par la fonction $\underline{B}(x)$.
En faisant apparaître l'épaisseur de peau, notée δ, que l'on exprimera en fonction de μ, γ et ω, donner l'expression de la fonction $\underline{B}(x)$ à deux inconnues près.
En remarquant qu'il n'y a pas de courant superficiel à l'interface $x = 0^+$, préciser une condition aux limites portant sur le vecteur $\vec{H}$.
Définir, à l'aide d'un critère que vous préciserez, dans quel cas est validée l'hypothèse d'un matériau semi-infini.
En déduire l'expression de la fonction $\underline{B}(x)$, puis celles des champs $\underline{\vec{B}}(x,t)$ et $\vec{B}(x,t)$ en fonction de μ, H_0 et δ.

Q15. La détermination complète du champ électromagnétique dans le matériau aboutit à l'expression du champ électrique complexe $\underline{\vec{E}}(x,t) = \sqrt{\dfrac{\mu\omega}{\gamma}}H_0 e^{\frac{-x}{\delta}} e^{j(\omega t - \frac{x}{\delta} - \frac{3\pi}{4})}\vec{e}_z$.

Dans l'hypothèse d'un matériau semi-infini, en déduire, en fonction de H_0, S, μ, γ et ω, l'expression de la puissance moyenne P_J dissipée par effet Joule pour une surface S de matériau.

Q16. Application numérique

Le **tableau 2** recense les valeurs des épaisseurs de peau δ, ainsi que le rapport $\dfrac{P_J}{H_0^2 S}$ exprimé en $W.A^{-2}$ pour deux fréquences différentes et différents métaux.

Calculer les deux valeurs x et y manquantes.

	δ_{Fe}	δ_{Al}	δ_{Cu}	$\dfrac{P_{J_{Fe}}}{H_0^2 S}$	$\dfrac{P_{J_{Al}}}{H_0^2 S}$	$\dfrac{P_{J_{Cu}}}{H_0^2 S}$
f = 2 kHz	x	1,8 mm	1,5 mm	$1,4\ 10^{-3}$	y	$5,7\ 10^{-6}$
f = 100 kHz	5 µm	0,26 mm	0,2 mm	$9,9\ 10^{-3}$	$5,1\ 10^{-5}$	$4,1\ 10^{-5}$

Tableau 2 - Valeurs des épaisseurs de peau δ

Données

Masses molaires et masses volumiques :

	Masses molaires ($g.mol^{-1}$)	Masses volumiques ($kg.m^{-3}$)
Cuivre	63,5	8 900
Aluminium	27	2 700
Magnésium	24,3	1 750

Conductivités électriques, thermiques et perméabilités magnétiques :

	γ ($S.m^{-1}$)	λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	μ ($H.m^{-1}$)
Fer	$1,0\ 10^7$	80	$10^4.\mu_0$
Cuivre	$6,0\ 10^7$	401	$\approx\mu_0$
Aluminium	$3,8\ 10^7$	237	$\approx\mu_0$

Constantes physiques :

Perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}\ H.m^{-1}$.
Constante des gaz parfaits : $R = 8,314\ J.K^{-1}.mol^{-1}$.
Constante d'Avogadro : $N_a = 6,022.10^{23}\ mol^{-1}$.
Charge élémentaire d'un proton : $e = 1,6\ 10^{-19}\ C$.
Constante de Faraday : $F = 96\ 500\ C.mol^{-1} = N_a.e$ (avec e = charge élémentaire).

Formulaire mathématique :

$\overrightarrow{rot}(\overrightarrow{rot}(\vec{X})) = \overrightarrow{grad}(div(\vec{X})) - \Delta\vec{X}$.
$\overrightarrow{rot}(f(x)\vec{e}_y) = \dfrac{\partial f}{\partial x}\vec{e}_z$.

Partie II – Célérité de l'onde ultrasonore

On étudie la propagation d'une onde ultrasonore produite dans l'air.

L'air est assimilé à un gaz parfait, initialement au repos de vitesse $\overrightarrow{v_0} = \vec{0}$, et qui en l'absence de toute perturbation possède une masse volumique μ_0, une pression P_0 et à une température T_0.

On suppose que la lame de quartz, positionnée à l'abscisse $x = 0$, transmet ses vibrations aux couches d'air environnantes et crée ainsi une onde ultrasonore sinusoïdale de fréquence f_0 se propageant suivant $(O, \overrightarrow{e_x})$ à la célérité c.

Le passage de l'onde perturbe l'équilibre.

