

---

## **DST N°3**

**Changement d'état, thermodynamique différentielle,  
diffusion thermique, dynamique des fluides,  
thermochimie, E-pH, précipitation & dosage**

---

Lycée LANGEVIN - WALLON

15 novembre 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 ;
- deux extraits 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 numéroter les questions.

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

## Présentation générale

Le hockey sur glace est un sport d'équipe se jouant sur une patinoire. L'objectif de chaque équipe est de marquer des buts en envoyant un disque de caoutchouc, appelé palet, à l'intérieur du but adverse situé à une extrémité de la patinoire. Les joueurs se déplacent en patins à glace et dirigent le palet à l'aide d'un bâton de hockey également appelé crosse. Cette dernière est composée de deux parties : le manche qui permet au joueur de tenir la crosse et la palette qui permet de taper dans le palet. Le terrain de jeu, la patinoire, mesure 60 mètres de long sur 30 mètres de large.

Ce sujet comporte deux parties indépendantes :

- une première partie de physique, traitant de la formation de la couche de glace et d'une installation de patinoire artificielle, est proposée en 1.1 ;
- une seconde partie de chimie, traitant d'un fluide réfrigérant, est proposée en 5.1.

## 1.1 Étude de la patinoire

### 1.1.1 Formation d'une couche de glace à la surface d'une patinoire naturelle

Dans certains pays, des patinoires naturelles se forment en hiver à la surface des lacs gelés et sont alors utilisés pour des matchs de hockey amateurs.

#### Document 4 – La solidité de la glace

La couleur de la glace peut donner une indication de sa solidité. La glace bleue pâle est la plus solide. La glace blanche opaque ou glace de neige est, en général, seulement à moitié aussi solide que la glace bleue pâle. La glace grise n'est pas sécuritaire. L'épaisseur de la glace doit être de 15 cm pour la marche ou le patinage individuels, 20 cm pour le patinage en groupe ou les jeux et 25 cm pour les motoneiges.

Source : <http://www.croixrouge.ca>

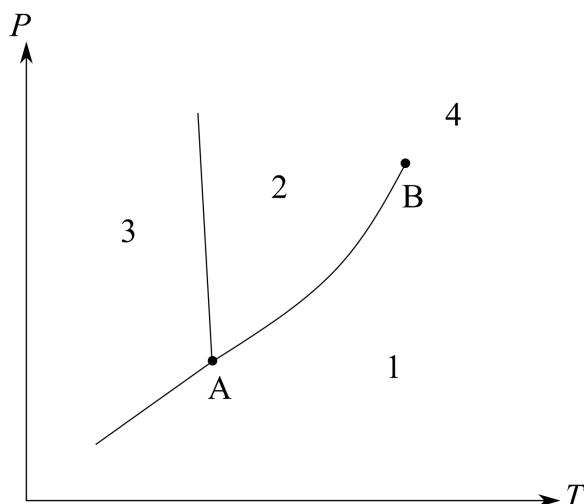


Fig. 1.1 – Diagramme de phases ( $P, T$ ) de l'eau

1. Le diagramme de phases de l'eau est présenté sur la figure 1.1. Recopier ce diagramme et identifier les domaines d'existence des différentes phases. Préciser le nom des points caractéristiques  $A$  et  $B$ .
2. Lors du déplacement des joueurs de hockey sur la glace, la lame du patin crée une fine couche d'eau liquide à la surface de la glace. Donner une cause physique à sa création.

L'eau liquide d'un grand lac est à la température de congélation  $T_E = 0^\circ\text{C}$ . L'air au-dessus du lac est à la température  $T_A = -10^\circ\text{C}$ . Ces deux températures sont supposées constantes. À l'instant initial, l'eau est liquide puis le lac se couvre progressivement d'une couche de glace (figure 1.2).

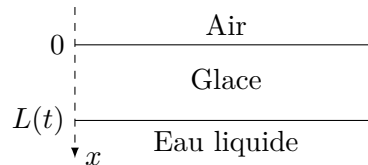


Fig. 1.2 – Formation d'une couche de glace à la surface d'un lac

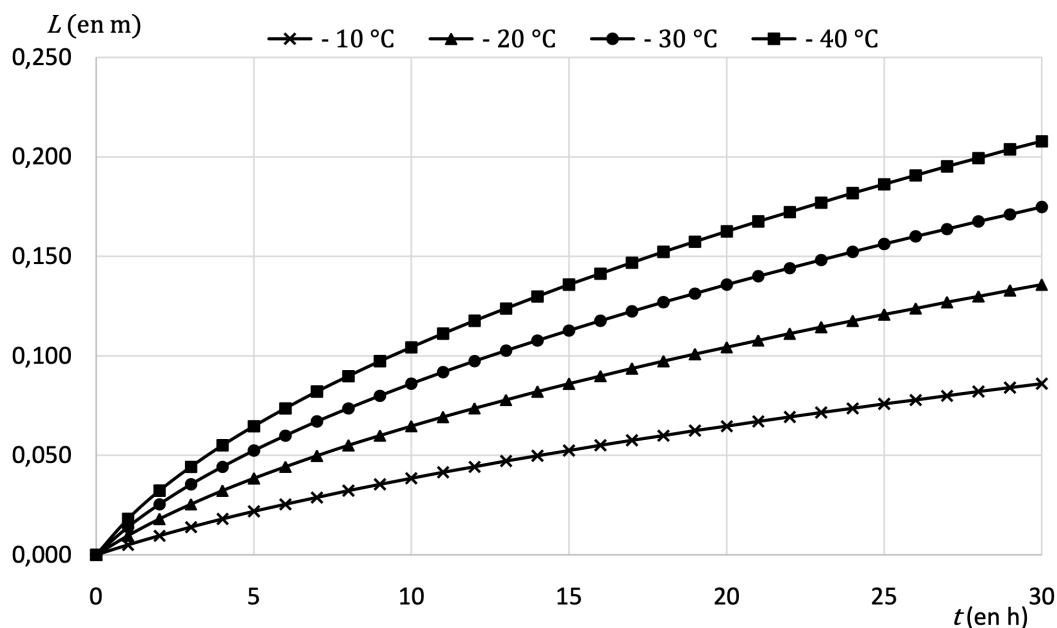


Fig. 1.3 – Simulation graphique représentant l'épaisseur de la couche de glace  $L$  en fonction du temps  $t$  pour différentes températures  $T_A$  de l'air

