

Physique : DS2

La présentation, la lisibilité, l'orthographe, la **qualité de la rédaction**, la clarté et la précision des raisonnements entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats littéraux, et à souligner les applications numériques.

On respectera les numéros des questions dans sa copie : 1,2 ou Q1,Q2 ou II-1-1...

PARTIE A – IGLOO

Les habitants des régions polaires savent qu'un abri constitué de neige (quinzee, hutte, abri sous arbre, trou à neige, igloo, etc.) offre un rempart efficace contre le froid. Nous allons nous intéresser ici au cas de l'igloo (**figure 1**).



Figure 1 - Igloo

Partie I - Généralités

On considère un matériau solide de section S , de longueur L , calorifugé latéralement et placé au contact parfait de deux sources de températures constantes T_1 et T_2 (**figure 2**). On note $T(x,t)$ la température d'une section d'abscisse x du matériau.

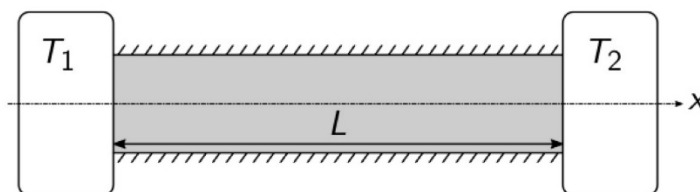


Figure 2 - Matériau au contact de deux sources

Le matériau est caractérisé par sa masse volumique ρ , sa capacité thermique massique c et sa conductivité thermique λ .

I.1 - Régime variable

Q1. Donner une interprétation physique à la loi de Fourier exprimant le vecteur densité volumique de courant thermique selon :

$$\vec{j}_{\text{th}} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T).$$

Q2. Montrer, à l'aide d'un bilan thermique infinitésimal unidimensionnel, que la température satisfait à l'équation différentielle :

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

Q3. Déterminer l'unité de la grandeur $\tau = \frac{\rho c L^2}{\lambda}$ et préciser sa signification concrète.

Q4. Le phénomène de diffusion thermique peut-il être un processus réversible ? Justifier.

I.2 - Régime stationnaire

On se place en régime stationnaire. On note $\Phi_{12} = \iint_S \vec{j}_{\text{th}} \cdot \vec{dS}$ le flux thermique traversant la section S du solide, de la zone de température T_1 vers celle de température T_2 . On appelle résistance thermique conductive R_{th} la grandeur satisfaisant la loi d'Ohm thermique :

$$T_1 - T_2 = R_{\text{th}} \Phi_{12}.$$

Q5. Donner l'équation différentielle satisfaite par la température en régime stationnaire et en déduire l'expression de $T(x)$ en fonction de x , T_1 , T_2 et de L .

Q6. Déterminer l'expression littérale de Φ_{12} . Que constate-t-on ?

Q7. Montrer que la résistance thermique conductive du matériau vaut $R_{\text{th}} = \frac{L}{\lambda S}$.

On souhaite faire une analogie entre les grandeurs électrocinétique et thermique en régime stationnaire. On note V le potentiel électrique et R la résistance électrique.

Q8. Reproduire le tableau suivant et le compléter en définissant, si nécessaire, les grandeurs non mentionnées par l'énoncé.

Électrocinétique	Thermique
$V_1 - V_2$	
R	
	Φ_{12}
	λ

Lorsqu'un solide de température de surface T_s et un fluide, dont la température loin du solide est notée T_f , sont en contact par le biais d'une surface d'aire S' , on observe un transfert thermique entre le solide et le fluide. Le flux thermique résultant suit la loi de Newton du transfert conducto-convectif $\Phi_{\text{sf}} = h(T_s - T_f)S'$, où h est appelé coefficient de transfert conducto-convectif.

Q9. Montrer que la résistance conducto-convective associée à la loi de Newton s'écrit :

$$R_{\text{cc}} = \frac{1}{hS'}.$$

Partie II - Bilan thermique d'un igloo

On modélise un igloo par un hémisphère (une demi-sphère) creux de rayon intérieur $r_i = 1,5 \text{ m}$, fabriqué à partir de blocs de neige de conductivité thermique λ et d'épaisseur supposée constante et égale à $L = 30 \text{ cm}$ (**figure 3**).

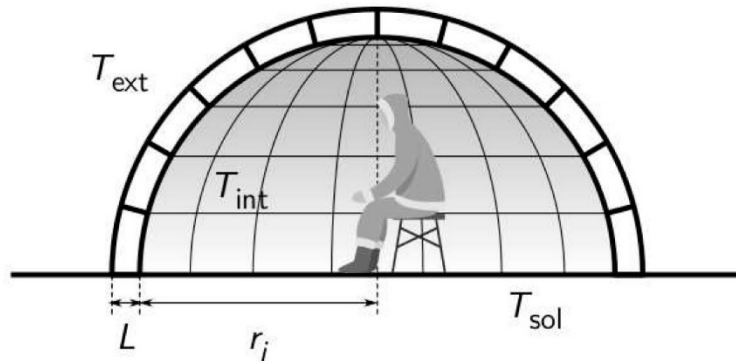


Figure 3 - Vue de l'igloo en coupe

II.1 - Résistance conductive de l'igloo

Une étude expérimentale (**figure 4**) a permis de mesurer la conductivité thermique λ de la neige en fonction de sa masse volumique ρ .