En un point M de l'air d'abscisse x, à l'instant t, on note ainsi :

- *$p\,(x,t)$ la pression avec :*
$$p\,(x,t) = P_0 + p_1(x,t),$$
- *$\mu\,(x,t)$ la masse volumique avec :*
$$\mu\,(x,t) = \mu_0 + \mu_1(x,t),$$
- *$\vec{v}\,(x,t) = v\,(x,t)\,\overrightarrow{e_x}$ le champ des vitesses avec :*
$$\vec{v}\,(x,t) = \overrightarrow{v_0} + v_1\,(x,t)\,\overrightarrow{e_x} \qquad \text{où } v_1(x,t) \text{ est petit devant } c.$$

L'écoulement du fluide est considéré parfait et on néglige l'action de la pesanteur.

On donne la constante des gaz parfaits : $R = 8{,}31\ J.mol^{-1}.K^{-1}$.

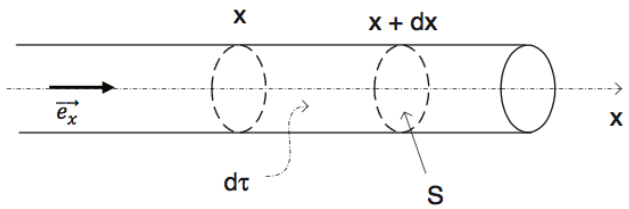
<u>Dans toute la suite, on se place dans l'approximation acoustique</u>. Cela signifie que :

- *on considère des ondes de faible amplitude, pour lesquelles la surpression p_1 est très petite par rapport à la pression P_0 de l'air au repos : $|p_1| \ll P_0$;*
- *on mène les calculs au premier ordre.*

<u>B1.</u> L'air étant assimilé à un gaz parfait de masse molaire M_a, à la température T_0 supposée (dans un premier temps) constante, retrouver l'expression de la pression p de l'air en fonction de μ, M_a, T_0 et R. En déduire que l'approximation acoustique se traduit aussi par la relation $\mu_1 \ll \mu_0$.

Bilan de masse

On considère un volume élémentaire d'air $d\tau$, fixe dans le référentiel du laboratoire, contenu dans un cylindre de section S constante, d'axe $(O, \overrightarrow{e_x})$ et compris entre les surfaces situées en x et en $x + dx$. Ce système est ouvert.



<u>Figure 1</u> – Volume élémentaire d'air

<u>B2.</u> Donner l'expression de la masse $dm\,(t)$ présente dans le volume $d\tau$ à l'instant t. De même pour la masse $dm\,(t + dt)$ présente dans le volume $d\tau$ à l'instant $t + dt$.

<u>B3.</u> Exprimer la masse δm_e entrant dans $d\tau$ pendant la durée dt par la surface située en x. Même question pour la masse δm_s sortant de $d\tau$ pendant la durée dt par la surface située en $x + dx$.

<u>B4.</u> Montrer que, dans le cas de l'approximation acoustique, la conservation de la masse pour le système étudié se traduit par la relation **(R1)** :
$$\frac{\partial \mu_1}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial v_1}{\partial x} = 0. \qquad \textbf{(R1)}$$

Équation du mouvement

La loi de la quantité de mouvement, appliquée à la particule de fluide contenue dans le cylindre précédemment défini, conduit à la relation suivante :
$$\mu \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\overrightarrow{grad}\, p.$$

<u>B5.</u> Que devient l'expression précédente, dans le cas unidimensionnel et dans le cadre de l'approximation acoustique ? On appelle **(R2)** la relation ainsi obtenue.

Évolution isentropique

Historiquement, Isaac Newton a supposé que les particules d'air subissent une transformation isotherme lors du passage d'une onde sonore. Cette hypothèse s'est avérée en désaccord avec les valeurs expérimentales de la célérité des ondes sonores. Ce fut Pierre Simon de Laplace qui montra que l'hypothèse d'une transformation isentropique est plus adéquate.

<u>B6.</u> On considère que, pour des ondes ultrasonores se propageant dans des fluides, l'hypothèse adiabatique est adéquate. Justifier succinctement et sans calculs, la raison de cette hypothèse.

Les particules d'air subissant une transformation isentropique lors du passage de l'onde ultrasonore, on définit alors l'expression du coefficient de compressibilité isentropique :
$$\chi_S = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial \mu}{\partial p}\right)_s.$$

<u>B7.</u> Établir, dans le cas de l'approximation acoustique, la relation liant μ_1 à μ_0, p_1 et χ_S. Cette relation constitue la relation **(R3)**.

Équation de propagation

<u>B8.</u> En utilisant les relations **(R1)**, **(R2)** et **(R3)**, montrer que la surpression p_1 vérifie l'équation de d'Alembert à une dimension :
$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} = 0.$$

On donnera l'expression de la célérité c de l'onde ultrasonore en fonction de μ_0 et χ_S.