On suppose que la température  $T(x, t)$  ne dépend que du temps et d'une seule coordonnée d'espace, que la glace est un milieu isotrope et que la pression est constante. L'épaisseur de la couche de glace à l'instant  $t$  est notée  $L(t)$ . À l'instant  $t = 0$ ,  $L(0) = 0$ .

Le transfert thermique de la glace vers l'air est modélisé par la loi de NEWTON :  $\varphi = h(T_0(t) - T_A)$  avec  $\varphi$  le flux thermique surfacique,  $T_0(t) = T(0, t)$  la température de la glace en  $x = 0$  et  $h$  le coefficient de transfert en  $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Le référentiel choisi est associé à l'interface entre l'air et la glace.

La masse volumique de la glace, supposée incompressible et indilatable, est notée  $\rho$  ; la conductivité thermique de la glace est notée  $\lambda$  et la capacité calorifique massique de la glace est notée  $c$ . Ces grandeurs associées à la glace sont supposées indépendantes de la température et de la pression.

3. Citer trois modes de transfert thermique.
4. En utilisant la loi de FOURIER, donner l'expression du vecteur densité de flux thermique noté  $\vec{j}_{\text{th}}$  à l'intérieur de la glace.
5. À l'aide d'un bilan thermique local à une dimension sur un parallélépipède de surface  $S$  et d'épaisseur  $dx$ , établir une relation différentielle entre la température et la norme du vecteur densité de flux thermique au sein de la glace.

6. En déduire l'équation de la diffusion thermique :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

7. En se plaçant dans le cadre de l'approximation quasi stationnaire, montrer que pour  $0 \leq x \leq L(t)$  :

$$T(x, t) = T_0(t) + (T_E - T_0(t)) \frac{x}{L(t)}$$

8. Déduire de la continuité du flux thermique en  $x = 0$  l'expression de  $L(t)$  en fonction de  $T_0(t)$  :

$$L(t) = \frac{\lambda (T_E - T_0(t))}{h (T_0(t) - T_A)}$$

9. On admet que l'épaisseur de la couche de glace en fonction du temps est représentée par la simulation graphique en figure 1.3. Au bout de 20 heures, les joueurs de hockey peuvent-ils considérer que la glace est suffisamment solide pour pouvoir jouer dessus ?
10. En utilisant la figure 1.3, commenter puis expliquer l'évolution de la vitesse de formation de la glace pour une même température de l'air  $T_A$ , puis pour différentes températures de l'air  $T_A$ .
11. De quelle autre grandeur, encore non citée jusqu'à présent, a-t-on eu besoin pour résoudre numériquement le problème et proposer la simulation en figure 1.3 ? Donner sa définition et préciser l'unité.

### 1.1.2 Installation d'une patinoire artificielle

#### Document 5 – Le tapis glacier

Pour installer une patinoire artificielle, la première condition requise est un sol plat, ferme et nivelé que l'on revêt d'un tapis glacier constitué par un réseau de tuyauteries reliées les unes aux autres et formant un circuit fermé. Celui-ci, placé sur le sol de la patinoire, est recouvert de sable ou d'un dallage en béton afin de le protéger.

Le circuit est rempli d'un mélange antigel et d'eau, puis relié à un système réfrigérant.

Une pompe fait circuler le liquide en continu dans le réseau de tuyauteries du tapis glacier. Peu à peu, le système réfrigérant abaisse la température du liquide entre  $-8^\circ\text{C}$  et  $-10^\circ\text{C}$ .

Ensuite, à l'aide d'une lance à eau, on pulvérise la première couche d'eau sur les tuyaux du tapis glacier et l'eau cristallise instantanément. L'opération est répétée plusieurs fois et, peu à peu, la couche de glace se forme. L'épaisseur idéale d'une piste de glace se situe entre 6 et 8 cm.

Source : Article Patinoire de Wikipédia en français  
(<http://fr.wikipedia.org/wiki/Patinoire>)

On étudie un réseau de tuyauterie en forme de serpentin (figure 1.4) utilisé dans certains tapis glaciers. Il comporte les éléments suivants :

- 4 tubes rectilignes de diamètre 60 mm et de longueur 8,0 m chacun ;
- 3 coudes à  $180^\circ$ .

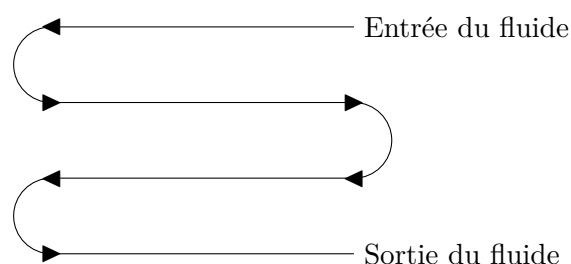


Fig. 1.4 – Exemple de réseau de tuyauterie en forme de serpentin

Le réseau de tuyauterie transporte un débit volumique  $D_v = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  considéré comme constant. La pression en entrée du réseau est  $P_1 = 3,0 \text{ bar}$ . Les caractéristiques du fluide de refroidissement, considéré comme incompressible en écoulement stationnaire dans le réseau de tuyauterie, sont les suivantes :

- viscosité dynamique :  $\eta = 2,0 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  ;
- masse volumique :  $\rho_f = 1,1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Afin d'assurer le refroidissement de la patinoire, il faut que la pression en sortie du réseau soit au minimum égale à 90 % de la pression en entrée.

