

---

## **DST N°4**

# **Thermodynamique industrielle, mécanique des fluides, ALI, chimie générale, cinétique chimique & thermochimie**

---

Lycée LANGEVIN - WALLON

29 décembre 2020

## **À lire attentivement...**

Les candidats devront vérifier que le sujet comporte bien 17 pages numérotées 1/17, 2/17, ... 17/17.

Les candidats sont invités à porter une attention particulière à la rédaction : les copies illisibles ou mal présentées seront pénalisées.

Toute application numérique ne comportant pas d'unité ne donnera pas lieu à attribution de points.  
Les résultats numériques devront être donnés sous la forme appropriée.

Tout résultat non encadré ne donnera pas lieu à attribution de points.

Le sujet comporte :

- quatre extraits d'annales de physique ;
- un extrait d'annales de chimie.

Les diverses parties sont indépendantes et peuvent être traitées dans l'ordre choisi par le candidat.  
Le candidat prendra toutefois soin de bien numérotter les questions.

L'EMPLOI DE SA PROPRE CALCULATRICE EST AUTORISE.

L'ÉCHANGE DE CALCULATRICE EST INTERDIT.

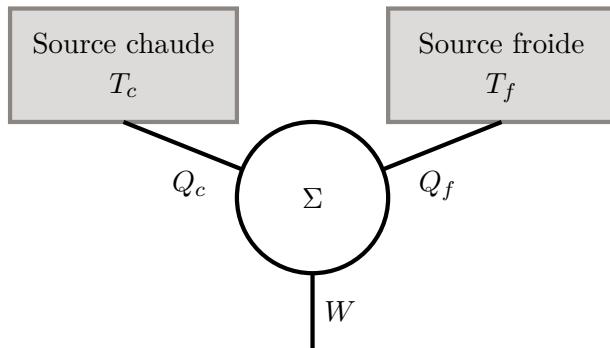
L'EMPLOI DE TOUTE AUTRE AIDE, NOTAMMENT UN TÉLÉPHONE OU LA  
CALCULATRICE D'UN CAMARADE, EST INTERDIT.

# 2019 Banque PT B Physique – Réfrigérateur domestique (env. 27 %)

Les applications numériques seront réalisées avec deux chiffres significatifs.

## 1.1 Modélisation d'une machine réfrigérante ditherme

On représente schématiquement une machine ditherme comme ci-après.



On note :

- $\Sigma$  : le fluide thermodynamique « caloporeur » ou « frigorigène »,
- $Q_c$  le transfert thermique échangé par  $\Sigma$  avec la source chaude (température  $T_c$ ) au cours d'un cycle,
- $Q_f$  le transfert thermique échangé par  $\Sigma$  avec la source froide (température  $T_f$ ) au cours d'un cycle,
- $W$  : le travail échangé par  $\Sigma$  avec l'extérieur au cours d'un cycle.

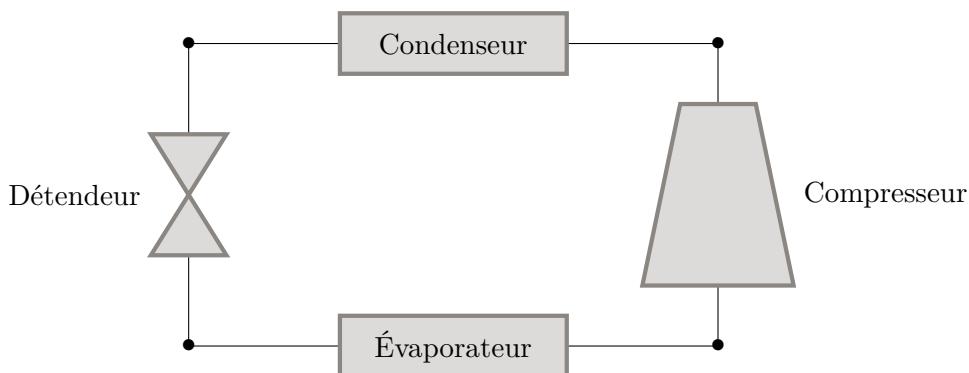
Ces grandeurs sont algébriques et leur signe est positif lorsque le système thermodynamique  $\Sigma$  les reçoit effectivement.

1. Indiquer le signe de  $Q_c$ ,  $Q_f$  et  $W$  lorsque la machine fonctionne en réfrigérateur. Justifier.
2. Définir l'efficacité  $e_f$  (aussi appelée coefficient de performance) d'une telle machine et montrer qu'elle est majorée par une efficacité maximale  $e_f^{\max}$  dont on établira l'expression en fonction de  $T_c$  et  $T_f$ .

## 1.2 Étude d'un cycle réfrigérant à compression de vapeur

Nous nous proposons d'étudier un cycle à compression de vapeur utilisé dans un réfrigérateur. La source chaude est la cuisine, de température  $T_c$ , la source froide est {l'armoire du réfrigérateur et son contenu} de température homogène  $T_f$ .

Un fluide frigorigène décrit le cycle schématisé ci-dessous :



Il y subit les transformations suivantes :

- De l'état 4 à l'état 1 : évaporation à  $T_{\text{évac}} = 0^\circ\text{C}$  puis surchauffe isobare jusqu'à  $10^\circ\text{C}$ .
- De l'état 1 à l'état 2 : compression adiabatique dans le compresseur.
- De l'état 2 à l'état 3 : refroidissement isobare, liquéfaction isobare à  $T_{\text{cond}} = 40^\circ\text{C}$  puis sous-refroidissement du liquide jusqu'à  $30^\circ\text{C}$ .
- De l'état 3 à l'état 4 : détente isenthalpique du fluide.

On note  $h_i$ ,  $s_i$  et  $v_i$  respectivement l'enthalpie, l'entropie et le volume massique du fluide dans l'état  $i$ . On note  $P_i$  et  $T_i$  respectivement la pression et la température du fluide dans l'état  $i$ .

Entre les états  $i$  et  $j$ , on note :

- $\Delta_{ij}h$  la variation d'enthalpie massique du fluide (les notations utilisées pour d'autres variations de grandeurs d'état s'en déduisent),
- $q_{ij}$  le transfert thermique massique reçu par le fluide,
- $w_{ij}$  le travail massique utile (ou indiqué) reçu par le fluide.

3. Annoter la figure 1.1 du document annexe à rendre en plaçant les différents points correspondants aux états 1 à 4.

Positionner la source chaude et la source froide.

Indiquer par une flèche le sens du transfert thermique entre les sources et le fluide dans l'évaporateur et dans le condenseur.

### Cycle avec compression réversible

Dans un premier temps on suppose que la compression est adiabatique et réversible. Elle conduit alors le fluide de l'état 1 à un état noté  $2s$ .