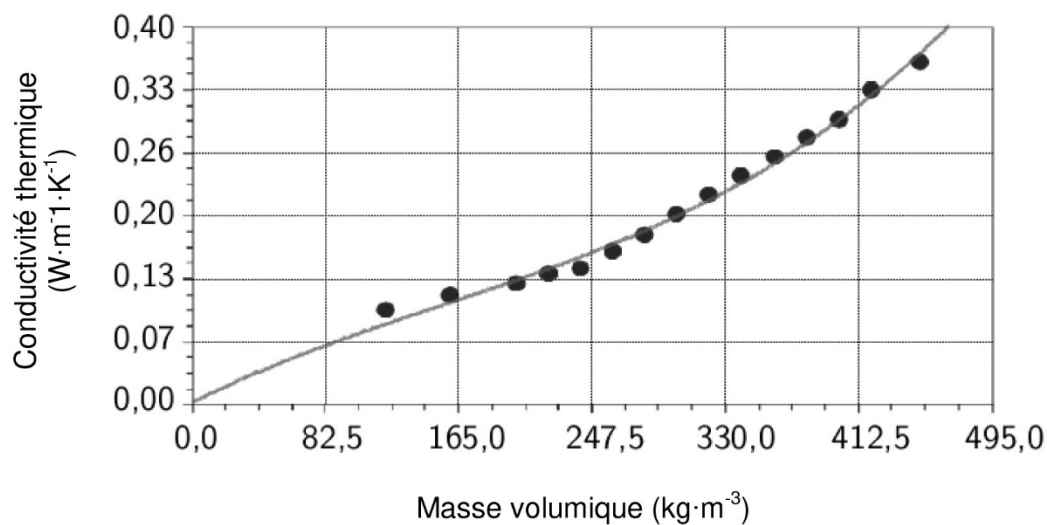


Figure 4 - Conductivité thermique de la neige en fonction de la masse volumique

On note R_{th} la résistance thermique conductive de l'igloo dont l'expression, admise, en géométrie sphérique est :

$$R_{\text{th}} = \frac{L}{2\pi\lambda r_i (r_i + L)}.$$

Q10. À partir de la **figure 4**, préciser si le fait de bien tasser les blocs de neige améliore ou non l'isolation de l'igloo.

Q11. Pour une neige de masse volumique $\rho = 20 \cdot 10^1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, estimer la valeur de la conductivité thermique correspondante et calculer la résistance thermique R_{th} .

II.2 - Prise en compte de la conducto-convection

La circulation de l'air provoque de la conducto-convection que l'on prend en compte par le biais de résistances conducto-convectives intérieure $R_{cc,int} = \frac{1}{h_i S_i}$ et extérieure $R_{cc,ext} = \frac{1}{h_e S_e}$. Dans ces expressions, h_i et h_e sont les coefficients de transfert conducto-convectifs intérieur et extérieur tandis que S_i et S_e correspondent aux surfaces intérieure et extérieure de l'igloo. On envisage deux modèles d'association des résistances thermiques précédentes, en parallèle ou en série (**figure 5**).

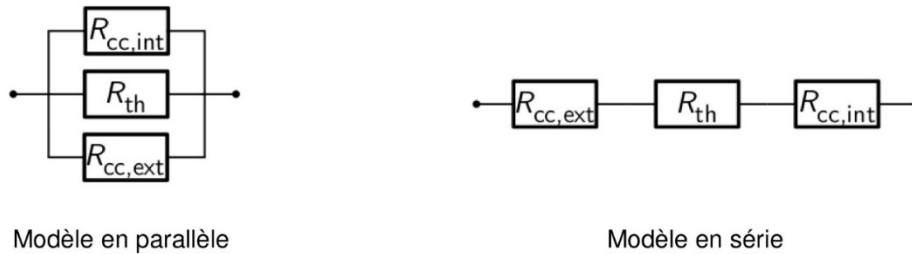


Figure 5 - Circuits équivalents

- Q12.** Préciser, en justifiant votre choix, quel modèle convient.
- Q13.** Déterminer, pour le modèle choisi, l'expression littérale de la résistance thermique équivalente R_{igloo} en fonction de λ , h_e , h_i , L et de r_i .
- Q14.** Cette modélisation ne tient pas compte d'un autre mode de transfert thermique. De quel mode s'agit-il ? Si l'on souhaitait en tenir compte, la résistance thermique associée devrait-elle être placée en série ou en parallèle de celles de conducto-convection ?

II.3 - Température intérieure de l'igloo

Pour étudier le comportement thermique de l'igloo, on propose un modèle électrique analogue représenté sur la **figure 6**. Ce modèle tient compte du sol sur lequel repose l'igloo et de la puissance thermique dégagée par ses occupants. On note T_{sol} la température du sol, R_{sol} sa résistance thermique et P la puissance thermique dégagée par les occupants de l'igloo qui, du point de vue électrique, est analogue à un générateur de courant. La représentation électrique de l'ensemble est donnée sur la **figure 6**.