12. Calculer la vitesse moyenne  $v$  d'écoulement du fluide dans le réseau de tuyauterie.
13. Montrer que l'écoulement dans les tubes rectilignes du réseau de tuyauterie est laminaire.
14. Représenter sur un schéma le profil de vitesse dans une section des tubes rectilignes.
15. On se place hors de la couche limite et on néglige les phénomènes visqueux. Donner les conditions générales d'application du théorème de BERNOULLI. Exprimer ce théorème entre l'entrée et la sortie du réseau de tuyauterie, puis simplifier l'expression obtenue.
16. Une mesure, réalisée par un technicien dans le réseau de tuyauterie, permet d'estimer la perte de charge totale notée  $\Delta h = -0,30 \text{ m}$ . Le refroidissement est-il bien assuré ?
17. Un technicien souhaite vérifier la vitesse d'écoulement du fluide dans le réseau de tuyauterie. Il dispose du matériel suivant : un tube coudé et un tube droit de diamètres très inférieurs à celui du réseau de tuyauterie, une règle graduée, un outil pour percer la paroi du réseau de tuyauterie. Expliquer la démarche qu'il pourrait suivre. Pour cela :
  - schématiser la situation ;
  - détailler les relations et les calculs utilisés ;
  - expliquer le problème qu'il va rencontrer une fois l'installation réalisée.

## 2 Physique : 2020 CCP PSI [17 %]

Ce sujet comporte deux parties indépendantes :

- La première partie, de physique, traite des aspects thermiques d'une ailette de refroidissement , et est proposée en 2.1 ;
- La première partie, de chimie, traite du chlore et de l'eau de Javel, et est proposée en 6.1.

### 2.1 Aspects thermiques

En cours de fonctionnement, un transistor dissipe de l'énergie, il se comporte comme une source de chaleur de puissance  $\mathcal{P}_s(t)$ . Il est encapsulé dans un boîtier (figure 2.1) que l'on supposera ici en contact avec le milieu atmosphérique.

On note  $C_t$  la capacité thermique du transistor et  $C_b$  celle du boîtier. La conductance thermique transistor-boîtier est notée  $G_{tb}$  et celle du boîtier-extérieur est notée  $G_{be}$ . Les températures du transistor et du boîtier sont respectivement notées  $T_t(t)$  et  $T_b(t)$ . La température de l'extérieur notée  $T_{\text{ext}}$  est constante.

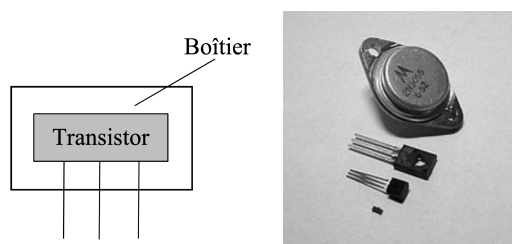


Fig. 2.1 – Transistor et boîtier

18. Rappeler brièvement le lien qui existe entre une résistance thermique et une conductance thermique. Préciser l'unité d'une conductance thermique.
19. En faisant un bilan thermique sur le transistor, écrire l'équation différentielle reliant  $\mathcal{P}_s(t)$ ,  $T_t(t)$ ,  $T_b(t)$ ,  $C_t$  et  $G_{tb}$ .
20. En faisant un bilan thermique sur le boîtier, écrire l'équation différentielle reliant  $T_b(t)$ ,  $T_{\text{ext}}$ ,  $C_b$ ,  $G_{tb}$  et  $G_{be}$ .
21. Une analogie thermique-électrique permet de construire le schéma électrique équivalent suivant (figure 2.2). Remplacer les bulles  $B_1$ ,  $B_2$  et  $B_3$  par les éléments électrocinétiques adéquats. Préciser à quoi correspondent les potentiels  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$ .

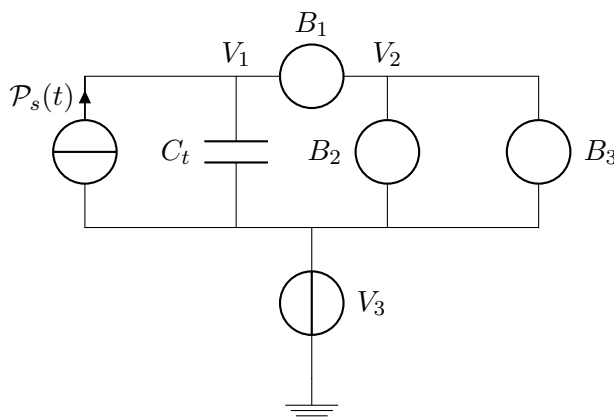


Fig. 2.2 – Schéma électrique équivalent

Pour favoriser les échanges thermiques avec le milieu extérieur, les différents composants de l'électronique de puissance (diodes, transistors) sont généralement montés sur des radiateurs (figure 2.3).

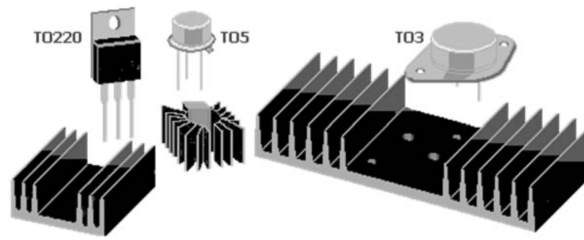


Fig. 2.3 – Composants et radiateurs

On se propose ici de dimensionner la taille d'une ailette de refroidissement appartenant à l'un de ces radiateurs. L'ailette (figure 2.4) est assimilée à un parallélépipède d'épaisseur  $e = 2 \text{ mm}$ , de largeur  $b = 10 \text{ cm} \gg e$  et de longueur  $a = 20 \text{ cm}$ .