4. Placer les points correspondants aux états 1,  $2s$ , 3 et 4 dans les diagrammes  $P(h)$  et  $T(s)$  du fluide R134a en annexe (figures 1.2 et 1.3).  
*(Remarque : le point  $2'$  déjà placé sur le diagramme sert à une partie qui a été retirée de cet énoncé, ne pas s'en préoccuper ici)*
5. Remplir les colonnes représentant les états 1,  $2s$ , 3 et 4 du tableau 1.1 du document annexe à rendre.
6. Justifier que l'on ait choisi  $T_{\text{évac}} \leq T_f$  et  $T_{\text{cond}} \geq T_c$ .
7. Quelle hypothèse concernant le fluide sous-tend la modélisation des transformations  $4 \rightarrow 1$  et  $2s \rightarrow 3$  comme des isobares ?
8. En analysant les abaques de la figure 1.2 ou de la figure 1.3, indiquer si la vapeur sèche de R134a peut être assimilée à un gaz parfait entre les états 1 et  $2s$ . Justifier.

### Cycle avec compression non réversible

La compression n'est en réalité par réversible. Le compresseur est caractérisé par son rendement isentropique défini par :

$$\eta = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

Le rendement isentropique du compresseur est de 75 %.

Le cycle étudié est désormais 1 → 2 → 3 → 4 → 1.

9. Déduire des valeurs de  $h_1$  et  $h_{2s}$  celle de  $h_2 - h_1$  et placer le point correspondant à l'état 2 sur la figure 1.2. Tracer le cycle sur la figure 1.2 en utilisant un stylo de couleur.
10. Compléter la colonne 2 du tableau 1.1 du document annexe.
11. Placer le point correspondant à l'état 2 sur le diagramme  $T(s)$  (figure 1.3). Tracer le cycle sur la figure 1.3 en utilisant un stylo de couleur.
12. On observe graphiquement que  $s_2 > s_{2s}$ . Justifier physiquement.

### Détermination de l'efficacité de la machine

13. Rappeler l'expression du premier principe de la thermodynamique lorsqu'il est appliqué à un système ouvert en régime stationnaire.
14. Justifier que l'on puisse négliger les variations d'énergie potentielle de pesanteur devant les variations d'enthalpie dans un réfrigérateur domestique (un calcul d'ordre de grandeur est attendu).

On cherche à évaluer l'ordre de grandeur de l'énergie cinétique massique maximale au cours du cycle.

15. En supposant que le champ de vitesse est uniforme sur une section droite  $S$  d'une canalisation dans laquelle le fluide circule, exprimer le débit massique du fluide  $D$  en fonction de  $S$ , de la vitesse  $V$  et du volume massique  $v$  du fluide.
16. En quel point du cycle le volume massique est-il maximal ? Justifier. On notera  $v^{\max}$  sa valeur et on prendra  $v^{\max} = 7 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ .
17. En supposant que  $S$  garde la même valeur approximativement égale à  $1 \text{ cm}^2$  sur toute l'installation, déterminer la vitesse maximale du fluide au cours de l'écoulement. On prendra  $D = 1 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .
18. Justifier alors qu'on puisse négliger les variations d'énergie cinétique massique du fluide au cours du cycle devant ses variations d'enthalpie massique.
19. Montrer que l'on peut exprimer l'efficacité du réfrigérateur en fonction des enthalpies massiques des différents points du cycle 1 → 2 → 3 → 4 → 1.
20. Déterminer, à l'aide des données évaluées sur le graphique, l'efficacité du cycle réfrigérateur décrit par le fluide.
21. Déterminer la puissance thermique  $\mathcal{P}_{\text{th}}^f$  extraite de la source froide et la puissance  $\mathcal{P}$  du compresseur.
22. Pour quelle raison la vapeur est-elle surchauffée après son évaporation ?
23. Quel est l'intérêt de sous refroidir le liquide après la liquéfaction ? Pourquoi ce sous-refroidissement n'est-il pas réalisé jusqu'à une température plus basse ( $20^\circ\text{C}$  par exemple) ?

### Annexes

#### Document 1 : les qualités d'un fluide frigorigène :

D'après *Techniques de l'Ingénieur* TI-b9730

Théorie des machines frigorifiques, machines à compression mécanique

Maxime Duminil

Pour bien choisir un frigorigène en vue d'une application déterminée, on doit considérer :

- Ses *critères thermodynamiques* : puisque les systèmes frigorifiques relèvent précisément des lois de la thermodynamique ;
- Ses *critères de sécurité* : sécurité des personnes et des biens en cas de dégagement intempestif du frigorigène dans l'atmosphère ;
- Ses *critères d'action* sur l'environnement : actuellement très importants puisqu'ils ont imposé l'abandon de certains frigorigènes ;
- Ses *critères techniques* : ils influent sur la faisabilité et la fiabilité du système frigorifique et sur les interactions entre le frigorigène et les composants de ce système ;
- Ses *critères économiques* : toujours présents au cœur des problèmes techniques.

(Ne sont conservés ci-après que quelques-uns des critères décrits dans l'article.)

### Critères thermodynamiques

---

1. On s'arrangera pour que, dans la mesure du possible, la température d'évaporation  $T_{\text{evap}}$  soit supérieure à la température d'ébullition du fluide à la pression atmosphérique  $T_{\text{eb}}$ . De cette façon, la totalité des circuits de la machine est en surpression vis-à-vis de l'extérieur et l'on ne risque pas l'introduction d'air atmosphérique et d'eau.
2. Dans l'état actuel de la technique des composants du système, la pression de condensation  $P_{\text{cond}}$  ne doit pas dépasser 20 à 25 bar. Inversement, la pression d'évaporation  $P_{\text{evap}}!!$  ne doit pas être trop basse. Le domaine d'emploi du compresseur frigorifique est ainsi bien défini par le constructeur et on doit impérativement rester dans ces limites. Pour garder une bonne efficacité au compresseur, le taux de compression  $\tau = \frac{P_{\text{cond}}}{P_{\text{evap}}}$  doit aussi rester limité. Les taux de compression importants, outre qu'ils sont généralement la cause d'échauffements excessifs du fluide, entraînent la diminution des rendements volumétriques et une augmentation de la consommation énergétique du compresseur.
3. La production frigorifique volumique est une grandeur importante définie par la quantité de froid produite par unité de volume de fluide aspiré par le compresseur. Plus cette quantité est élevée, plus petit est le débit-volume aspiré par le compresseur pour produire une puissance frigorifique donnée. Plus réduite, et moins chère, est alors la machine de compression.

### Sécurité

---

L'inflammabilité est évidemment un point d'une extrême importance. Des substances susceptibles de faire d'excellents frigorigènes, comme certains hydrocarbures, ont été rejetés en raison de leur caractère combustible.

### Action sur l'environnement

---

1. Ozone stratosphérique : on sait que l'ozone stratosphérique est détruit par le chlore transporté à ces altitudes par les composés halogénés des hydrocarbures qui ont une longue durée de vie dans l'atmosphère, essentiellement par les CFC mais aussi, dans une bien moindre mesure, par les HCFC. On sait aussi que c'est ce critère qui a décidé la communauté internationale à bannir ces composés chlorés. L'action de chaque composé sur l'ozone stratosphérique est caractérisée par ce que les Anglo-saxons dénomment l'ODP (ozone depletion potential), seuls les frigorigènes ayant un ODP nul devraient perdurer.