<u>B9.</u> L'air étant assimilé à un gaz parfait de coefficient γ (rapport des capacités thermiques à pression et volume constant), exprimer χ_S en fonction de γ et P_0 et en déduire que l'expression de la célérité c est :
$$c(T_0) = \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{M_a}}.$$

On notera par la suite c_0, la valeur de $c(T_{273})$ pour une température $T_{273} = 273\ K$.

Précision des mesures par télémétrie par ultrasons

On suppose, dans cette partie, que l'onde est bien réfléchie sur un obstacle. La mesure du temps de propagation de l'onde, connaissant sa célérité, permet de déterminer la distance parcourue par l'onde lors d'un aller-retour entre le robot et l'obstacle.

Sur un document technique concernant la télémétrie par ultrasons dans le cas d'un robot autonome, on trouve le graphe suivant :

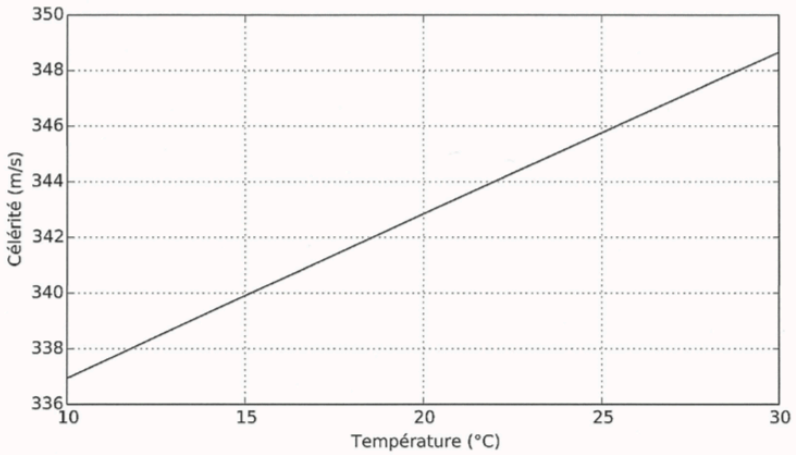


Figure 2 – Célérité des ultrasons en fonction la température

B10. Sur l'intervalle envisagé de température (voir figure 2) l'évolution de la célérité des ultrasons est fonction de la température θ mesurée en degré Celsius suivant la relation : $c(\theta) = a.\theta + b$. Déterminer graphiquement les valeurs de a et de b.

B11. Sur l'intervalle envisagé de température de la figure 2, linéariser la relation obtenue à la question **B9**. Déterminer les expressions de a et de b en fonction de c_0 et $T_{273} = 273\ K$. Déduire de b les valeurs numériques de c_0 et γ, sachant que dans le cas de l'air, $M_a = 29{,}0\ g.mol^{-1}$.

Partie III – Chimie d'un airbag

L'airbag (ou coussin gonflable) est un accessoire de sécurité passive développé pour l'automobile à la fin des années 1980 et qui équipe maintenant tous les véhicules.
Depuis la fin des années 1980, l'airbag n'a cessé d'évoluer afin d'augmenter la protection des personnes dans les voitures. Lors d'un impact justifiant le déclenchement du système de sécurité, des capteurs détectent la décélération du véhicule : un signal électrique est envoyé à un détonateur, dans le générateur de gaz de l'airbag. Une décomposition très rapide (réaction de nature explosive) de l'azoture de sodium NaN_3 solide provoque la libération en quelques millisecondes d'une quantité de gaz suffisante pour déployer les 35 L du sac en polyamide du coussin gonflable. Le système se dégonfle spontanément après quelques instants afin de libérer le passager.

H Formation du gaz

La formation du gaz supposé parfait, suit ces trois étapes :

— Réaction 1 : $2NaN_{3\ (s)} \rightarrow 2Na_{\ (s)} + 3N_{2\ (g)}$: réaction de génération du gaz

— Réaction 2 : $10Na_{\ (s)} + 2KNO_{3\ (s)} \rightarrow K_2O_{\ (s)} + 5Na_2O_{\ (s)} + N_{2\ (g)}$: réaction de sécurité

— Réaction 3 : $K_2O_{\ (s)} + Na_2O_{\ (s)} + SiO_{2\ (s)} \rightarrow K_2Na_2SiO_{4\ (s)}$: réaction de combinaison