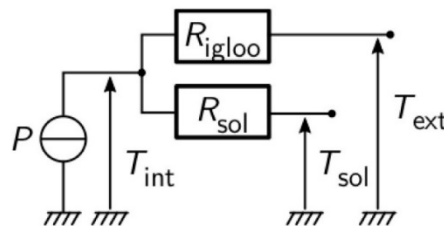


Figure 6 - Modèle électrique complet de l'igloo

- Q15.** Montrer que la température intérieure de l'igloo vaut :

$$T_{int} = \frac{PR_{igloo}R_{sol} + T_{ext}R_{sol} + T_{sol}R_{igloo}}{R_{igloo} + R_{sol}}$$

Les personnes se trouvant à l'intérieur de l'igloo dégagent une puissance thermique $P = 30 \cdot 10^1 \text{ W}$. La température extérieure vaut $T_{ext} = -40^\circ\text{C}$, celle du sol vaut $T_{sol} = -20^\circ\text{C}$ et les résistances thermiques valent $R_{igloo} = 0,15 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ et $R_{sol} = 1,3 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

- Q16.** Calculer la température intérieure T_{int} de l'igloo.
- Q17.** On peut lire sur la page Wikipedia consacrée aux igloos que « Dans certains igloos, notamment ceux près du détroit de Davis, l'intérieur est quadrillé de peaux de bêtes : cela permet d'augmenter la température de presque 20°C . » Sachant que, lorsque les parois intérieures de l'igloo sont recouvertes de peaux, la résistance thermique de l'igloo augmente de moitié, estimer la nouvelle température intérieure et conclure.

PARTIE B – CLARIFICATION PAR DECANTATION ET TURBINE A GAZ

La clarification par décantation est une des étapes réalisées dans le traitement des eaux des stations d'épuration. Elle consiste à éliminer les particules polluantes en suspension dans l'eau polluée.

L'eau polluée, c'est-à-dire chargée en particules non désirées, circule en continu dans le bassin de décantation (**figure 4**), à faible vitesse horizontale \vec{u} . Les particules ont le temps de se déposer au fond du bassin et l'eau de sortie est ainsi clarifiée.

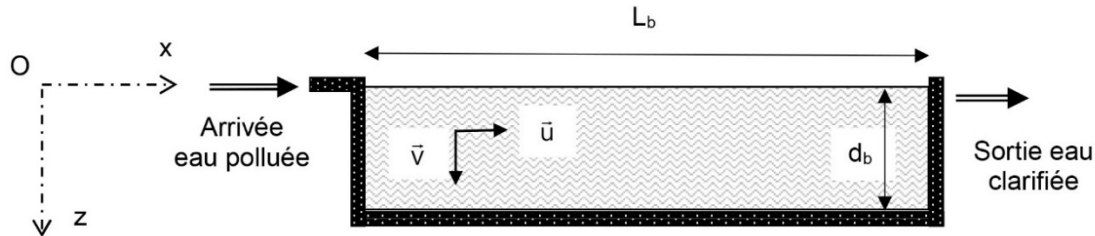


Figure 4 - Bassin de décantation

Le bassin de décantation est de longueur L_b et de profondeur d_b , sa largeur est indifférente. On note respectivement η et ρ_e la viscosité dynamique et la masse volumique de l'eau polluée. η et ρ_e sont supposées constantes.

On définit le repère $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ lié au bassin. L'axe Oz est vertical descendant. Le niveau d'entrée de l'eau dans le bassin correspond à la cote $z = 0$.

On suppose que les particules polluantes sont sphériques, de rayon r , et qu'elles sont soumises à la force de frottement fluide : $\vec{F} = -6\pi\eta r\vec{v}$, où \vec{v} est la vitesse des particules.

On note ρ_0 la masse volumique des particules polluantes, supposée constante. On a : $\rho_0 > \rho_e$.

On considère que l'eau arrive en amont du bassin avec une densité en particules polluantes notée N_0 .

II.1 - Décantation statique

Dans un premier temps, l'eau ne circule pas horizontalement, $\vec{u} = \vec{0}$, et les particules polluantes qu'elle contient chutent verticalement.

Compte tenu des phénomènes de transport des particules polluantes dans le bassin, la densité en particules polluantes n'est pas uniforme sur la hauteur du bassin. Elle dépend de la profondeur z . Dans le bassin, on note $n(z)$ la densité en particules polluantes à l'altitude z et n_0 la valeur associée à l'altitude $z = 0$, soit $n_0 = n(z = 0)$.

Q14. À partir de l'équation différentielle du mouvement, issue de la seconde loi de Newton, établir, en fonction de ρ_0 , ρ_e , r , η et de l'accélération g de la pesanteur, la vitesse limite $\vec{v}_l = v_l \vec{e}_z$ atteinte par ces particules. Quel est le signe de v_l ? Exprimer en fonction de ρ_0 , r et de η , le temps caractéristique τ_c d'établissement de cette vitesse limite.

On supposera par la suite que la constante de temps τ_c est très faible devant le temps de sédimentation (*i.e.* le temps de chute dans le bassin) de sorte que le mouvement des particules est considéré comme uniforme à la vitesse \vec{v}_l .

Q15. Cette chute des particules est à l'origine d'un courant convectif vertical des particules. On note : $\vec{j} = j(z)\vec{e}_z$, le vecteur densité de courant de particules associé. Préciser l'unité de \vec{j} . Puis exprimer le vecteur \vec{j} en fonction de $n(z)$ et de \vec{v}_l .

En plus du courant précédent, on observe l'existence d'un second courant qui résulte d'un phénomène de diffusion. On note D le coefficient de diffusivité des particules dans l'eau et $\vec{j}_D = j_D(z)\vec{e}_z$ le vecteur densité de courant de particules associé à ce second courant.