2. Effet de serre : les gaz à effet de serre sont indispensables à notre planète qui, en leur absence, aurait une température beaucoup trop basse pour être habitable ( $-18^{\circ}\text{C}$ ). Cependant, l'excès de ces gaz, en gênant la sortie (vers le cosmos) du rayonnement terrestre de grande longueur d'onde, peut, à la longue, provoquer un lent réchauffement de notre monde. À côté des gaz à effet de serre bien connus (vapeur d'eau,  $\text{CO}_2$ , méthane, oxydes d'azote, etc.), les frigorigènes halocarbonés ont une action non négligeable. Bien qu'encore peu répandus dans l'atmosphère, leur influence est beaucoup plus grande que, par exemple, celle du  $\text{CO}_2$  dont l'effet de serre est le plus connu.

On caractérise l'action d'effet de serre d'un composé par le terme anglais GWP (global warning potential), les valeurs sont rapportées au  $\text{CO}_2$ ; dont le GWP est égal à 1.

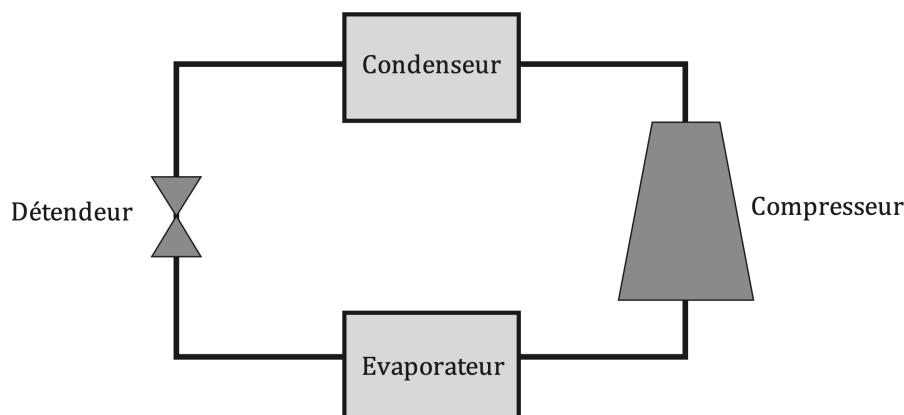


Fig. 1.1

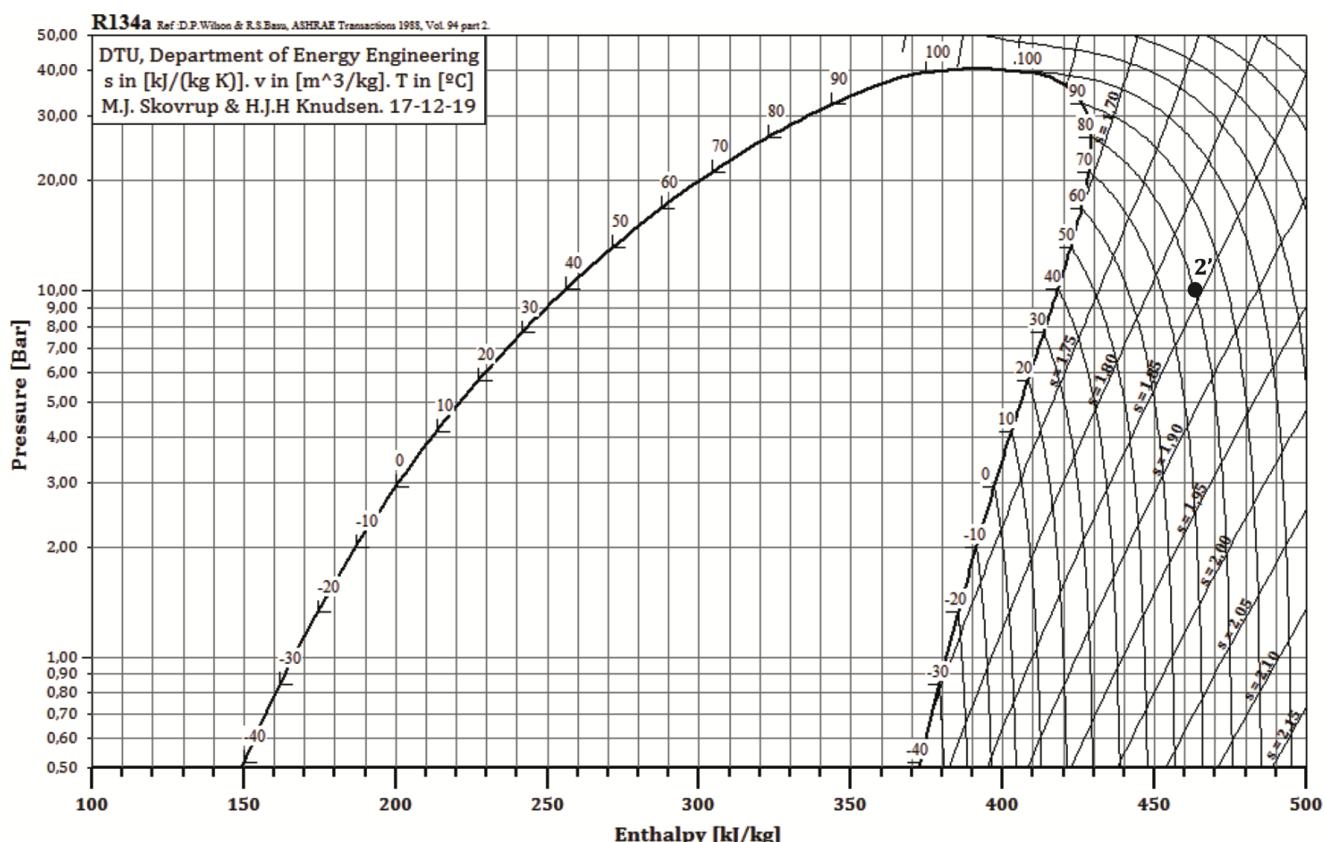
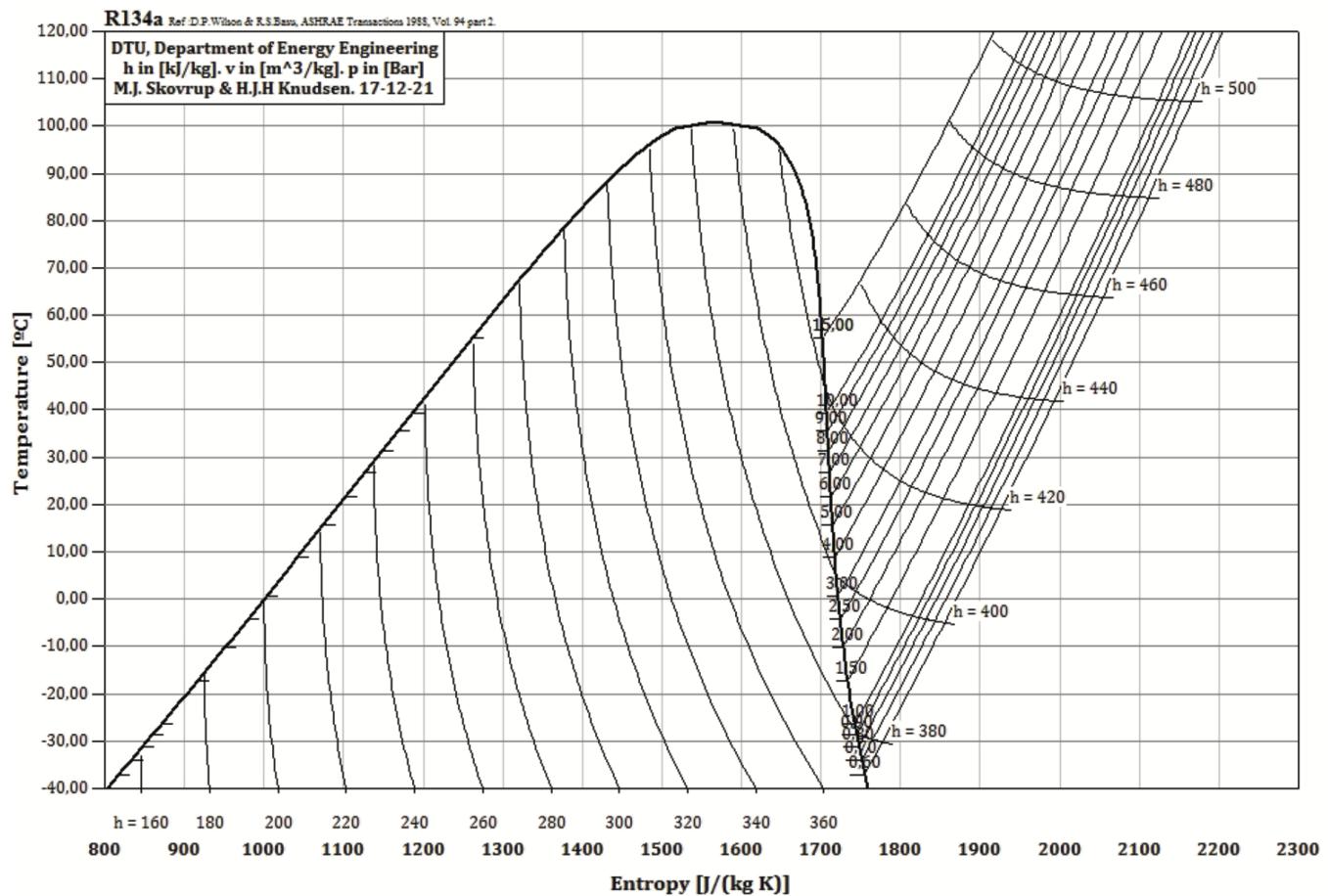


