Révisions de thermodynamique

I. **Mélange liquide-glace**

Dans un calorimètre de valeur équivalente en eau $M = 20\ g$, on dispose une quantité d'eau liquide de masse $m_1 = 200\ g$ à la température ambiante $t_1 = 25^0C$ (c'est également la température initiale du calorimètre). On ajoute un glaçon de masse $m_2 = 10\ g$ à la température $t_2 = -5^0C$. Lorsque l'équilibre thermique est réalisé, on mesure la température $t_f = 20,4^0C$. Calculer l'enthalpie de fusion de la glace et l'entropie créée du système liquide-glace-calorimètre.

Données : capacité thermique massique de l'eau liquide $c_l = 4,18\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$, capacité thermique massique de l'eau solide $c_s = 2,1\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$, température de fusion de la glace sous 1 atm: $t_{fus} = 0^0C$ et identité thermodynamique: $dS = \frac{dH}{T} - \frac{VdP}{T}$.

Réponses: $h_{fus} = 330\ kJ.kg^{-1}$, $S_c = 1,2\ J.kg^{-1}$

II. **Etat final dans un calorimètre**

Dans un calorimètre parfaitement calorifugé de capacité thermique $C = 100\ J.K^{-1}$, on verse une masse $m_1 = 190,0\ g$ d'eau liquide à la température $t_1 = 15^0C$. On introduit une masse $m_2 = 80,0\ g$ de glace à la température $t_2 = -20^0C$ et on agite jusqu'à l'obtention d'un équilibre.

1. Calculer m_e, la masse équivalente en eau du calorimètre.

2. Déterminer la température et la composition du système (eau liquide et eau glace) dans l'état final.

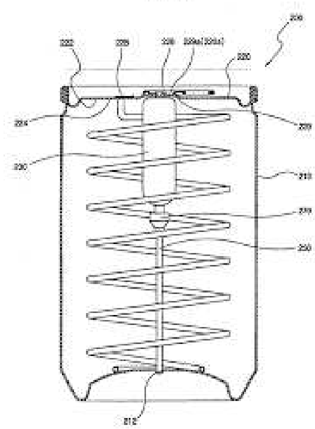
Données : capacité thermique massique de l'eau liquide $c_l = 4,18\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$, capacité thermique massique de l'eau solide $c_s = 2,1\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$, enthalpie massique de fusion de la glace à 0^0C: $h_{fus} = 333\ kJ.kg^{-1}$.

Réponses: 1- $m_{eq} = 24\ g$ *2-* $220\ g$ *de liquide et* $50\ g$ *de glace*

III. **Refroidissement d'une canette**

Une canette contient un jus de fruits que l'on veut refroidir grâce à un mécanisme présent dans la canette sous la forme d'un serpentin contenant de l'azote liquide (masse $m = 50\ g$). L'azote se vaporise à l'ouverture de la canette et la refroidit.

FIG. 8



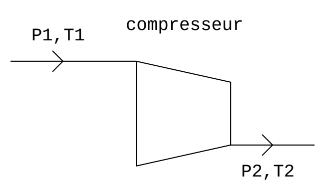
1. Proposer un modèle et calculer la température atteinte par la boisson dans la canette.

2. Combien faudrait-il de masse de glaçon pour atteindre une telle température ? Commenter.

Données : enthalpie massique de vaporisation de l'azote: $h_{vap}(N_2) = 190\ kJ.kg^{-1}$, enthalpie massique de fusion de l'eau: $h_{fus}(H_2O) = 334\ kJ.kg^{-1}$, capacité thermique massique de l'eau $c = 4180\ J.kg^{-1}.K^{-1}$.

IV. **Compresseur à deux étages**

On étudie la compression adiabatique réversible de l'air dans un compresseur en écoulement permanent. L'air, assimilable à un gaz parfait tel que $c_p = 1,0\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ et de coefficient $\gamma = 1,4$, est aspiré dans les conditions ($P_1 = 1,0\ bar$, $T_1 = 27^0C$) avec un débit massique $D_m = 1,3\ kg.s^{-1}$. Le rapport de compression est $a = \frac{P_2}{P_1} = 25$.