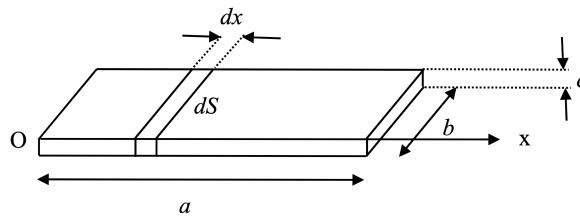


Fig. 2.4 – Ailette de refroidissement

On se place en régime stationnaire, la température sur la face de l'ailette située en  $x = 0$  est  $T_0 = 65^\circ\text{C}$ , la température de l'air ambiant est  $T_a = 15^\circ\text{C}$ .

Le transfert thermique conductif est supposé unidimensionnel dans la direction de l'axe  $Ox$ . Il obéit à la loi de FOURIER. La conductivité thermique de l'ailette est :  $\lambda = 16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Le transfert thermique de l'ailette vers l'air ambiant est tel que la puissance thermique échangée par la surface latérale  $dS$  d'un élément de longueur  $dx$  est de la forme :  $dP = h(T(x) - T_a)dS$  où  $h$  est une constante de valeur numérique : 160 SI.

22. Quelle est l'unité de  $h$ ? Pourquoi est-il nécessaire, pour notre étude, de décomposer le transfert thermique entre l'ailette et l'air ambiant en éléments infinitésimaux de longueur  $dx$ ?
23. Établir l'équation différentielle vérifiée par  $T(x)$  en faisant apparaître une longueur caractéristique  $L$  qui s'exprime en fonction de  $\lambda$ ,  $e$  et  $h$ . Calculer puis comparer les valeurs de  $L$  et  $a$ .
24. Expliquer pourquoi on peut considérer  $a$  comme infinie, puis déterminer le profil de température  $T(x)$ .
25. Exprimer en fonction de  $T_0$ ,  $T_a$ ,  $b$ ,  $h$ ,  $\lambda$  et  $e$  la puissance thermique totale évacuée par l'ailette. Peut-on réduire la longueur de l'ailette sans diminuer sensiblement son efficacité? Si oui, proposer une nouvelle longueur notée  $a'$ . Commenter la forme des radiateurs apparaissant sur la figure 2.3.



### 3 Physique : 2018 Banque PT [17 %]

#### Document 1 : Le plan Home Star et les économies d'énergie

La crise pétrolière de 1973 a amené les pouvoirs publics à des politiques volontaristes en matière d'énergie. La construction des logements obéit depuis lors à des règles d'isolation thermique. Ces règles sont de plus en plus contraignantes au fil des décennies mais réalisables grâce à des avancées technologiques majeures et ont permis de limiter la facture énergétique française.

Celle-ci représente toutefois encore en 2017 de 2,5 % à 3 % du PIB et 40 % de cette charge est due au chauffage des bâtiments. La France importe en effet la quasi-totalité de l'énergie fossile dont elle a besoin. La rénovation des bâtiments anciens est donc un enjeu fondamental des prochaines décennies.

La consommation d'énergie pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire des logements est en moyenne de :

- $100 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}/\text{an}$  pour ceux construits après 2000.
- $200 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}/\text{an}$  pour ceux construits entre 1975 et 2000, soit le quart du parc immobilier.
- $375 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}/\text{an}$  pour les bâtiments d'avant 1975, qui représentent les deux tiers du parc immobilier.

Ces dernières années, la problématique du réchauffement climatique a amené les gouvernements à accélérer la transition énergétique afin d'améliorer le bilan carbone de la France et diversifier ses sources d'énergie. La France développe en particulier la part des énergies dites renouvelables dans son bouquet énergétique.

De même, les États-Unis, premier consommateur au monde d'énergie fossile, ont lancé en 2010 le plan « Home star », plan d'isolation thermique des bâtiments, défendu par le président OBAMA en personne.

#### Document 2 : Isolation thermique de bâtiments

On trouve dans une notice pour l'isolation thermique des bâtiments, les valeurs suivantes de conductances thermiques **pour une surface unité de matériau** :

Éléments du bâtiment	Conductance thermique pour $1 \text{ m}^2$ de surface en USI.
Fenêtre simple vitrage	$U_w = 6,0$
Fenêtre double vitrage	$U_w = 3,0$
Mur d'épaisseur 30 cm	$U_w = 2,0$
Mur creux d'épaisseur 30 cm	$U_w = 1,5$
Polystyrène d'épaisseur 2 cm	$U_w = 0,5$

N.B. : il est appelé coefficient  $U_w$  de performance. Il inclut toutes les déperditions (conductif et conducto-convectif).

**Document 3 : Conductivités thermiques en USI**

Matériau	Conductivité thermique en USI
Cuivre	400
Verre à vitre	1,0
Air sec	0,03
Laine de verre	0,04

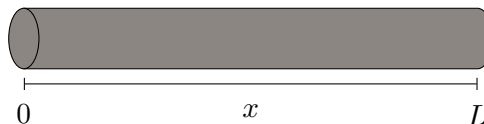
**On prendra pour les applications numériques :**

1. Prix du  $\text{kW} \cdot \text{h}$  en euros en 2018 : 0,15€. On rappelle que le  $\text{kW} \cdot \text{h}$  est l'énergie produite pendant une heure pour une puissance de 1 kW.
2. On prendra pour les calculs 5,5 mois  $\simeq 4000$  h, et 1 an =  $3 \times 10^7$  s.
3. On donne  $3,14 \times 10^6$  h  $\simeq 360$  an.
4. Diffusivité thermique du cuivre  $D_{\text{cuivre}} = 120 \times 10^{-6}$  USI et  $\frac{1}{D_{\text{cuivre}}} \simeq 8330$  USI.
5.  $\frac{8330}{\sqrt{60}} \simeq 139$
6.  $\sqrt{6} \simeq 2,4$

Le problème comporte trois parties largement indépendantes. Dans une première partie, on s'intéresse à l'isolation thermique et au concept de bâtiments dits à énergie positive. La seconde partie abordera le chauffage d'un appartement. Enfin, la troisième partie étudiera une PAC air/eau soit une énergie renouvelable et avec un bon bilan carbone.