Fig. 1.2 – La figure complète doit montrer 3 couleurs : une pour le cycle 1, 2s, 3, 4 ; une pour la portion 1, 2 ; une pour le cycle 3, 4, 4', 4'', 1', 2'

**Fig. 1.3**

Point	1	2s	2	3	4	1'	2'
$P$ (bar)						10	
$T$ ( $^{\circ}$ C)						80	
État du fluide						Vapeur sèche	
$h$ ( $kJ \cdot kg^{-1}$ )						465	

**Tab. 1.1**

# 2018 CCS PSI Physique Chimie 1 - Trains à sustentation électromagnétique (env. 20 %)

Un train à sustentation magnétique utilise les forces magnétiques pour léviter au dessus de la voie ; il n'est donc pas en contact avec des rails, contrairement aux trains classiques. Ce procédé permet de supprimer la résistance au roulement et d'atteindre des vitesses élevées.

Il existe actuellement deux types de trains à grande vitesse à sustentation magnétique :

- un train à sustentation électromagnétique dans lequel le train lévite par attraction grâce à des aimants (*Transrapid* développé en Allemagne) ;
- un train à sustentation électrodynamique dans lequel le train lévite par répulsion grâce aux courants de FOUCAULT induits par le déplacement du train (*SCMaglev* développé au Japon).

La seule réalisation commerciale du *TRANSRAPID* est à l'heure actuelle la ligne de 30 km qui fonctionne depuis 2004 entre Shanghai et son aéroport international de Pudong. Le trajet s'effectue en moins de 8 minutes, à la vitesse moyenne de  $245 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Sur ce parcours le train atteint la vitesse de  $430 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , il a la capacité d'accélérer de 0 à  $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  en 2 minutes.



Transrapid



SCMaglev

**Fig. 2.1**

Nous étudions ici quelques aspects du fonctionnement de ces trains, en accordant — sauf en partie I — une attention particulière au *Transrapid*.

Des données utiles, un formulaire et deux annexes sont regroupés en fin d'énoncé.

## 2.1 Capteur de position

L'instabilité de l'équilibre de la rame en sustentation nécessite l'asservissement en position de l'entrefer. Cet asservissement est réalisé en utilisant un capteur de position. On se propose dans cette partie d'étudier le principe d'un capteur de position à inductance variable.

### 2.1.1 Capteur à entrefer variable « *push-pull* »

La figure 2.2 décrit le schéma de principe d'un capteur inductif à entrefer variable dans un montage « *push-pull* ». Le capteur comprend un circuit magnétique composé d'un noyau solidaire du rail fixe et de deux bobines  $B_1$  et  $B_2$  sur deux noyaux ferromagnétiques en vis-à-vis, solidaires de la rame. Les bobines

$B1$  et  $B2$  du capteur sont identiques et placées de façon symétrique par rapport au rail lorsque la rame est à l'équilibre (figure 2.2 gauche). Ces bobines  $B1$  et  $B2$  sont indépendantes des bobines assurant la lévitation. Elles sont constituées de  $N_c$  spires de surface  $S$ .

