

SESSION 2010

**AGREGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

**Section : SCIENCES PHYSIQUES
Option : PHYSIQUE ET CHIMIE**

**COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION**

Durée : 5 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

Quelques aspects du réchauffement climatique

Introduction

Depuis le début du XX^{ème} siècle, la température moyenne sur Terre ne cesse d'augmenter. Cette montée est particulièrement importante si on ne considère que les cinquante dernières années, et bat des records les douze dernières années.

Les scientifiques recommandent de ne pas dépasser une hausse de 1,5°C alors que le GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) prévoit une hausse moyenne comprise entre 1,4 °C et 5,8 °C d'ici à la fin du siècle, chiffre qui dépend des quantités de gaz à effet de serre (GES) émises dans l'atmosphère.

Une des questions fondamentales qui se pose alors est : comment répondre à une demande croissante d'énergie alors que les réserves de pétrole, de gaz et de charbon sont limitées et qu'il faut enrayer le réchauffement climatique ?

Ce problème comporte quatre parties en relation avec divers aspects du réchauffement climatique. Ces quatre parties sont indépendantes les unes des autres et, à l'intérieur de chaque partie, de nombreuses questions sont également indépendantes les unes des autres.

La partie **A** aborde la notion de température enseignée au lycée.

La partie **B** s'intéresse au rôle de la couche d'ozone stratosphérique.

La partie **C** est consacrée à l'effet de serre.

À l'intérieur de la partie **C** figure un paragraphe relatif aux oscillateurs mécaniques enseignés au lycée (partie **C 2.1.**), en prélude à l'étude d'un gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone (CO₂).

La partie **D** concerne le projet de mise en fonction en 2012 d'un réacteur nucléaire de troisième génération, à eau sous pression, qui permettra de produire de l'énergie sans émettre de GES. À l'intérieur de la partie **D** figure un paragraphe concernant l'énergie d'origine nucléaire enseignée au lycée (partie **D 1.**).

On notera le nombre complexe i tel que $i^2 = -1$ et $\Im m(i) = 1$.

Les grandeurs complexes seront soulignées.

L'usage de la calculatrice est autorisé. Les numéros des questions sont encadrés.

*
* *
* *

Partie A : Notion de température au lycée

Des extraits du programme officiel des classes de Seconde et Première S figurent en annexe.

- 1 La notion de température est abordée au lycée en classe de Seconde. Comment est définie la température absolue dans cette classe ? Quel enseignement expérimental peut-on associer à cette notion ? Proposer un plan de séance.
- 2 Proposer une expérience, réalisable en classe de Seconde, montrant qu'il existe un lien entre le spectre d'une lumière émise par un corps chaud et la température de ce corps.

- 3] La loi qui relie λ_m (longueur d'onde pour laquelle la densité spectrale d'un rayonnement à l'équilibre thermique est maximum) à la température T à l'équilibre est :

$$\lambda_m \cdot T = 2898 \mu\text{m.K}$$

Comment s'appelle cette loi ?

En classe de Seconde, on donne la température moyenne de surface de quelques étoiles :

Étoile	Bételgeuse	Soleil	Sirius	Rigel
Température moyenne de surface (K)	3000	5600	8000	>10000

Quelle est la couleur de chaque étoile ?

- 4] Donner trois exemples de thermomètres en précisant pour chacun d'eux la grandeur physique qui dépend de l'état thermique du corps dont on veut mesurer la température. Expliquer le fonctionnement d'un de ces trois thermomètres.
- 5] Expliquer brièvement comment on peut atteindre expérimentalement une température de :
◇ 80 K
◇ 1 K
◇ 10^{-6} K
Quelle est la température la plus basse que l'on sait obtenir à l'heure actuelle ? En quelle année a-t-elle été atteinte ? Quelle technique est utilisée pour cela ?
- 6] Proposer l'organisation d'une séance de cours en classe de Seconde sur le thème du gaz parfait.
Indiquer les éléments supposés acquis par les élèves avant le début de cette séance.
Préciser le plan de la séance, les expériences réalisées et le travail demandé aux élèves.
Préciser les connaissances et les compétences travaillées au cours de cette séance.
- 7] Les transferts thermiques sont abordés en classe de Première S.
Définir les deux modes de transfert thermique ainsi que le transfert d'énergie par rayonnement. Donner un exemple pour les trois types de transfert.
- 8] Que répondre à un élève de Première S qui demande pourquoi la température varie peu sur Terre alors que le Soleil réchauffe la Terre ?