- Q16.** Rappeler la loi de Fick et préciser les unités des grandeurs qui interviennent. Justifier qualitativement l'existence de ce courant de diffusion. Préciser s'il est ascendant ou descendant.
- Q17.** En régime permanent, ces deux courants se compensent. En déduire, en fonction de n_0 , D et de v_l l'expression de la densité de particules $n(z)$. Représenter graphiquement la fonction $n(z)$ en fonction de z .
- Q18.** Par conservation du nombre de particules sur une tranche verticale du bassin, exprimer n_0 en fonction de N_0 , D , d_b et de v_l .
- Q19.** Définir en fonction de d_b , D et de v_l , un temps caractéristique τ_s de sédimentation, ainsi qu'un temps caractéristique τ_D de diffusion des particules sur la hauteur du bassin.
- Q20.** Exprimer n_0 en fonction de N_0 , τ_s et de τ_D . À quelle condition portant sur τ_s et τ_D , la décantation statique permet-elle une clarification de l'eau ?

II.2 - Clarification dynamique de l'eau polluée

Dans un second temps, l'eau polluée est mise en mouvement et s'écoule avec une vitesse horizontale constante \bar{u} . Un aspirateur situé au fond du bassin aspire maintenant les particules polluantes.

Un modèle simple considère que le mouvement des particules polluantes est la combinaison d'un mouvement horizontal de vitesse \bar{u} dû à l'entraînement de l'eau et d'un mouvement vertical de chute à la vitesse constante \bar{v}_l déterminée précédemment dans l'étude de la décantation statique. L'eau sera clarifiée si les particules polluantes introduites à l'entrée du bassin ont le temps de tomber au fond avant que l'eau d'entraînement, injectée à l'entrée du bassin en $x = 0$, ne soit parvenue à l'autre extrémité de sortie du bassin, située en $x = L_b$.

- Q21.** Définir en fonction de L_b et de u , un temps de traversée τ_T du bassin. À quelle condition, portant sur τ_T et τ_s , la clarification dynamique est-elle efficace ?

Ce qui suit, est la suite du sujet sans les questions d'électromagnétisme.

Le biogaz provient principalement de la fermentation anaérobie, c'est-à-dire sans oxygène, des déchets de l'agriculture, de l'industrie alimentaire et des ordures ménagères. À l'état brut, sa teneur en méthane est un peu supérieure à 50 %. Après une épuration poussée, il atteint le même niveau de qualité que le gaz naturel et porte alors le nom de bio-méthane (CH_4). Il peut être valorisé par la production d'énergie électrique. Il est considéré comme une énergie renouvelable à part entière depuis plus de dix ans et sa combustion libère moins de CO_2 que celle du fuel ($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$).

- Q28.** Justifier, à l'aide des données thermodynamiques fournies en fin d'énoncé, que pour une même production d'énergie, la combustion du méthane libère moins de CO_2 que celle du fuel.

Étude d'une installation motrice avec turbine à gaz

On étudie ici une installation motrice dont le principe de fonctionnement est décrit sur la **figure 6**.

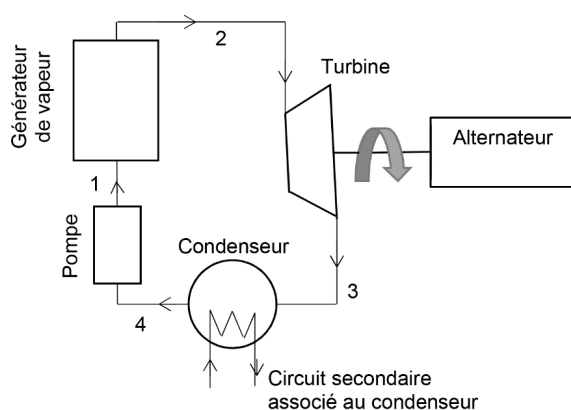


Figure 6 - Installation motrice

Elle fonctionne en régime permanent suivant un cycle de Hirn. Le fluide utilisé est de l'eau. La pompe alimente le générateur de vapeur en liquide haute pression (point 1), on a $P_1 = 10$ bars. Le liquide est porté à ébullition, puis totalement vaporisé, et enfin surchauffé de façon isobare par le brûleur au bio-méthane (point 2). La vapeur surchauffée se détend ensuite dans la turbine accouplée à un alternateur électrique (point 3). Au point 3, on a $P_3 = 1$ bar, la vapeur est sous forme de vapeur saturante de titre massique en vapeur $x_v = 1$. La vapeur humide basse pression est totalement condensée, puis le liquide (point 4) est réintroduit dans la pompe. Un circuit secondaire, associé au condenseur et relié à une tour de refroidissement ou autre, permet d'extraire l'énergie issue du condenseur par transfert thermique.

Hypothèses :

- l'évolution dans la turbine est adiabatique et réversible ;
- l'évolution dans la pompe est supposée isenthalpique ;
- dans les bilans énergétiques, les variations d'énergie cinétique et potentielle du fluide seront négligées par rapport aux termes enthalpiques ;
- on néglige les pertes mécaniques de la turbine et le rendement de l'alternateur est considéré égal à 100 % ;
- l'état du fluide reste inchangé dans les canalisations de liaison entre les différents éléments.