On négligera toute variation d'énergie cinétique ou potentielle.

1. Calculer la température T_2 de l'air à la sortie du compresseur.

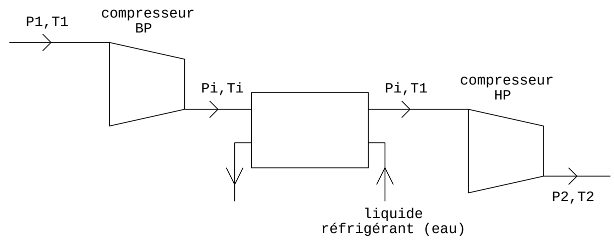
2. Calculer le travail utile massique de compression ainsi que la puissance correspondante.

Le compresseur comporte à présent deux étages (BP et HP):

• dans un premier temps, l'air est comprimé jusqu'à une pression intermédiaire P_i

• il est ensuite refroidi sans perte de pression par passage dans un refroidisseur intermédiaire qui le ramène à la température initiale T_1

• dans le second étage, l'air est comprimé jusqu'à la pression finale P_2.



3. Exprimer littéralement le travail utile massique global de compression w_g fourni par les deux étages du compresseur en fonction de T_1, a, c_p, γ et $r = \dfrac{P_i}{P_1}$ (rapport intermédiaire de compression).

4. Pour a fixé, déterminer la valeur de r qui rend ce travail minimal. Applications numériques : calculer r, T_i, T_2 et le travail utile massique w_g.

5. La réfrigération de l'air est assurée par une circulation d'eau liquide qui entre à la température $T_0 = 283\ K$ et dont la température finale ne doit pas dépasser $T_f = 293\ K$. Sachant que le refroidisseur est parfaitement calorifugé, déterminer le débit massique d'eau minimal nécessaire. On donne la capacité thermique massique de l'eau $c_e = 4,18\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$.

Réponses: 1- $T_2 = 752\ K$ *2-* $P_m = 588\ W$ *3-* $w_g = c_pT_1(r^{(\gamma-1)/\gamma} + \dfrac{a}{r})^{(\gamma-1)/\gamma} - 2$ *4-* $r = \sqrt{a} = 5$, $T_i = T_2 = 475\ K$, $w_g = 350\ kJ.kg^{-1}$

V. **Congélateur**

Dans un congélateur supposé fonctionner réversiblement, de puissance électrique $P_e = 50\ W$, on place une masse $m = 1kg$ d'eau liquide à la température initiale $t_1 = 20^0C$ qui au bout d'un temps τ se transforme en glace à la température $t_2 = -18^0C$. La température de l'air de la pièce est $t_e = 20^0C$.

Données:

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_l = 4,18\ kJ.K^{-1}.kg^{-1}$

Capacité thermique massique de l'eau solide : $c_g = 2,1kJ.K^{-1}.kg^{-1}$

Chaleur latente massique de la glace à $t_0 = 0^0C$: $l = 334\ kJ.kg^{-1}$.

1. Calculer le transfert thermique reçue par la masse m d'eau au cours de sa transformation. Représenter la transformation de l'eau sur le diagramme d'état du corps pur eau (P en ordonnée et T en abscisse).

2. Calculer la variation relative de température de la source froide. On fait l'approximation que la température de la source froide est constante et égale à $274\ K$. Justifier cette valeur numérique et calculer l'efficacité du congélateur.

3. Calculer le travail électrique reçu par le congélateur pour congeler la masse m d'eau et en déduire le temps τ nécessaire.