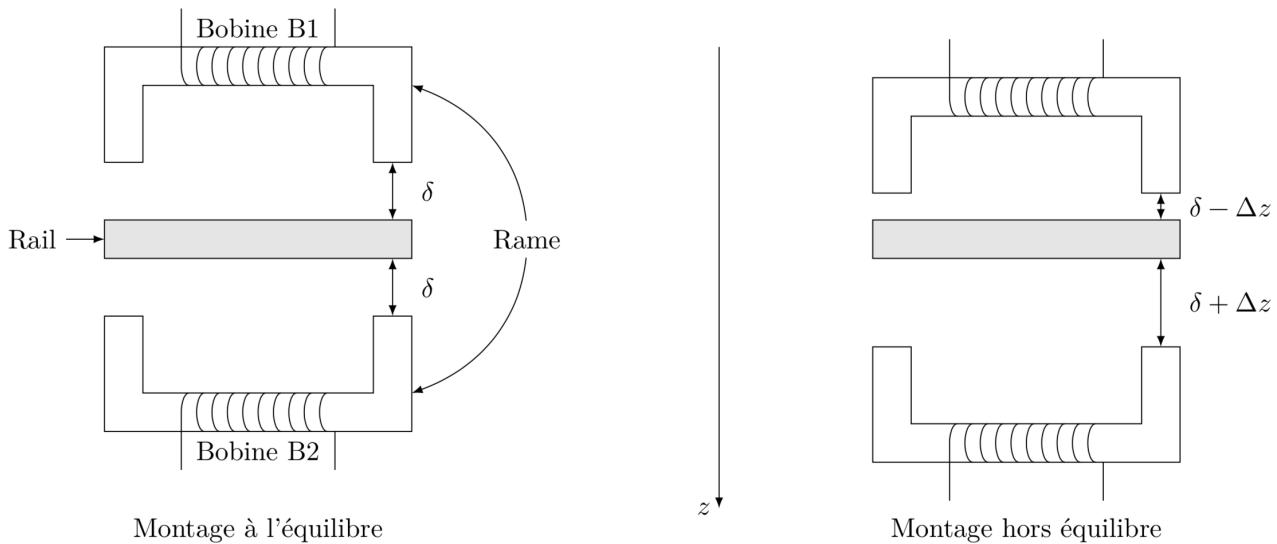


Fig. 2.2

### 2.1.2 Mesure des variations d'inductance

Les bobines  $B1$  et  $B2$  sont alimentées par un générateur délivrant une tension électrique  $e(t) = E \cos(\omega t)$ , de pulsation  $\omega$ , en série avec une résistance  $R$  (figure 2.3). On néglige ici les résistances des deux bobines.

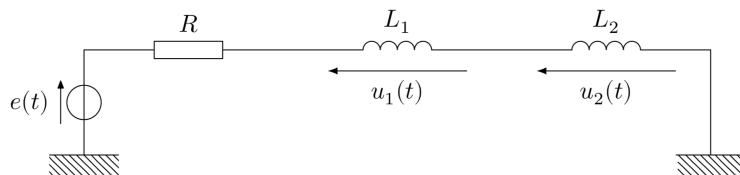


Fig. 2.3 – Alimentation du capteur

24. Déterminer les expressions des tensions électriques complexes  $\underline{u}_1$  et  $\underline{u}_2$  en fonction de  $R$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $\omega$  et  $e$ .

Ces tensions sont placées à l'entrée du montage présenté figure 2.4. L'ALI est supposé idéal en fonctionnement linéaire.

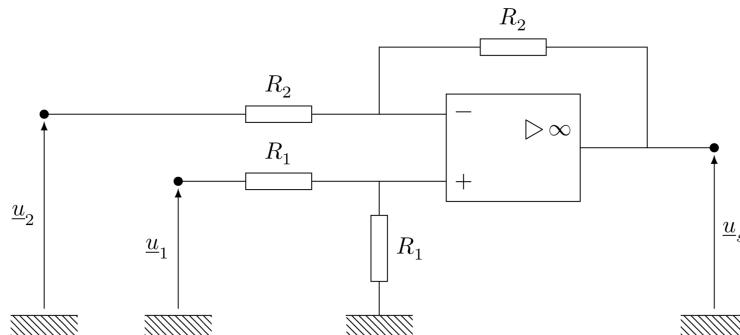


Fig. 2.4 – Montage soustracteur

25. Montrer que la tension électrique de sortie du montage peut s'écrire sous la forme  $\underline{u}_s = K (\underline{u}_1 - \underline{u}_2)$  où  $K$  est une constante que l'on déterminera en fonction des composants du montage.

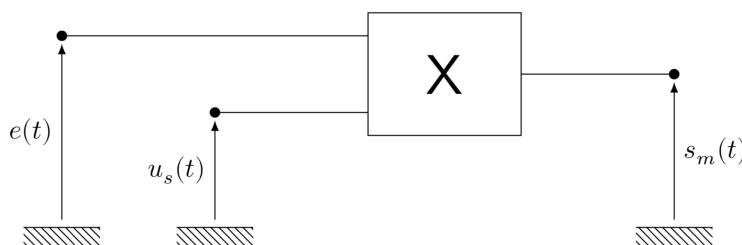
26. Exprimer la fonction de transfert complexe  $\underline{T}(j\omega)$  sous la forme  $\underline{T}(j\omega) = \frac{u_s}{e} = T_0 \frac{j(\omega/\omega_0)}{1+j(\omega/\omega_0)}$  où  $T_0$  et  $\omega_0$  sont des fonctions de  $L_e$ ,  $R$ ,  $\Delta z$  et  $\delta$ , que l'on déterminera<sup>1</sup>.
27. Tracer le diagramme de BODE asymptotique de  $\underline{T}(j\omega)$ .
28. De quel type de filtre s'agit-il ?
29. Quelle est la signification de la pulsation  $\omega_0$  ?
30. Dans quelle gamme de fréquences doit-on travailler pour que  $\underline{T}(j\omega)$  soit indépendant de  $\omega$  et proportionnel au déplacement de la rame ?<sup>2</sup>

On a  $R = 750 \Omega$ ,  $L_e = 60 \text{ mH}$  et une fréquence d'utilisation  $f = 4 \text{ kHz}$ .

31. Montrer que le signal de sortie peut se mettre sous la forme  $u_s(t) = E \frac{\Delta z}{\delta} \cos(\omega t + \varphi)$ .
32. Exprimer et calculer le déphasage  $\varphi$ .

### 2.1.3 Électronique de conditionnement

On souhaite obtenir un signal continu image de la position  $z$  de la rame. On utilise pour cela un multiplieur analogique, avec une constante de multiplication  $K_m$ , dans le montage donné figure 2.5.



**Fig. 2.5 – Multiplieur analogique**

33. Exprimer la tension électrique  $s_m(t)$  à la sortie du multiplieur et donner sa décomposition spectrale. Préciser le terme représentatif de la position  $z$  de la rame.
34. Quel montage doit-on placer à la sortie du multiplieur pour récupérer une tension continue  $S_m$  proportionnelle au déplacement  $\Delta z$ ? Préciser la nature et les caractéristiques de ce montage.
35. Exprimer la sensibilité du capteur définie par  $\frac{\Delta S_m}{\Delta z}$ .
36. Application numérique : Le capteur permet de mesurer la tension de sortie à 10 mV près. En déduire le plus petit écart mesurable par rapport à la position d'équilibre. On prendra  $E = 6,00 \text{ V}$ ,  $K_m = 1,00 \text{ V}^{-1}$ .