Q29. Reproduire sommairement sur votre copie l'allure du diagramme $\log(P)$ - h de l'eau fourni en fin de sujet, en veillant à retranscrire au mieux la courbe de saturation et y superposer l'allure du cycle étudié. Reproduire et compléter le **tableau 1** sur votre copie.

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
T (°C)	≈ 100			100
P (bar)	10	10	1	1
h (kJ·kg ⁻¹)				
État	Liquide	Vapeur sèche	Vapeur saturante ($x_v = 1$)	Liquide saturé ($x_v = 0$)

Tableau 1 - Grandeurs thermodynamiques de l'eau dans le cycle de la **figure 6**

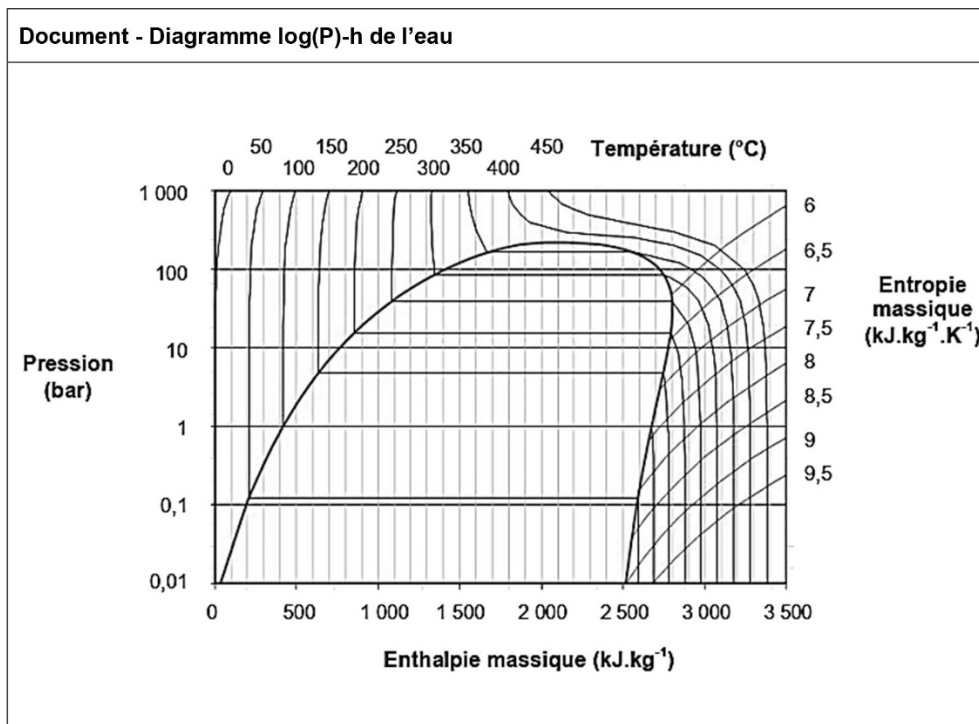
Q30. Exprimer en fonction des enthalpies massiques aux points 1, 2, 3 et 4 :

- le travail utile massique de la turbine (w_{iT}). Ce travail est parfois dénommé travail indiqué massique ;
- le transfert thermique massique (q_{GV}) fourni par le générateur de vapeur ;
- le transfert thermique massique (q_{Cond}) récupéré par le circuit secondaire associé au condenseur.

Évaluer numériquement w_{iT} , q_{GV} et q_{Cond} .

Exprimer le rendement de l'installation en fonction des différentes enthalpies massiques.

Q31. Évaluer le débit massique en eau du circuit primaire, noté D_{m1} , pour une production d'électricité d'une puissance $P_{elec} \approx 250$ kW.

**Données**

Potentiels standard d'oxydoréduction à 298 K :	Pouvoir calorifique (énergie thermique libérée lors de la combustion d'une mole de carburant) :
$E^\circ(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}/\text{Cr}^{3+}) = 1,33 \text{ V}$	méthane : $803 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
$E^\circ(\text{SO}_4^{2-}/\text{HSO}_3^-) = 0,17 \text{ V}$	fuel : $7\,600 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
$E^\circ(\text{CNO}^-/\text{CN}^-) = -0,13 \text{ V}$	
$E^\circ(\text{Au}(\text{CN})_2^-/\text{Au}_{(s)}) = -0,6 \text{ V}$	
Unité de surface : 1 hectare = 10^4 m^2	Formules trigonométriques :
Perméabilité magnétique de l'air assimilé au vide : $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$	$\cos(a + b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$
	$\cos(a - b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b$

Partie C - Machine à écoulement permanent

Ce sujet traite de deux problèmes relatifs à des écoulements permanents de fluides, sous les aspects dynamique et thermodynamique. L'énoncé de cette épreuve comporte donc deux parties I et II, qui sont totalement indépendantes et peuvent être traitées séparément.

I. — Dimensionnement d'une installation de liquéfaction

Dans ce problème, on se propose de dimensionner une installation de production en continu de diazote N_2 liquide, fonctionnant en régime permanent (procédé LINDE). Le schéma de principe de l'installation est proposé sur la figure 1. Le problème débute par une description complète de l'installation ; les réponses aux questions exigent la prise en compte de *l'ensemble des données* décrivant l'installation ainsi que du diagramme enthalpique du diazote fourni en annexe.