**3.1 Étude de l'isolation thermique d'un appartement**

On considère une barre métallique en cuivre de longueur  $L$  dont la surface latérale est isolée thermiquement. Sa masse volumique est notée  $\rho$  et sa chaleur massique à pression constante est notée  $C_m$ .



On rappelle que l'unité de  $C_m$  est le  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . On note  $A$  l'aire de sa section droite. Enfin, on note  $\lambda$  sa conductivité thermique. Le métal de la barre vérifie la loi phénoménologique de FOURIER. En  $x = 0$  est placé un thermostat de température  $T(x = 0) = T_1$  et en  $x = L$  est placé un thermostat de température  $T(x = L) = T_2$ .

26. Qu'appelle-t-on thermostat ou source de chaleur ?
27. Donner un exemple de système thermodynamique assimilable à un thermostat.
28. Quelle est en théorie la capacité thermique d'un thermostat idéal ?
29. Rappeler la loi de FOURIER de la conduction thermique au sein d'un matériau homogène.
30. En faisant un bilan local d'enthalpie entre  $x$  et  $x + dx$  :
  - (a) Établir l'équation locale de la chaleur qu'on mettra sous la forme :  $\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  avec  $T(x, t)$  la température locale de la tranche mésoscopique entre  $x$  et  $x + dx$  à une date  $t$ .
  - (b) Donner l'expression de  $D$  en fonction de  $\lambda$ ,  $\rho$  et  $C_m$ .
31. Quelle est, en utilisant une équation aux dimensions de l'équation aux dérivées partielles, l'unité de  $D$  ?
32. On admet que le temps caractéristique pour atteindre le régime permanent s'écrit

$$\tau = \frac{L^a}{D^b}$$

- (a) Déterminer la valeur du coefficient  $a$  et du coefficient  $b$  par analyse dimensionnelle.
- (b) Commenter physiquement la pertinence du résultat et l'expression de  $D$  en fonction  $\lambda$ ,  $\rho$  et  $C_m$ .
- (c) Calculer ce temps pour une barre de cuivre où  $L = 1$  m. Commenter le résultat.
33. Établir la solution de l'équation de la chaleur en régime permanent stationnaire c'est-à-dire le profil de température  $T(x)$  et en faire le graphe.
34. On note  $\phi$  le courant ou flux thermique. Il représente la puissance qui traverse une section droite de la barre.
- (a) Montrer qu'en convention récepteur pour la différence de température, on a :  $T_1 - T_2 = R_{th}\phi$ .
- (b) Donner l'expression de  $R_{th}$  en fonction de  $\lambda$ ,  $A$  et  $L$ .  
 $R_{th}$  est appelée résistance thermique et son inverse  $G_{th} = \frac{1}{R_{th}}$  est appelée conductance thermique.
- (c) Donner **en français** la signification physique de la conductance thermique après avoir précisé son unité.
35. **Utilisation des documents 2 et 3**  
 Commenter physiquement les documents 2 et 3. On donnera deux commentaires physiques **en français** par document.
36. En faisant un schéma, expliquer ce qu'est le double vitrage. Quel est l'intérêt d'une couche d'air dans le double vitrage ? Justifier soigneusement vos réponses en utilisant les documents fournis.
37. « **Déperdition** » à travers les fenêtres  
 On se place dans cette partie en hiver et en Alsace. Le différentiel moyen de température entre l'intérieur de la maison et l'extérieur est supposé de manière simplifiée égal à une valeur moyenne  $\Delta T = 10$  K pendant une durée  $\Delta t = 5,5$  mois  $\simeq 4000$  h et de 0 K (coût nul) le reste de l'année. On présentera les résultats sous la forme d'un tableau à reproduire sur la copie.
- (a) Calculer le courant ou flux thermique  $\phi$  traversant un mètre carré de fenêtre simple vitrage puis un mètre carré de fenêtre double vitrage.
- (b) En déduire l'énergie  $E$  consommée en kW · h pour un mètre carré de fenêtre pendant l'année et le coût correspondant en euros.

$\phi$ (W)	$E$ (kW · h) sur l'année	Coût annuel (€)
Simple vitrage		
Double vitrage		

# Physique : 2016 CCMP MP – De la physique dans le tunnel de Fréjus [16 %]

Ce sujet comporte deux parties indépendantes qui s'intéressent à divers aspects de la physique dans le tunnel de Fréjus. À l'exception de  $i$  tel que  $i^2 = -1$ , les nombres complexes sont soulignés. La notation  $\bar{z}$  désigne le nombre complexe conjugué de  $z$ . Les vecteurs seront traditionnellement surmontés d'une flèche, par exemple  $\vec{j}$  pour un flux surfacique ; sauf s'ils sont unitaires et seront alors surmontés d'un chapeau, par exemple  $\hat{e}_z$  tel que  $\|\hat{e}_z\| = 1$ . Pour les applications numériques on utilisera 3 chiffres significatifs.

## 4.1 Température dans le tunnel de Fréjus

Le tunnel routier du Fréjus relie la vallée de l'Arc, en France, au val de Suse, en Italie. Long d'environ 13 km, le tunnel passe sous le col du Fréjus dans les Alpes cottiennes. La pointe Fréjus culmine à une altitude de 2934 m.