## Données et formulaire

### Caractéristiques du solénoïde

Diamètre $D$	Longueur $L$	Nombre de spires $N$	Diamètre du fil de cuivre $d$
0,2 m	0,5 m	10 000	2,0 mm

### Données sur le cuivre

- Masse volumique :  $\mu = 8,96 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Capacité thermique massique :  $c = 385 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Résistivité électrique :  $\rho = 1,68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
- Température de fusion :  $T_f = 1356 \text{ K}$

1. On prendra  $L_1 = L_e \left(1 + \frac{\Delta z}{\delta}\right)$  et  $L_2 = L_e \left(1 - \frac{\Delta z}{\delta}\right)$   
 2. Le déplacement de la rame est  $\Delta z$

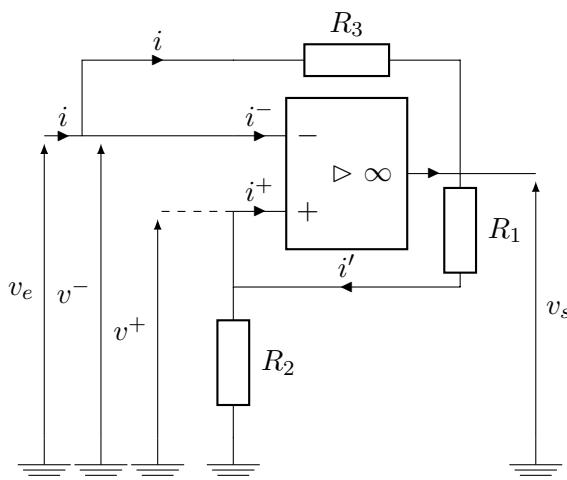
### 3.1 DéTECTEUR de métaux

Les détecteurs de métaux sont des instruments électroniques capables d'indiquer la présence de masses métalliques de nature et de taille différentes. Les détecteurs fixes sont utilisés dans les aéroports, dans l'industrie agro-alimentaire ou pharmaceutique, sur les réseaux routiers, etc. Les détecteurs mobiles peuvent servir à localiser et suivre le cheminement de canalisations enterrées ou de fils électriques, à aider aux fouilles archéologiques, à repérer des engins dangereux, etc.

#### 3.1.1 Oscillateur quasi-sinusoidal

##### Montage à résistance négative

Les pertes par effet Joule empêchent le maintien des oscillations libres du circuit  $RLC$ . Afin de les entretenir, le montage doit comporter une source d'énergie. Celle-ci est apportée par un amplificateur linéaire intégré, ou ALI, qui est un composant électronique dont l'alimentation ne sera pas représentée et dont le fonctionnement idéal est décrit lorsqu'il est nécessaire. En plus de l'ALI, le montage étudié (figure 3.1) comporte 3 résistances dont une variable, la résistance  $R_3$ .

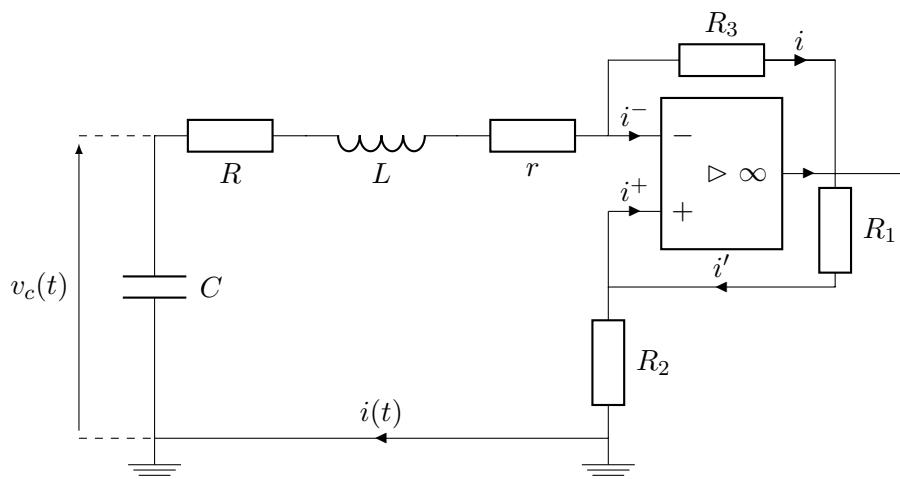


**Fig. 3.1 – Montage à résistance négative**

37. Sachant que le fonction de l'ALI est telle que  $i^- = 0$ , déterminer la relation liant  $v_e$ ,  $v_s$ ,  $R_3$  et  $i$ .
38. Sachant que le fonction de l'ALI est telle que  $i^+ = 0$ , et que  $v^+ = v^-$ , déterminer la relation liant  $v_e$ ,  $v_s$ ,  $R_1$  et  $R_2$ .
39. En déduire que l'on peut écrire  $v_e = R_n i$ , où  $R_n$  est une grandeur négative homogène à une résistance, que l'on exprimera en fonction de  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$ .

##### Circuit oscillateur de référence

On étudie maintenant le circuit constitué de l'association des deux circuits précédents (figures ?? et 3.1), dont le schéma est représenté sur la figure 3.2.

**Fig. 3.2 – Circuit oscillateur**

40. Montrer que l'équation différentielle satisfaite par l'intensité  $i(t)$  du circuit de l'oscillateur se met sous la forme :

$$\frac{d^2i}{dt^2} + 2\xi\omega_0 \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0$$

avec  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Donner l'expression du coefficient  $\xi$  en fonction de  $R_n$ ,  $R$ ,  $r$ ,  $C$  et  $L$ .

41. Déterminer la valeur de  $R_n$  qui conduit à des oscillations purement harmoniques non amorties. Quelle est la source d'énergie permettant de compenser l'effet JOULE présent dans les résistances du montage ?

### 3.1.2 DéTECTEUR de métaux

#### Document 3 – Extrait de la notice d'un détecteur de métaux

- Alimentation : 6 piles alcalines 1,5 V AA LR06 (*piles non fournies*) ;
- Courant de fonctionnement : en veille  $\sim 65$  mA ; max  $\sim 150$  mA ;
- Plage de tension de fonctionnement : 7,2  $\sim$  9,6 V ;
- Fréquence de fonctionnement : 7,5 kHz  $\pm$  1 kHz
- Sensibilité : Min. 20 cm (8 pouces).

Pour fabriquer le détecteur de métaux, on associe deux circuits oscillateurs semblables au précédent. On note  $f_r$  la fréquence fixe du circuit de référence et  $f_d$  la fréquence variable du circuit de détection. En l'absence de détection, les fréquences d'oscillations des oscillateurs sont identiques :

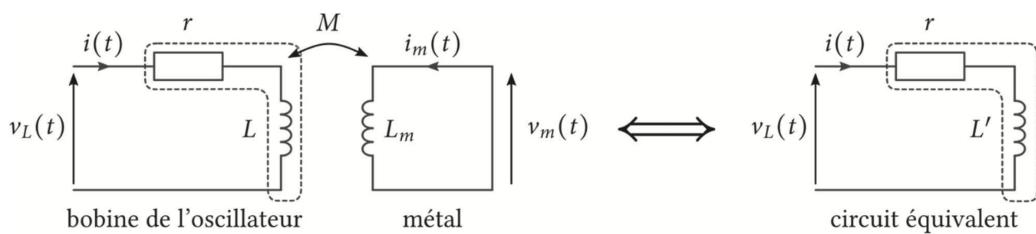
$$f_r = f_d = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Les valeurs des composants sont différentes de celles des parties précédentes.