Du diazote gazeux entre en continu dans la machine avec un débit massique \mathcal{D}_m , dans les conditions $p_E = 1 \text{ bar}$, $T_E = 300 \text{ K}$. Il atteint un mélangeur où on le mélange avec du diazote gazeux de débit \mathcal{D}' dans les mêmes conditions p_E, T_E . En sortie du mélangeur (M), le débit massique de diazote gazeux est donc $\mathcal{D} = \mathcal{D}_m + \mathcal{D}'$, toujours dans les conditions (p_E, T_E) .

Après passage par le mélangeur, le diazote traverse une série d'étages de compression ; chacun de ces étages est constitué d'un *compresseur adiabatique* (C) suivi d'un *réfrigérant isobare* (R) à circulation d'eau froide ; en sortie du réfrigérant, le diazote gazeux est ramené à une température de sortie égale à T_E .

Les N étages compresseur-réfrigérant sont identiques ; ainsi le rapport de compression $r = \frac{p_{\text{sortie}}}{p_{\text{entrée}}}$ est le même pour chacun des N compresseurs. Après la traversée du dispositif, le diazote atteint donc le point A à la pression $p_A = r^N p_E = 100 \text{ bar}$, à la température $T_A = T_E = 300 \text{ K}$.

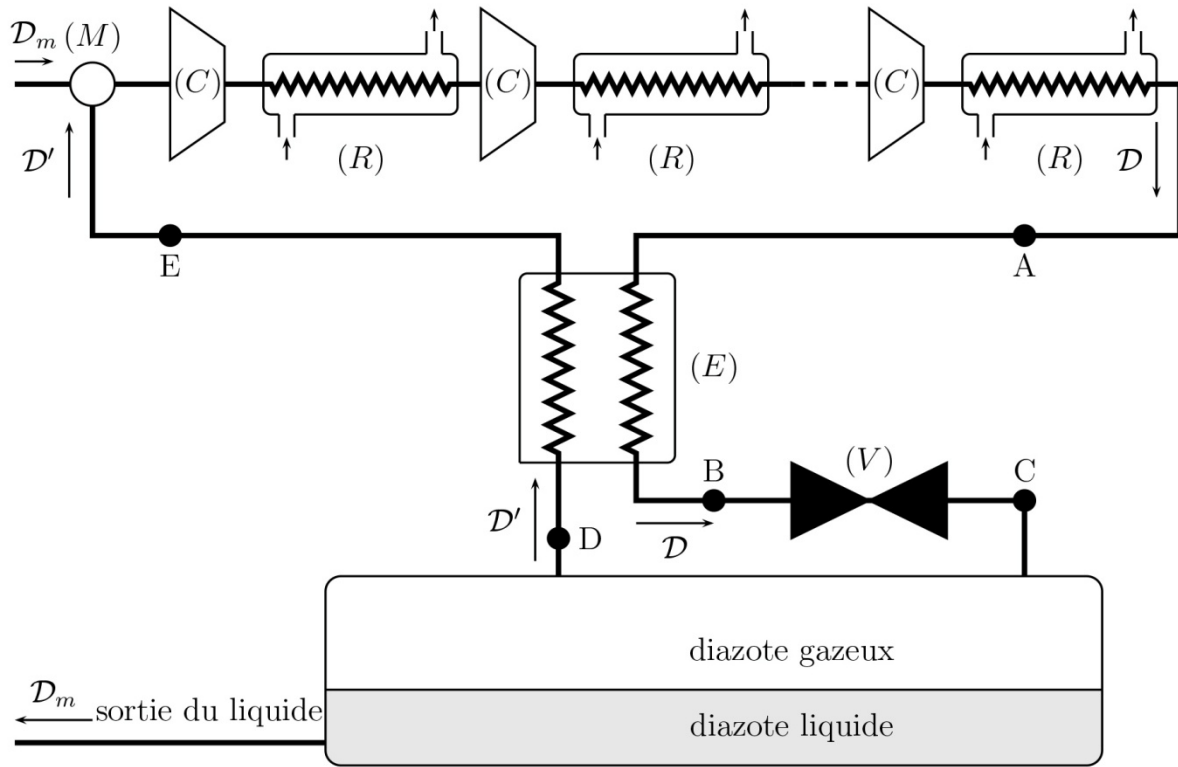


FIGURE 1 – Schéma de principe d'une installation de liquéfaction de diazote

L'eau liquide utilisée dans chacun des réfrigérants circule à la pression constante de 1 bar ; la température de l'eau à l'entrée du dispositif de refroidissement est $T_e = 280 \text{ K}$. On note $c_e = 4,19 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ la capacité thermique massique de l'eau liquide, considérée comme une constante.

Le diazote gazeux aborde entre A et B un échangeur thermique à contre-courant le long duquel il subit un refroidissement isobare ; à sa sortie, le fluide est dans l'état $p_B = p_A = 100 \text{ bar}$, T_B . Ce refroidissement est suivi d'une détente isenthalpique dans une vanne de détente (V).

À la sortie du robinet, le diazote est au point C : c'est un mélange liquide-vapeur dont la fraction massique de liquide est notée x , à la pression atmosphérique $p_C = p_E = 1 \text{ bar}$, et à la température $T_C = T_{\text{éb}}(p_C) = 77 \text{ K}$. À cette température, la densité du diazote liquide est $d = 0,81$.