Réponses : $Q_{eau} = \Delta H_{eau} = -455\ kJ$, $W = 31,6\ kJ$ *et* $\tau = 630\ s$

VI. **Pompe à chaleur**

Une pompe à chaleur dont le fonctionnement est supposé réversible, effectue des transformations cycliques en échangeant de la chaleur avec deux sources : l'une est l'eau d'un lac dont la température est $T_0 = 280\ K$, l'autre est une masse d'eau $M = 800\ kg$ dont la température initiale est $T_i = 290\ K$. La capacité thermique massique de l'eau liquide est $c = 4,2.10^3\ J.kg^{-1}.K^{-1}$.

1. On note δQ_F, δQ_c et δW, les énergies échangées par la pompe à chaleur au cours d'un cycle. Faire un schéma en précisant la nature des sources froide et chaude, et en indiquant les sens des échanges thermiques, en déduire les signes de δQ_F, δQ_c et δW. Comment évoluent les températures de la masse M d'eau et de l'eau du lac au cours du temps? justifier votre réponse.

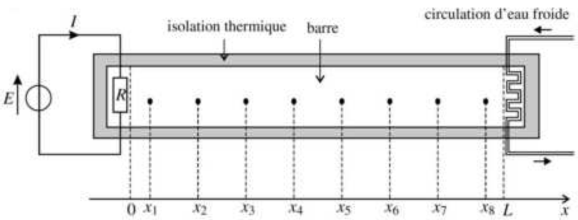
2. Calculer, lorsque la masse M d'eau a atteint la température finale $T_f = 333\ K$: les transferts thermiques Q_f et Q_c, le travail W absorbé par la pompe et l'efficacité globale de la pompe à chaleur.

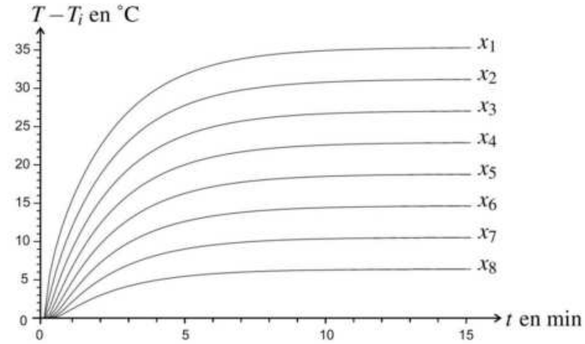
3. Calculer le temps nécessaire pour atteindre la température voulue avec une pompe de puissance $P = 5\ kW$.

Réponses: 2- $Q_c = -1,67.10^5\ kJ$, $Q_f = +1,50.10^5\ kJ$, $W = 0,17.10^5\ kJ$

VII. **Diffusion thermique dans un barreau**

Une barre cylindrique en cuivre de section $S = 2,0.10^{-4}\ m^2$ est calorifugée sur sa surface latérale. Elle est chauffée à son extrémité $x = 0$ (avec une puissance $P = 15\ W$) et une circulation d'eau froide maintient son autre extrémité à température constante. Des sondes de températures sont disposées régulièrement le long de la barre (selon un espacement $e = 22\ mm$).





1. Cette expérience permet-elle d'observer le régime stationnaire ? Calculer une estimation du coefficient de diffusion.

2. Montrer que ce protocole permet de mesurer la conductivité thermique du cuivre et en faire l'estimation.

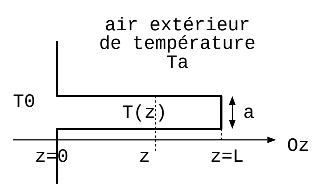
Réponses: 1- $D \approx 3.10^{-4}\ m^2.s^{-1}$ 2- $\lambda = 400\ SI$

VIII. **Effet d'ailette par les balcons**

Bien que la ressemblance entre les ailettes de refroidissement de moteur et les balcons d'un bâtiment ne soit à première vue pas évidente, ces deux éléments sont pourtant comparables. Les ailettes sur un moteur sont des lames métalliques qui servent à augmenter la surface de contact entre le corps chaud (l'air près du moteur) et le corps froid (l'air ambiant) afin d'éviter que le moteur ne chauffe trop et ne soit endommagé.