42. Dans la pratique, peut-on concevoir deux oscillateurs de fréquences d'oscillations identiques ? Si oui expliquer pourquoi, si non, proposer une façon d'ajuster au mieux les fréquences.

#### Circuit de détection

Lorsqu'un métal est présent dans le champ de la bobine de détection, d'inductance propre  $L$ , on admet que le métal détecté se comporte comme une bobine d'inductance propre  $L_m$ . Le couplage entre les deux inductances est matérialisé par une inductance mutuelle notée  $M$ . L'inductance propre du circuit de détection se trouve alors modifiée et devient  $L'$ .



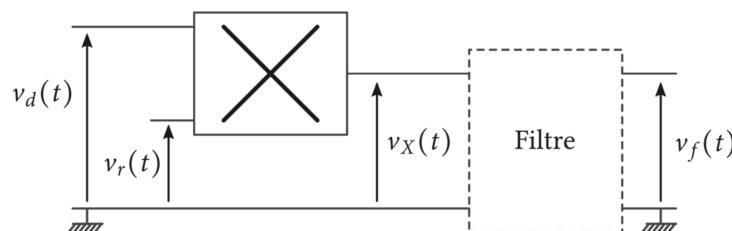
**Fig. 3.3 – Circuit de détection équivalent en présence d'un métal**

43. Exprimer  $v_m(t)$  et en déduire que  $\frac{di_m}{dt} = -\frac{M}{L_m} \frac{di}{dt}$ . En déduire alors que la tension  $v_L(t)$  peut se mettre sous la forme :

$$v_L(t) = ri + L' \frac{di}{dt} \quad \text{avec } L' = L \left( 1 - \frac{M^2}{LL_m} \right)$$

44. Sachant que  $M^2 \ll LL_m$ , en déduire que la détection d'un métal engendre une variation relative de la fréquence d'oscillation du détecteur de la quantité  $\frac{\Delta f_d}{f_d} = \frac{1}{2} \frac{M^2}{LL_m}$ .

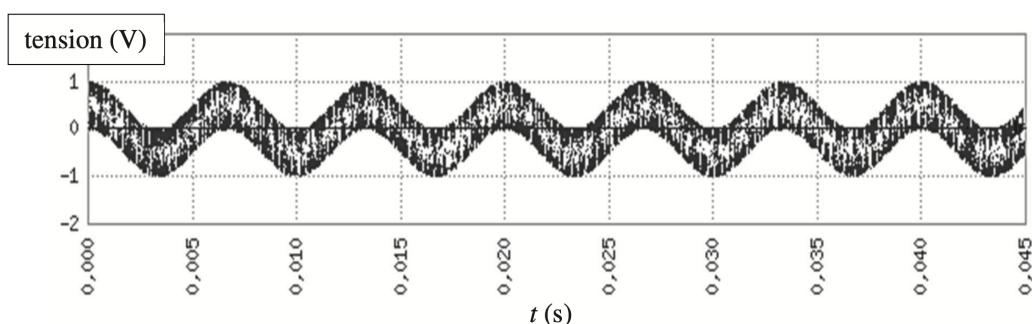
On note respectivement  $v_r(t) = v_{r0} \cos(2\pi f_r t)$  et  $v_d(t) = v_{d0} \cos(2\pi f_d t)$  les tensions de chacun des oscillateurs respectivement de référence et de détection. Afin de déterminer la variation de fréquence, on utilise le montage de la figure 3.4 comprenant un multiplieur réalisant l'opération  $v_X(t) = K \times v_d(t) \times v_r(t)$  et un filtre dont la nature est à déterminer.



**Fig. 3.4 – Circuit de détection de différence de fréquences**

Rappel :  $\cos a \cos b = \frac{1}{2} (\cos(a+b) + \cos(a-b))$ .

45. Établir l'expression de la tension  $v_X(t)$  en sortie du multiplieur et représenter son spectre.  
 46. Sachant que l'on souhaite obtenir en sortie du filtre un signal permettant de déterminer la différence de fréquence  $\Delta f = |f_r - f_d|$  entre les oscillateurs, proposer un montage passif simple permettant d'isoler la composante pertinente du signal. Déduire du document 3 une valeur numérique plausible de sa fréquence de coupure.  
 47. Lors d'une tentative de détection, le signal  $v_X(t)$  suivant (figure 3.5) a été enregistré en sortie du multiplieur. En déduire l'écart entre les deux fréquences des oscillateurs et prévoir ce qui sera détecté en sortie du filtre.



**Fig. 3.5 – Tension enregistrée en sortie du multiplieur**

# 2020 CCP PC Physique – De la physique d'un aéronef (env. 10 %)

Ce problème aborde certains aspects de la physique appliqués à un avion dans trois parties indépendantes.

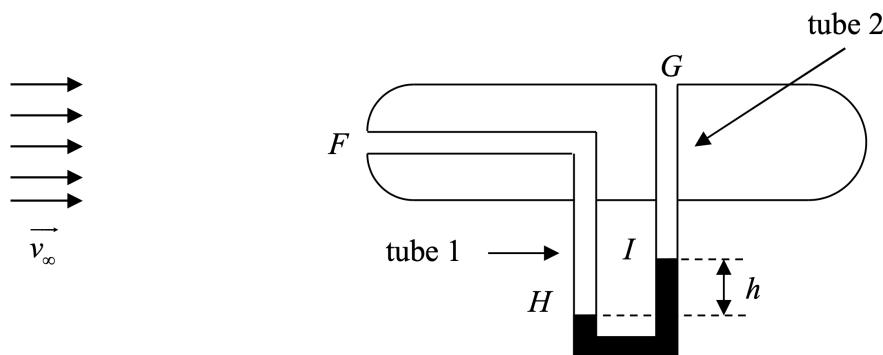
La partie 4.1 aborde des problématiques d'instrumentation et est constituée de deux sous-parties indépendantes avec des études théoriques du tube de PITOT (sous-partie 4.1.1) et de la mesure du givre (sous-partie non présente dans ce devoir).

Les effets de la gravité sur l'air seront négligés dans l'ensemble du problème.

## 4.1 Instrumentation

### 4.1.1 Tube de Pitot

Le tube de PITOT est un des nombreux capteurs qui équipent l'avion. Il permet la mesure de la vitesse de l'avion, donnée essentielle à sa bonne conduite. Il s'agit d'un tube très fin (moins de  $5 \text{ mm}^2$  de surface) qui est placé parallèlement à la direction de l'écoulement de l'air (figure 4.1). Ce tube possède deux ouvertures en  $F$  et  $G$ . L'ouverture en  $F$  est la prise dite de *pression totale* et celle en  $G$  est la prise dite de *pression statique*. On mesure la différence de pression de l'air entre les deux tubes 1 et 2 avec un manomètre différentiel, ce qui permet d'obtenir la vitesse  $v_\infty$  de l'écoulement.



**Fig. 4.1 – Tube de Pitot**

On considère que l'air est un fluide parfait, homogène, incompressible, de masse volumique  $\rho_\infty$  et en écoulement stationnaire. On rappelle que les effets de la gravité sur l'air sont négligés. Loin du tube l'air a une pression  $P_\infty$  et une vitesse  $v_\infty$ .