La fraction massique x de diazote liquéfié est faible, on extrait seulement du réservoir un débit massique modeste \mathcal{D}_m de diazote liquide dans les conditions (p_C, T_C) ; le diazote gazeux recyclé est renvoyé, avec un débit massique \mathcal{D}' , vers l'échangeur (E). Ce courant du diazote gazeux entre dans (E) aux conditions $p_D = 1 \text{ bar}$, $T_D = 77 \text{ K}$.

Dans l'échangeur (E), le diazote se réchauffe à pression constante et arrive au point E dans les conditions $p_E = 1 \text{ bar}$, $T_E = 300 \text{ K}$, avant d'être renvoyé vers le mélangeur.

Pour des raisons techniques, on impose deux limites de fonctionnement :

- la température du diazote ne doit, en aucun point du dispositif, dépasser $T_{\text{max}} = 400 \text{ K}$;
- la température de l'eau de refroidissement ne doit pas dépasser $T'_{\text{max}} = 350 \text{ K}$ en sortie des réfrigérants (R).

Le diazote gazeux est diatomique, sa masse molaire vaut $\mathcal{M} = 28,0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$. On notera h_K son enthalpie massique en un point K du schéma de la figure 1.

La constante molaire des gaz parfaits est $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.

I.A. — Dimensionnement des étages de compression

Dans cette seule partie I.A le diazote est assimilé à un gaz parfait.

- 1 — Que vaut le rapport $\gamma = C_p/C_v$ des capacités thermiques du diazote ? On admet que les compresseurs fonctionnent de manière réversible. Déterminer et calculer la valeur minimale de N compatible avec les exigences décrites ci-dessus. On adoptera cette valeur dans la suite.
- 2 — Si on prenait en compte le caractère irréversible du fonctionnement des compresseurs sans changer la valeur de r , faudrait-il augmenter ou diminuer N ? On justifiera la réponse.
- 3 — On note \mathcal{D}_{eau} le débit massique du courant d'eau liquide circulant dans chaque réfrigérant (R). Déterminer l'expression et calculer la valeur minimale du rapport $\frac{\mathcal{D}_{\text{eau}}}{\mathcal{D}}$ compatible avec les exigences ci-dessus.

I.B. — Diagramme enthalpique du diazote

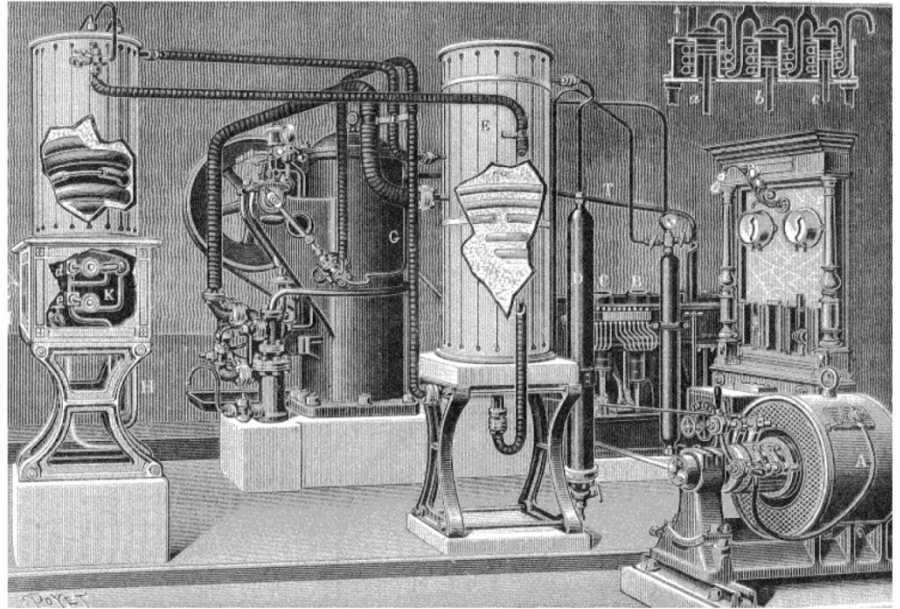
Dans cette partie I.B et la suivante I.C, le diazote n'est plus assimilé à un gaz parfait. La figure 5 fournie en annexe, représente le diagramme enthalpique du diazote sous la forme d'un réseau de courbes.

- 4 — Identifier la grandeur conservée le long de la courbe \mathcal{C}_1 . En justifiant votre réponse, déterminer l'asymptote de cette courbe à basse pression.
- 5 — Identifier la grandeur conservée le long de la courbe \mathcal{C}_2 . Justifier le sens de variation de cette courbe.
- 6 — Identifier et nommer les états possibles du diazote sur la courbe \mathcal{C}_3 .
- 7 — Identifier la grandeur conservée le long de la courbe \mathcal{C}_4 . On considère la transformation amenant le diazote de l'état représenté par le point M_1 à celui représenté par le point M_2 suivant le segment $[M_1M_2]$. Décrire l'état du diazote en M .

I.C. — Dimensionnement de l'échangeur (E)

- 8 — Exprimer h_C en fonction de x et des enthalpies massiques du diazote liquide et gazeux, notées h_{liq} et h_{vap} , dans le réservoir.
- 9 — Le réservoir utilisé en sortie de l'appareil fonctionne aussi en régime permanent ; relier x , \mathcal{D} et \mathcal{D}_m puis x , \mathcal{D}' et \mathcal{D} .
- 10 — Par un bilan que l'on précisera pour le fonctionnement de (E), déterminer x en fonction de h_A , h_E et h_{liq} .
- 11 — En exploitant le diagramme enthalpique du diazote fourni en annexe, déterminer les valeurs de h_A , h_E , h_{liq} et h_{vap} . Évaluer x avec 2 chiffres significatifs. Quelle valeur aurait-on obtenue en considérant que le diazote gazeux vérifie la loi des gaz parfaits ?
- 12 — Reproduire sommairement le diagramme enthalpique du diazote en y faisant figurer la courbe \mathcal{C}_3 et l'isobare à la pression du point B du dispositif. En déduire la valeur de la température et l'état du diazote en ce point.