Or un mur de soutènement (plancher d'un balcon) perpendiculaire à la façade d'un immeuble joue le même rôle qu'une ailette provoquant ainsi d'importantes pertes thermiques dans l'immeuble.

On modélise un balcon par une dalle en béton de section rectangulaire de côtés $a = 10\ cm$ selon Oy, $b = 2\ m$ selon Ox et $L = 1,2\ m$ selon Oz. La dalle est fixée à une paroi de température $T_0 = 20^0C$ (température de la dalle en $z = 0$) et est en contact avec l'air de température $T_a = 5^0C$.



On rappelle la loi de Newton : $j_{th} = h(T(z) - T_a)$, où j_{th} est le flux thermique surfacique sortant de l'ailette à l'abscisse z en régime stationnaire et $T(z)$ la température de l'ailette à l'abscisse z. On donne $h = 15\ W.m^{-2}.K^{-1}$ pour l'interface béton-air et la conductivité thermique du béton $\lambda = 1,75\ W.m^{-1}.K^{-1}$.

1. Montrer que $T(z)$ en régime permanent vérifie l'équation différentielle $\dfrac{d^2T(z)}{dz^2} - \dfrac{T(z)}{\delta^2} = -\dfrac{T_a}{\delta^2}$. Exprimer et calculer δ.

2. En déduire $T(z)$ en supposant la dalle de longueur infinie. A quelle condition, l'hypothèse 'dalle infinie' est-elle légitime?

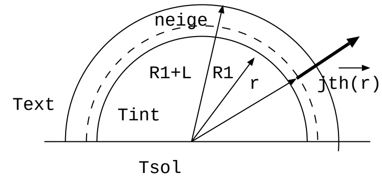
3. En déduire la puissance thermique évacuée par la dalle.

Réponses: $\delta = \sqrt{\dfrac{a\lambda}{2h}} = 7,6\ cm$, $T(z) = T_a + (T_0 - T_a)e^{-z/\delta}$ et $P = 2hb\delta(T_0 - T_a)$

IX. **Igloo**

On modélise un igloo par une demi-sphère creuse de rayon intérieur R_1, fabriqué à partir de blocs de neige de conductivité thermique λ et d'épaisseur supposée constante égale à L.

On note $T(r)$ et $\overrightarrow{j_{th}} = j_{th}(r)\overrightarrow{e_r}$, respectivement la température et le vecteur densité de courant thermique dans la neige pour $R_1 < r < R_1 + L$, en coordonnées sphériques. Les températures T_{ext} et T_{int} sont les températures à l'extérieur et à l'intérieur de l'igloo. On donne le gradient en coordonnées sphériques: $\overrightarrow{\text{grad}} f(r) = \dfrac{df}{dr}\overrightarrow{e_r}$.



1. On note $\mathcal{P}(r)$ la puissance thermique sortant de la demi-sphère de rayon r. Exprimer $\mathcal{P}(r)$ et montrer que $\mathcal{P}(r)$ ne dépend pas de r.

2. En déduire que la résistance thermique de l'igloo s'écrit $R_{th} = \dfrac{L}{2\pi\lambda R_1(R_1 + L)}$.

3. Plusieurs personnes se trouvent à l'intérieur de l'igloo et dégagent une puissance thermique $\mathcal{P} = 300\ W$. On donne $T_{ext} = -40^0C$, $T_{sol} = -20^0C$, $R_{sol} = 1,3\ K.W^{-1}$ (résistance thermique du sol) et $R_{igloo} = 0,15\ K.W^{-1}$ (résistance thermique de l'igloo). Calculer la température intérieure de l'igloo en régime stationnaire.