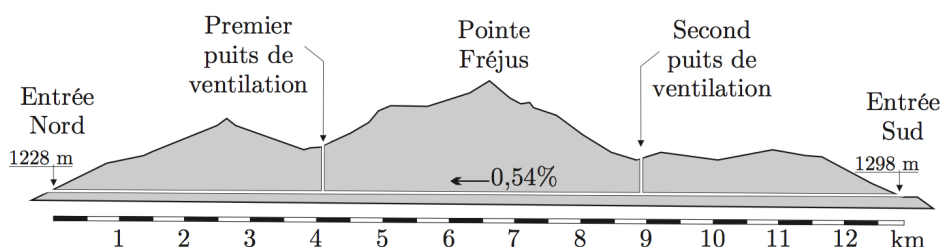


Fig. 4.1 – Tunnel de Fréjus

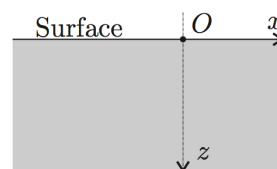


Fig. 4.2 – Sol

La roche environnante dans le tunnel a une température constante tout au long de l'année d'environ 30 °C. Dans un premier temps nous étudierons les évolutions saisonnières de la température dans le sol. Puis nous tenterons d'expliquer cette température élevée par un modèle géophysique.

### 4.1.1 Évolution saisonnière de la température dans le sol

On se place au sommet de la pointe de Fréjus à une altitude de 2934 m. On assimile la roche à un milieu semi-infini de conductivité thermique  $\kappa$ , de masse volumique  $\rho_s$  et de capacité thermique massique  $c_s$ . Sa surface est plane et horizontale et est soumise à la variation de température extérieure  $T(z = 0, t) = \theta_0 + T_0 \cos(\omega t)$  avec  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ . (Voir figure 4.2).

38. Calculer la moyenne temporelle de la température extérieure en  $z = 0$ . Calculer la température maximale et minimale. Proposer une valeur numérique  $T_0$  pour les évolutions annuelles de température.
39. Le flux thermique élémentaire, défini comme la quantité d'énergie traversant une surface élémentaire  $dS$  pendant  $dt$ , est noté  $d\varphi_Q$ . Rappeler la définition du vecteur  $\vec{j}_Q$ , densité de flux thermique. Quelle est sa dimension ?
40. Rappeler la loi de FOURIER, ainsi que ses conditions d'application. En déduire les dimensions de la conductivité thermique  $\kappa$ .
41. On étudie une tranche mésoscopique de sol comprise entre  $z$  et  $z + dz$  de surface  $S$ . Quelle est l'énergie thermique  $\delta Q$  reçue par cette tranche entre  $t$  et  $t + dt$  ?
42. Pourquoi étudie-t-on une tranche « mésoscopique » ?
43. Établir l'expression de sa variation d'énergie interne  $dU$  en fonction de  $\frac{\partial j_Q}{\partial z}$  et  $S$  puis en fonction

de  $\rho_s$ ,  $c_s$ ,  $S$  et  $\frac{\partial T}{\partial t}$ .

44. En déduire l'équation de la chaleur à une dimension  $\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}$  dans laquelle on précisera l'expression et la dimension du coefficient  $D$  de diffusion thermique.

On cherche des solutions de la forme  $T(z,t) = \theta_0 + T_0 e^{i(\omega t - \underline{k}z)}$  vérifiant la condition aux limites  $T(z=0, t) = \theta_0 + T_0 \cos(\omega t)$ .

45. Interpréter cette forme de solution. Déterminer la relation de dispersion correspondante [*NDLR : une relation de dispersion est une relation entre la pulsation  $\omega$  et le vecteur d'onde  $k$  d'une onde monochromatique*]. En déduire l'expression de  $\underline{k}$  qu'on mettra sous la forme  $\underline{k} = k' + ik''$  avec  $k' > 0$ . Déterminer l'expression correspondante de la solution réelle  $T(z, t)$ . Quelle est la signification physique de  $k'$  et  $k''$  ?
46. Calculer la profondeur  $z_e$  à partir de laquelle les oscillations annuelles de température ne s'écartent pas de  $\theta_0$  de plus de 1 %. Que peut-on dire de la température dans le tunnel routier de Fréjus ? Pour les roches granitiques constituant le Fréjus on donne  $\rho_s = 2,65 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $c_s = 8,50 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  et  $\kappa = 3,00 \text{ SI}$ . Que peut-on dire des variations quotidiennes de la température à la profondeur  $z_e$  ? En terme de filtrage fréquentiel, comment se comporte le sol ?

## 5.1 Étude de la patinoire

### 5.1.1 Étude d'un fluide réfrigérant

#### Document 7 – l'éthylène glycol

L'éthylène glycol est surtout utilisé comme composé antigel ou liquide de transfert de chaleur que ce soit pour les radiateurs d'automobiles, les systèmes de refroidissement tels que les tapis glaciers ou le dégivrage des avions. L'éthylène glycol est un liquide incolore, inodore et relativement peu volatil. Il est complètement miscible avec l'eau.

L'éthylène glycol présent dans l'environnement est issu principalement de sources anthropiques. Les rejets d'éthylène glycol les plus importants dans l'environnement proviennent des opérations de dégivrage des avions qui tombent sur le sol et atteignent éventuellement le milieu aquatique. D'autres sources de rejets dans l'eau sont les industries de pâtes et papiers et de l'acier. Les rejets dans l'atmosphère se produisent lors de la production de l'éthylène glycol, pendant le traitement du gaz naturel et lors de la fabrication des peintures et revêtements. L'éthylène glycol est également injecté sous terre pour en disposer après les opérations de traitement du gaz naturel. Une fois dans l'environnement, l'éthylène glycol se disperse surtout dans les eaux de surface et souterraines. Il ne se bioaccumule pas et ne persiste pas dans le milieu, surtout à cause de la biodégradation. On estime sa demi-vie dans l'air, l'eau, les eaux souterraines et le sol habituellement de 0,35 à 3,5 jours, de 2 à 12 jours, de 4 à 24 jours et de 2 à 12 jours, respectivement, mais ces plages peuvent être dépassées selon les conditions du milieu. L'éthylène glycol se biodégrade rapidement dans le milieu aquatique et peut donc contribuer à l'appauvrissement en oxygène dissous des eaux réceptrices.