On prendra :

$$\frac{RT}{\mathcal{F}} \ln 10 = 0{,}06\ \text{V}$$

H1. Les couples en jeu dans la réaction de génération sont Na^+/Na dont le potentiel standard est $E_1^0 = -2{,}71$ V et N_2/N_3^- dont le potentiel standard est $E_2^0 = -3{,}40$ V. Établir l'équation de la réaction de génération du gaz par écriture des demi-équations d'oxydoréduction. On supposera pour cette question que les formes suivantes sont équivalentes :

$$NaN_{3\ (s)} = Na^+_{\ (aq)} + N_{3\ (aq)}^-$$

H1. Les couples en jeu dans la réaction de génération sont Na^+/Na dont le potentiel standard est $E_1^0 = -2{,}71$ V et N_2/N_3^- dont le potentiel standard est $E_2^0 = -3{,}40$ V. Établir l'équation de la réaction de génération du gaz par écriture des demi-équations d'oxydoréduction. On supposera pour cette question que les formes suivantes sont équivalentes :

$$NaN_{3\ (s)} = Na^+_{\ (aq)} + N_{3\ (aq)}^-$$

On considèrera que cette réaction est quantitative, de constante de réaction K = 10^{23}.

H3. Proposer une structure de Lewis pour les ions azotures N_3^-, supposée sans cycle.

H4. Dans le système d'airbag d'une voiture de série, 65 g d'azoture de sodium sont mis en jeu. Calculer la quantité de matière de diazote formé si l'on n'envisage que la réaction 1. On donne $M(Na) = 23$ g.mol^{-1} et $M(N) = 14$ g.mol^{-1}.

H5. On suppose la température $T = 300$ K constante et on rappelle la constante des gaz parfaits $R = 8{,}31$ J.K^{-1}.mol^{-1}. L'airbag est-il gonflé ?

H6. En considérant que la totalité du sodium Na formé lors de la réaction 1 est transformée dans la réaction 2, déterminer la quantité de matière supplémentaire de diazote dans le ballon.

H7. Pourquoi la seconde réaction est-elle appelée réaction de sécurité ?

H8. Écrire l'équation de la réaction chimique de Na_2O avec l'eau sachant qu'une telle solution se colore en rose en présence de phénolphtaléine et que des ions Na^+ sont produits.

I Cinétique de décomposition du pentaoxyde d'azote

La durée de formation du diazote dans l'airbag est d'environ 40 ms. Cette partie se propose d'étudier la cinétique d'une autre transformation chimique en phase gazeuse, la décomposition du pentaoxyde d'azote. Cette transformation est d'ordre 1 et suit l'équation de réaction :

$$N_2O_5 \rightarrow 2NO_2 + \frac{1}{2}O_2$$

cette réaction est réalisée vers 160 *°C en phase gazeuse où on considère qu'elle est la seule à se produire. On admet de plus que tous les gaz se comportent comme des gaz parfaits et on note* k *la constante de vitesse. La réaction est étudiée dans un récipient de volume constant* V*.*
À l'instant initial $t = 0$*, on introduit* N_2O_5 *pur dans l'enceinte, à la « concentration »* $[N_2O_5]_0 = \frac{n(N_2O_5)_0}{V}$*. On note* P_0 *la pression initiale dans l'enceinte.*

I1. Établir l'équation différentielle vérifiée par la « concentration » $[N_2O_5] = \frac{n(N_2O_5)}{V}$.

I2. Exprimer alors la « concentration » $[N_2O_5]$ en fonction de t, k et $[N_2O_5]_0 = \frac{n(N_2O_5)_0}{V}$.

I3. Exprimer alors la pression partielle $P_{N_2O_5}$ en fonction de t, k et P_0.

I4. Pratiquement, il est extrêmement difficile de mesurer directement des pressions partielles, alors que la mesure de la pression totale est très facile. Montrer que la pression totale P en fonction de t, k et P_0 suit la loi :

$$P = \frac{P_0}{2}\left(5 - 3\exp(-kt)\right)$$

I5. Des mesures manométriques au cours du temps de la pression totale, ont fourni le tableau de résultats suivants :

t (s)	0	600	1200	2400	3600	4800
P ($\times 10^5$ Pa)	$0,46$	$0,64$	$0,77$	$0,94$	$1,05$	$1,09$

Quelle expression doit-on tracer en fonction du temps afin d'obtenir une droite ? Valider l'ordre de réaction par régression linéaire.

I6. En déduire la valeur de la constante de vitesse k.

I7. Pour cette réaction, l'énergie d'activation est de 103 kJ.mol^{-1}. À quelle température faudra-t-il réaliser la réaction si on veut que 95 % du réactif soit transformé au bout de 30 minutes ?

I8. À 200 °C, il faut 3 minutes et 20 secondes pour que $\frac{2}{3}$ de N_2O_5 ait réagi. Calculer la valeur de la constante de vitesse à cette température. Calculer le temps de demi-réaction à cette température. Que deviendrait-il si on réalisait la même manipulation en doublant la pression initiale ?