Réponse: $T_{igloo} = 277\ K$

X. **Conduction thermique d'un métal**

On donne les caractéristiques physiques de l'aluminium et du cuivre:

Métal	Masse molaire	Masse volumique	Capacité thermique	Conductivité thermique
Cuivre	$63,5\ g.mol^{-1}$	$9,0.10^3\ kg.m^{-3}$	$385\ J.kg^{-1}.K^{-1}$	$401\ W.m^{-1}.K^{-1}$
Aluminium	$27\ g.mol^{-1}$	$2,7.10^3\ kg.m^{-3}$	$897\ J.kg^{-1}.K^{-1}$	$237\ W.m^{-1}.K^{-1}$

1. Ces données sont-elles en accord avec la loi de Dulong et Petit qui stipule que les capacités thermiques molaires des solides sont proches de $3R$ avec $R = 8,14\ SI$, constante des gaz parfaits ?

2. Une barre cylindrique, calorifugée sur sa surface latérale, de longueur $L = 1\ m$ et de rayon $a = 1,5\ cm$, est mise en contact thermique à une extrémité avec un bain d'eau bouillante et à l'autre extrémité avec un bain d'eau glacée (eau + glace). En régime stationnaire la quantité de glace qui fond dans le bain d'eau glacée, par unité de temps est $q = 5\ g.min^{-1}$.

2.a. Estimer l'ordre de grandeur de la durée d'établissement du régime stationnaire dans la barre.

2.b. On donne l'enthalpie de fusion de la glace $h_{fus} = 350\ kJ.kg^{-1}$ à pression atmosphérique. Déduire de cette expérience, la valeur numérique de la conductivité thermique du matériau et en déduire la constitution de la barre utilisée.

2.c. Quelle serait la valeur de q si la barre avait la même géométrie mais était en aluminium ?

Réponses : 1- $\dfrac{C_p M}{3R} \approx 1$ *2a-* $\tau = \dfrac{L^2\rho c}{\lambda} \approx 10^4\ s$ *2b-* $\lambda = \dfrac{q h_{fus} L}{\pi a^2 \Delta T}$ *avec* $\Delta T = 100\ K$

XI. **Atmosphère isotherme**

On souhaite étudier le modèle de l'atmosphère isotherme de température T. L'air est considéré parfait et placé dans le champ de pesanteur terrestre $\overrightarrow{g} = -g\overrightarrow{e_z}$. On donne le coefficient de diffusion D dans le gaz et $P = n^* k_B T$ où n^* est la densité volumique de particules.

1. Déterminer l'expression de $n^*(z)$ en fonction de $n^*(z = 0)$, k_B, T et m, la masse d'une particule.

2. Expliquer pourquoi il y a nécessairement un flux dirigé vers le haut et citer le phénomène physique à l'origine de ce flux.

Exprimer la vitesse moyenne $\overrightarrow{u}$ des particules liée à ce phénomène (elles ont toutes la même vitesse dirigée vers le haut).

3. Expliquer pourquoi il y a nécessairement un flux dirigé vers le bas et citer le phénomène physique à l'origine de ce flux. Exprimer la vitesse moyenne due à ce flux en tenant compte du fait que l'atmosphère est à l'équilibre.

4. A cause des chocs entre les particules il existe une force de friction de la forme $\overrightarrow{f} = -\alpha\overrightarrow{u}$. Donner l'expression et la dimension de α.

5. Cas du diazote à 0^0C, on donne: $M(N) = 14,0\ g/mol$, $g = 9,81\ m.s^{-2}$, $D = 1,18.10^{-5}\ m^2.s^{-1}$, $k_B = 1,4.10^{-23}\ SI$. Calculer u et α.

Réponses: 1- $n^*(z) = n^*(0)e^{-mgz/k_BT}$ *2-* $\overrightarrow{u} = \dfrac{mgD}{k_BT}\overrightarrow{e_z}$ *4-* $\alpha = \dfrac{mg}{u} = \dfrac{k_BT}{D}$

XII. **Détendeur**

Du méthane est transporté dans un gazoduc, avec un débit massique $q_m = 2,5\ kg.s^{-1}$. sous haute pression P_1 avant d'être détendu à la pression P_2. La section de la conduite est la même en aval et amont du détendeur et vaut $S = 0,2\ m^2$. L'écoulement du gaz est permanent et le détendeur fonctionne de façon adiabatique.