*Extrait de la loi canadienne sur la protection de l'environnement. Liste des substances d'intérêt prioritaire  
- État de la science pour l'éthylène glycol (2000)*

#### Données 2 :

Enthalpies standard de formation  $\Delta_f H^\circ$  de différentes espèces chimiques (supposées indépendantes de la température et de la pression) :

Espèce chimique	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_{(\text{g})}$ <sup>a</sup>	$\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_{2(\text{g})}$	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_{2(\text{l})}$ ,
$\Delta_f H^\circ$ (kJ · mol <sup>-1</sup> )	-51,0	-285	-392	-460

Relation de VAN'T HOFF :

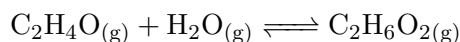
$$\frac{d \ln K^\circ}{dT} = \frac{\Delta_r H^\circ}{RT^2}$$

avec  $K^\circ$  la constante d'équilibre,  $R$  la constante des gaz parfaits ( $R = 8,3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $T$  la température (en K) et  $\Delta_r H^\circ$  l'enthalpie standard de réaction (en J · mol<sup>-1</sup>).

<sup>a</sup>. Oxyde d'éthylène

L'éthylène glycol (formule brute  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ ) s'obtient traditionnellement par hydrolyse de l'oxyde

d'éthylène (formule brute  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ ) en présence d'un grand excès d'eau selon la réaction :



Cette réaction est catalysée. Elle s'effectue à la température  $T_1 = 400 \text{ K}$  et sous une pression  $P = 15,0 \text{ bar}$ . Le rendement de cette réaction peut atteindre 90 %. À  $T_1 = 400 \text{ K}$ , la constante d'équilibre associée à cette réaction est  $K_1^\circ = 2,0 \times 10^4$ .

1. Quel est le milieu naturel le plus susceptible de subir les effets de l'éthylène glycol ?
2. Calculer l'enthalpie standard de cette réaction.
3. Cette réaction est-elle endothermique ou exothermique ?
4. On réalise cette réaction à une température  $T_2$  supérieure à  $T_1$ . Déterminer l'expression de la nouvelle constante d'équilibre notée  $K_2^\circ$  en fonction de  $K_1^\circ$ , des températures  $T_1$  et  $T_2$ , de l'enthalpie standard de réaction et de la constante des gaz parfaits.
5. Pour la synthèse de l'éthylène glycol, les industriels ont choisi :
  - de fixer la température à  $T_1 = 400 \text{ K}$  ;
  - de fixer la pression à  $P = 15,0 \text{ bar}$  ;
  - d'ajouter un catalyseur ;
  - de travailler en présence d'un grand excès d'eau.

Analyser et discuter ces quatre choix faits par les industriels pour la synthèse de l'éthylène glycol.

## 6.1 Chlore et eau de Javel

### 6.1.1 Classification périodique des éléments

6. À quelle période et quelle colonne appartiennent les éléments  $^{23}_{11}\text{Na}$  et  $^{35,5}_{17}\text{Cl}$  ?  
Préciser la configuration électronique du chlore dans son état fondamental.
7. À quelle famille ou groupe appartient le sodium ? Le chlore ? Citer deux autres éléments appartenant à la même famille que le chlore.

### 6.1.2 Solubilité du chlorure de sodium en solution aqueuse

On appelle solubilité d'une espèce la quantité maximale de cette espèce initialement solide qu'on peut dissoudre dans un litre d'eau. Cette quantité est maximale lorsqu'il reste à l'équilibre une partie du solide non dissoute. La solubilité est notée  $s$  et s'exprime usuellement en  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

On se propose de déterminer expérimentalement la solubilité du chlorure de sodium en solution aqueuse à température ambiante.

Dans un bécher contenant 100 mL d'eau, on ajoute environ 60 g de chlorure de sodium. Bien qu'on agite suffisamment longtemps, il reste une partie du solide qui ne s'est pas dissout. On filtre et on récupère le filtrat qu'on dilue au millièmes. La mesure de la conductance de cette solution diluée donne  $G = 780 \mu\text{S}$ .

On a réalisé par ailleurs la courbe d'étalonnage  $G = f(C)$  pour différentes solutions de chlorure de sodium (figure 6.1), avec  $C$  la concentration exprimée en  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

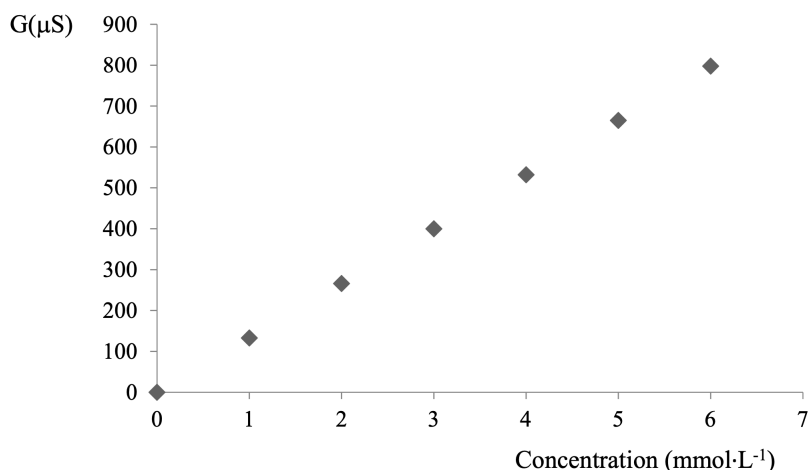


Fig. 6.1 – Courbe d'étalonnage

8. De quoi dépend la conductivité électrique d'une solution ? Laquelle des deux cellules  $A$  ou  $B$ , photographiée (figure 6.2) est associée au conductimètre ? À quel type de mesure peut servir l'autre cellule ?