□ 13 — La production de diazote liquide s'effectue avec un débit $\mathcal{D}_m = 3,0 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Dans le cadre du modèle du gaz parfait, évaluer la puissance mécanique qui est nécessaire au fonctionnement de l'ensemble des N compresseurs (C). Comparer votre résultat à la citation suivante, publiée lors de l'exposition universelle de 1900 : *Nous avons immédiatement décrit le principe de l'appareil de M. le Dr. Carl Linde ; quelques mois plus tard, M. le Dr. d'Arsonval faisait installer dans son laboratoire du Collège de France une petite machine de 3 chevaux destinée à fournir un litre d'air liquide par heure.* L'illustration ci-dessus accompagnait l'article cité.



On notera que $3,0 \text{ hp} \simeq 2,2 \text{ kW}$; hp est le symbole de l'unité « cheval-vapeur ».

Annexe

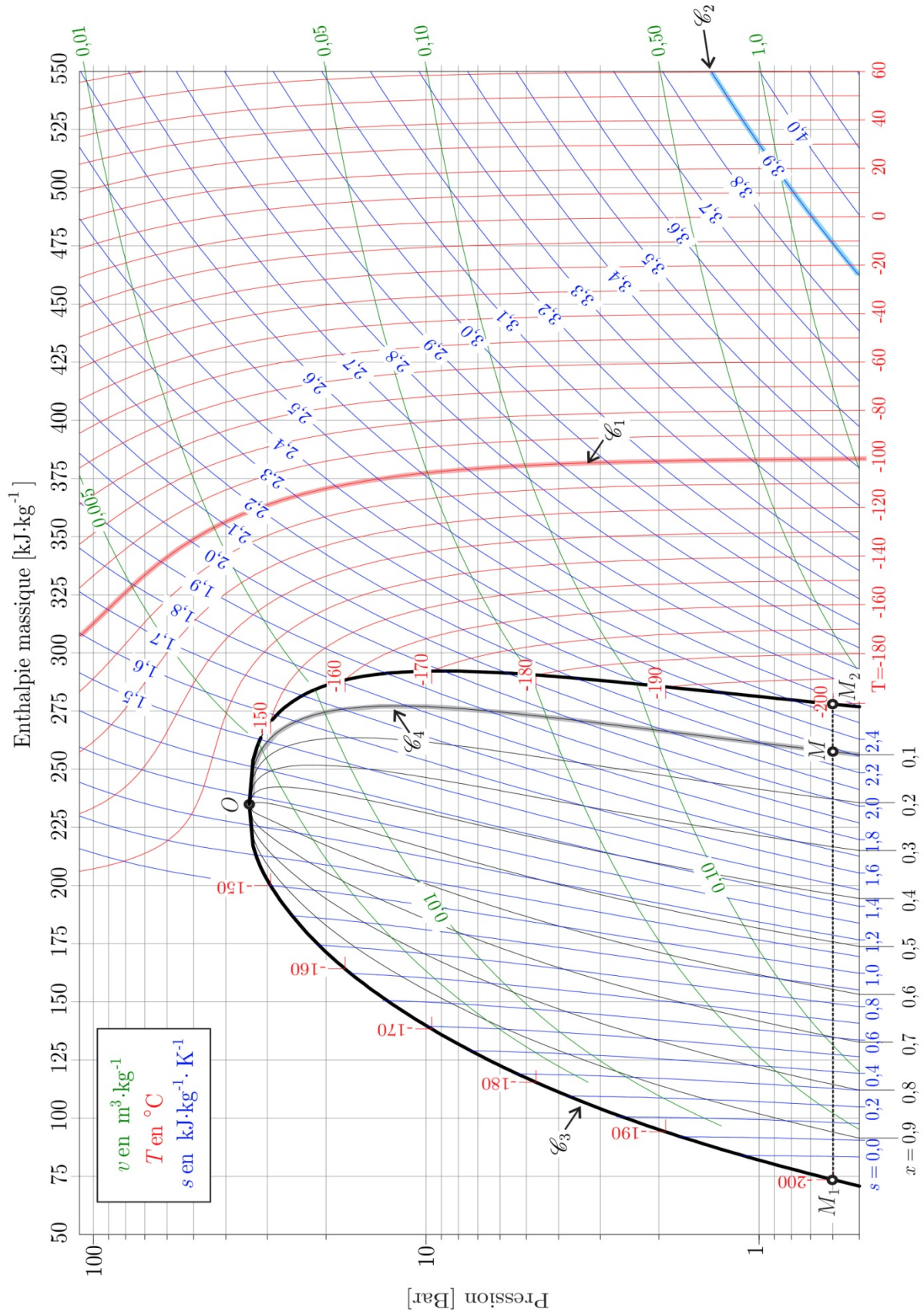


FIGURE 5 – Diagramme enthalpique du diazote