A l'entrée du détendeur : $P_1 = 80\ bars$, $T_1 = 300\ K$, $v_1 = 0,0170\ m^3.kg^{-1}$ (volume massique du méthane), $h_1 = 1120\ kJ.kg^{-1}$ (enthalpie massique du méthane), et $s_1 = 9,10\ kJ.K^{-1}.kg^{-1}$ (entropie massique du méthane).

A la sortie du détendeur : $P_2 = 3\ bars$, T_2 est inconnue et on donne :

$h(T,P_2) = 2,21T + 539\ kJ.kg^{-1}$

$s(T,P_2) = 75.10^{-3}T + 8,75\ kJ.K^{-1}.kg^{-1}$

$v(T,P_2) = 1,7.10^{-3}T + 0,013\ m^3.kg^{-1}$

1. Appliquer le premier principe industriel au méthane qui traverse le détendeur et montrer que, dans le cas où l'on néglige les variations d'énergie mécanique du méthane, le fluide subit une détente isenthalpique type détente de Joule-Thomson, en déduire T_2.

2. Déduire du débit massique, les vitesses du gaz en amont et aval du détendeur. Calculer les énergies cinétiques massiques et valider l'hypothèse précédente.

3. Déterminer l'entropie créée par unité de temps.

4. Partant de l'état 1 le méthane traverse maintenant une turbine adiabatique qui remplacerait le détendeur et qui aurait aussi une pression de sortie $P_3 = 3\ bars$. Sous 3 bars la température de liquéfaction du méthane est $T_l = 128\ K$, le liquide saturant a une entropie $s_l = 5,39\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ et la vapeur saturante a pour entropie $s_v = 10,4\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ et pour enthalpie $h_v = 820\ kJ.kg^{-1}$. L'état en sortie de la turbine est notée 3.

4.a. Préciser dans le cas d'une détente adiabatique réversible dans la turbine la valeur de l'entropie massique s_3 en sortie de la turbine. En déduire que l'état 3 correspond à un état diphasé et calculer x_v la fraction massique en vapeur.

4.b. On admet que $x_v = 0,74$. Calculer l'enthalpie h_3 en sortie de la turbine (L'enthalpie du liquide saturant est négligée devant celle de la vapeur).

4.c. Déduire du premier principe industriel, la puissance maximale que pourrait récupérer une turbine adiabatique.

Réponses: 1- $T_2 = 263\ K$ *2-* $c_1 = 0,21\ m.s^{-1}$ $c_2 = 5,75\ m.s^{-1}$ *3-* $48,4\ kJ.K^{-1}.s^{-1}$ *4-* $P_u = -2030\ kW$.

XIII. **Machine thermique**

La machine étudiée suit le modèle suivant: un système ouvert en régime stationnaire constitué d'eau sous deux phases liquide et vapeur décrit un cycle ABCD. Les évolutions BC et DA sont adiabatiques et réversibles, AB et CD sont isothermes et isobares. Soit x le titre massique en vapeur.

états	A	B	C	D
P(bar)	20	20	1	1
T(K)	485	485	373	373
x	0	1	x_C	x_D

T(K)	P(bar)	$v_l(m^3/kg)$	$h_l(kJ/kg)$	$s_l(J.K^{-1}.kg^{-1})$	$v_v(m^3/kg)$	$h_v(kJ/kg)$	$s_v(J.K^{-1}.kg^{-1})$
485	20	$1,18.10^{-3}$	909	2,45	0,0998	2801	6,35
373	1	$1,04.10^{-3}$	418	1,30	1,70	2676	7,36

h_l, v_l et s_l sont les grandeurs sur la courbe de rosée et h_v, s_v et v_v sont les grandeurs sur la courbe d'ébullition.