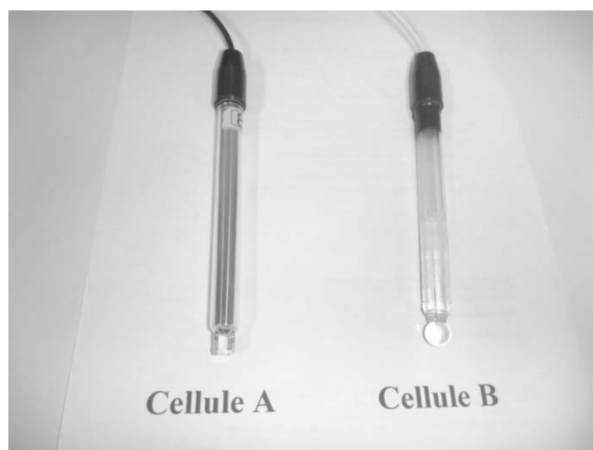


Fig. 6.2 – Cellules

9. Déterminer la solubilité  $s$  du chlorure de sodium à température ambiante.

### 6.1.3 Diagramme potentiel-pH (E-pH) du chlore et de l'iode

Les espèces prises en compte dans les diagrammes E-pH du chlore et de l'iode (figure 6.3) sont respectivement  $\text{HClO}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{ClO}^-$ ,  $\text{Cl}_{2(\text{aq})}$  et  $\text{I}_{2(\text{aq})}$ ,  $\text{IO}_3^-$ ,  $\text{I}^-$ .

Ces diagrammes sont construits pour une concentration totale en espèce dissoute de  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

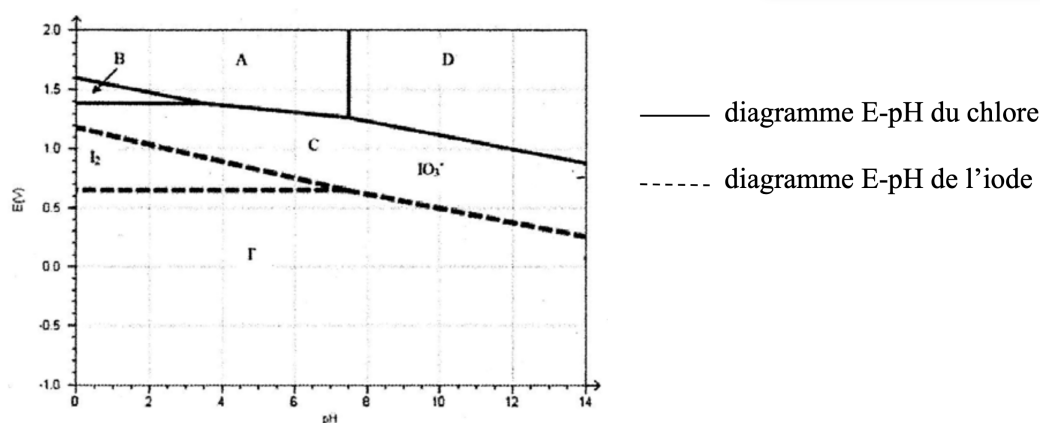


Fig. 6.3 – Diagrammes E-pH du chlore et de l'iode

10. Préciser le nombre d'oxydation du chlore dans chacune des espèces considérées. Associer à chacun des domaines ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ) une espèce chimique du chlore.

### 6.1.4 Dosage d'une eau de Javel

Une eau de Javel est une solution basique supposée équimolaire de  $\text{Cl}^-$  et de  $\text{ClO}^-$ . On désire vérifier, à l'aide d'un dosage, la concentration  $C_0$  en  $\text{ClO}^-$  ou  $\text{Cl}^-$  d'un produit commercial.

### Rappels

On rappelle que le diiode est soluble dans l'eau en présence d'une quantité suffisante d'iodure de potassium et prend alors une couleur jaune brunâtre. Il forme en présence d'empois d'amidon un complexe de couleur bleue.

Attention, le dichlore gazeux est un produit dangereux.

---

**Protocole**

---

Étape 1 : on dilue d'un facteur 100 le produit commercial. On prélève ensuite un volume  $V_{\text{init}}$  de solution diluée.

Étape 2 : on ajoute de l'iodure de potassium ( $\text{K}^+, \text{I}^-$ ) en excès.

Étape 3 : on acidifie la solution en ajoutant quelques gouttes d'une solution d'acide chlorhydrique concentrée. La solution prend alors une couleur jaune brunâtre.

Étape 4 : on ajoute une faible quantité d'empois d'amidon pour que le dosage ne soit pas perturbé. La solution est alors de couleur bleue intense.

Étape 5 : on dose alors la solution par une solution de thiosulfate de sodium ( $2\text{Na}^+, \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ) de concentration connue  $C_1$ . On note  $V_{\text{eq}}$  le volume de thiosulfate versé à l'équivalence, repéré par le changement de couleur.

11. Écrire l'équation bilan de la réaction chimique qui s'est produite lors de l'étape 2. Pourquoi faut-il mettre de l'iodure de potassium en excès ?
12. Écrire l'équation bilan de la réaction chimique qui s'est produite lors de l'étape 3. Quel nom porte cette équation d'oxydo-réduction ?
13. Pourquoi ne fallait-il pas acidifier la solution avant l'ajout de l'iodure de potassium ?
14. Écrire l'équation bilan de la réaction qui a lieu avec le thiosulfate de sodium.
15. Déterminer la concentration  $C_0$  en fonction de  $V_{\text{init}}$ ,  $V_{\text{eq}}$  et  $C_1$ .