48. Représenter l'allure de la ligne de courant qui aboutit en  $F$  et l'allure de la ligne de courant qui longe le tube et passe à proximité de  $G$ .
49. Déterminer, en fonction de  $P_\infty$ ,  $\rho_\infty$ , et  $v_\infty$ , les expressions de la vitesse  $v_F$  et de la pression  $P_F$  du fluide en  $F$  ainsi que la vitesse  $v_G$  et la pression  $P_G$  du fluide en  $G$ .
50. Dans le manomètre, il y a un liquide de masse volumique  $\rho_l$ . On mesure une différence d'altitude  $h$  entre les deux surfaces du liquide. Déterminer l'expression de la différence de pression,  $P_H - P_I$ , entre ces deux surfaces.
51. Déduire des questions précédentes l'expression de la vitesse de l'écoulement  $v_\infty$  de l'air en fonction de  $\rho_l$ ,  $\rho_\infty$ ,  $g$  et  $h$ . Comment évolue  $h$  lorsque la vitesse de l'air augmente ?

# 5 2018 E3A MP Physique Chimie (env. 28 %)

On se propose d'étudier différents équipements relatifs à la voiture. Ainsi la dernière partie se penche sur les réactions chimiques mises en œuvre dans l'airbag, technologie aujourd'hui généralisée permettant d'augmenter de manière significative la sécurité des passagers.

Le traitement complet et cohérent d'une sous-partie est valorisé par le barème. La calculatrice est autorisée.

## 5.1 Chimie de l'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.

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  $\text{NaN}_3$  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.

### 5.1.1 Formation du gaz

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

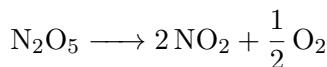
- Réaction 1 :  $2\text{NaN}_3(s) \longrightarrow 2\text{Na}_{(s)} + 3\text{N}_{2(g)}$  : réaction de génération du gaz ;
- Réaction 2 :  $10\text{Na}_{(s)} + 2\text{KNO}_3(s) \longrightarrow \text{K}_2\text{O}_{(s)} + 5\text{Na}_2\text{O}_{(s)} + \text{N}_{2(g)}$  : réaction de sécurité ;
- Réaction 3 :  $\text{K}_2\text{O}_{(s)} + \text{Na}_2\text{O}_{(s)} + \text{SiO}_2(s) \longrightarrow \text{K}_2\text{Na}_2\text{SiO}_4(s)$  : réaction de combinaison.

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

1. Les couples en jeu dans la réaction de génération sont  $\text{Na}^+ / \text{Na}$  dont le potentiel standard est  $E_1^\circ = -2,71 \text{ V}$  et  $\text{N}_2 / \text{N}_3^-$  dont le potentiel standard est  $E_2^\circ = -3,40 \text{ V}$ . 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 :  $\text{NaN}_3(s) = \text{Na}_{(\text{aq})}^+ + \text{N}_3^-(\text{aq})$ .
2. Cette réaction est-elle quantitative ? Justifier en calculant la constante d'équilibre de la réaction.
3. Proposer une structure de LEWIS pour les ions azotures  $\text{N}_3^-$ , supposée sans cycle.
4. 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 envisage que la réaction 1. On donne  $M(\text{Na}) = 23 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  et  $M(\text{N}) = 14 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .
5. On suppose la température  $T = 300 \text{ K}$  constante et on rappelle la constante des gaz parfaits  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ . L'airbag est-il gonflé ?
6. 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.
7. Pourquoi la seconde réaction est-elle appelée réaction de sécurité ?
8. Écrire l'équation de la réaction chimique de  $\text{Na}_2\text{O}$  avec l'eau sachant qu'une telle solution se colore en rose en présence de phénolphtaléine et que des ions  $\text{Na}^+$  sont produits.

### 5.1.2 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 :



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  $\text{N}_2\text{O}_5$  pur dans l'enceinte, à la « concentration »  $[\text{N}_2\text{O}_5]_0 = \frac{n(\text{N}_2\text{O}_5)_0}{V}$ . On note  $P_0$  la pression initiale dans l'enceinte.

9. Établir l'équation différentielle vérifiée par la « concentration »  $[\text{N}_2\text{O}_5] = \frac{n(\text{N}_2\text{O}_5)}{V}$ .
10. Exprimer alors la « concentration »  $[\text{N}_2\text{O}_5]$  en fonction de  $t$ ,  $k$  et  $[\text{N}_2\text{O}_5]_0 = \frac{n(\text{N}_2\text{O}_5)_0}{V}$ .
11. Exprimer alors la pression partielle  $P_{\text{N}_2\text{O}_5}$  en fonction de  $t$ ,  $k$  et  $P_0$ .
12. 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 :

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

13. 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.

14. En déduire la valeur de la constante de vitesse  $k$ .
15. Pour cette réaction, l'énergie d'activation est de  $103 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . À quelle température faudra-t-il réaliser la réaction si on veut que 95 % du réactif soit transformé au bout de 30 min ?
16. À 200 °C, il faut 3 min 20 s pour que  $\frac{2}{3}$  de  $\text{N}_2\text{O}_5$  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 ?

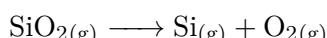
### 5.1.3 Thermochimie de la silice

La réaction 3 présentée en partie 5.1.1 nécessite de la silice solide  $\text{SiO}_{2(s)}$ . On envisage la condensation de la silice et on souhaite vérifier que cette réaction est exothermique.

On donne l'enthalpie standard de sublimation du silicium à 298 K :  $\Delta_{\text{sub}}H^\circ(\text{Si}) = 399 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , et on indique quelques enthalpies standard de formation ci-dessous :

	$\text{Si}_{(s)}$	$\text{SiO}_{2(s)}$	$\text{O}_{2(g)}$
$\Delta_f H^\circ$ (kJ · mol <sup>-1</sup> à 298 K)	0	-911	0

De plus l'enthalpie de la réaction suivante, notée  $A$  :



est notée  $\Delta H_1^\circ = 1094 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  à 298 K.

17. Rappeler la définition d'une transformation de condensation. Quelle est le nom de la transformation inverse ?
18. Pourquoi les enthalpies standard de formation du silicium et du dioxygène sont-elles nulles ?
19. Que dire de la variation d'une fonction d'état ? Quelle conséquence cela a-t-il sur un cycle ?
20. Établir l'expression littérale puis calculer la valeur numérique de l'enthalpie standard de condensation de la silice  $\text{SiO}_{2(\text{g})}$ . Conclure.
21. Comment serait déplacé l'équilibre de la réaction A si on augmentait la pression extérieure ? Justifier.
22. La silice (ou dioxyde de silicium) peut également être traitée par procédé métallurgique de carboréduction, afin de fournir du silicium pur utilisé dans l'industrie de la micro-électronique. On donne le couple CO / C. Écrire l'équation de réaction de la carboréduction de la silice.