1. Tracer dans le diagramme entropique la courbe de saturation et le cycle ABCD décrit par l'eau.

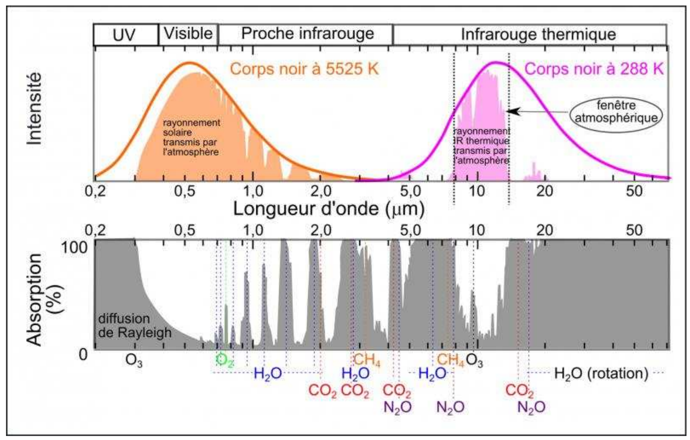
2. Calculer x_C et x_D les titres massiques en vapeur en C et D.

3. Calculer les enthalpies massiques h_A, h_B, h_C et h_D.

4. Calculer le travail utile massique et le transfert thermique massique avec la source chaude au cours d'un cycle pour cette machine. En déduire son rendement.

Réponses : $x_C = 0,83$, $x_D = 0,19$, $h_C = 2290\ kJ/kg^{-1}$, $h_D = 847\ kJ.kg^{-1}$, $w_u = -450\ kJ.kg^{-1}$, $r = 0,24$

XIV. **L'effet de serre atmosphérique**



On considère que le soleil et la terre se comportent comme des corps noirs de températures respectives T_s et T_0. Données :

- Rayon du soleil : $R_s = 700\ 000\ km$
- Rayon de la terre : $R_T = 6400\ km$
- Distance terre-soleil : $d = 150.10^6\ km$
- Constante de Stefan : $\sigma = 5,67.10^{-8}\ W.m^{-2}.K^{-4}$
- Constante de Wien : $K = 2898\ \mu m.K$.

1. Quelques chiffres.

1.a. Exprimer la puissance totale rayonnée par le soleil P_s en fonction de σ, T_s et R_s.

1.b. Exprimer la puissance totale reçue par la terre P_T en fonction de σ, T_s, R_s, R_t et d. En déduire que la puissance surfacique du rayonnement émis par le soleil et reçue par la Terre s'écrit $\phi_s = \sigma T_s^4 \dfrac{R_s^2}{4d^2}$. Pour la suite on prend $\phi_s = 348\ W.m^{-2}$.

1.c. Sur les documents donnés dans l'introduction, identifiez les courbes donnant l'intensité du rayonnement émis par le soleil et par la Terre en fonction de la longueur d'onde. Vérifier que les courbes sont en accord avec la loi de Wien.

2. Dans un premier modèle où l'on ne tient pas compte de la présence de l'atmosphère, exprimer à l'équilibre thermique, la température T_T de la Terre en fonction de ϕ_s et σ. Faire l'AN et comparer à la valeur de T_0 lue sur les courbes de l'introduction. Donnée: $T_s = 5525\ K$.

3. En réalité le rayonnement émis par la terre est piégé par l'atmosphère et constitue ce qu'on appelle l'effet de serre. L'atmosphère laisse passer le rayonnement solaire qui est transparente dans le visible mais absorbe l'infrarouge. On peut considérer l'atmosphère comme un corps noir qui émet dans l'infrarouge. Déterminer la température de surface de la terre T_1 en tenant compte de l'atmosphère. Conclure.

4. En vous aidant du document donné dans l'introduction, comment pourrait-on améliorer le modèle ? Pourquoi le rejet par les activités humaines de méthane et de CFC dont la bande d'absorption est dans l'intervalle $8 - 12\ \mu m$ doit-il être limité au maximum ?

Réponses: *2-* $T_0 = (\dfrac{\phi_s}{\sigma})^{1/4}$ *3-* $T_1 = (\dfrac{2\phi_s}{\sigma})^{1/4}$