*
* * *

Partie B : Le rôle de la couche d'ozone stratosphérique

La diminution de la couche d'ozone stratosphérique est due à l'émission de gaz chlorofluorocarbone (CFC). Les rayons UV sont alors moins bien interceptés dans la haute atmosphère et l'énergie solaire arrive davantage au sol. Il en résulte un réchauffement de la basse atmosphère. Un autre inconvénient introduit par la diminution de la couche d'ozone dans la haute atmosphère est aussi de laisser passer les UV proches, lesquels sont nocifs pour la peau.

Dans toute cette partie, on négligera les effets de la pesanteur.

Données :

- * Charge de l'électron : $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C
- * Masse de l'électron : $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg
- * Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \cdot 10^8$ m.s⁻¹
- * Permittivité électrique du vide : $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9}$ F.m⁻¹
- * Perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H.m⁻¹
- * $\vec{\text{rot}}(\vec{\text{rot}}\vec{A}) = \vec{\text{grad}}(\text{div}\vec{A}) - \Delta\vec{A}$

On étudie la propagation d'une onde électromagnétique plane, progressive, monochromatique, issue du soleil, dans la couche d'ozone de la stratosphère. On considère l'ozone comme un diélectrique linéaire, homogène et isotrope. On néglige la polarisabilité d'orientation et on ne tient donc compte que de la polarisabilité moléculaire.

On suppose que la couche d'ozone occupe le demi-espace $z > 0$. Le champ électrique de l'onde qui s'y propage est noté en complexe : $\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - kz)} \vec{u}_x$.

Sous l'action de ce champ les molécules se polarisent. On envisage le modèle de l'électron élastiquement lié dans lequel on étudie un seul électron par molécule d'ozone. Cet électron (charge $-e$ et masse m) situé en un point M est élastiquement lié au centre O fixe de la molécule. On note $\vec{r} = \vec{OM}$, et le cas échéant, en complexe $\vec{r} = \vec{r}_0 e^{i\omega t}$.

Cet électron est soumis à trois forces :

- * une force d'interaction avec l'onde électromagnétique,
- * $\vec{f}_A = -m\omega_0^2 \vec{r}$ où ω_0 est une pulsation propre caractéristique du mouvement de l'électron,
- * $\vec{f}_B = -m\Omega \frac{d\vec{r}}{dt}$.

- 9] Quel est le nom du protocole international qui réglemente les émissions de CFC ? Quelle est l'année de sa signature ?
- 10] Donner la plage d'altitudes par rapport à la surface de la Terre correspondant à la stratosphère ?
- 11] À quels phénomènes physiques correspondent les forces \vec{f}_A et \vec{f}_B ? Quelle est la dimension de Ω ?
- 12] On ne tient pas compte de la force magnétique qu'exerce l'onde sur l'électron. Pourquoi ?
- 13] Appliquer le principe fondamental de la dynamique à l'électron. Les équations étant linéaires, on utilise la notation complexe. En déduire l'équation différentielle vérifiée par le vecteur position \vec{r} de l'électron. Déterminer \vec{r} qu'on exprimera notamment en fonction de \vec{E} .
- 14] En déduire le moment dipolaire induit \vec{p} ainsi que la polarisation \vec{P} de la stratosphère. On note n_p la densité particulière d'ozone dans la stratosphère.
- 15] Le milieu n'est pas magnétique et est globalement neutre. Écrire les équations de Maxwell reliant les champs \vec{E} et \vec{B} et la polarisation du milieu.
- 16] Les champs n'étant fonction que de z et t , en déduire l'équation :

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2}$$

- 17] Déduire de l'équation obtenue à la question précédente écrite sous forme complexe et de

l'expression de la polarisation \vec{P} , l'expression de \underline{k}^2 . On posera :

$$\omega_p^2 = \frac{n_p e^2}{m \epsilon_0}$$

- [18] L'indice complexe est défini par $\underline{n}(\omega) = \frac{c}{\omega} \underline{k}$. En déduire \underline{n}^2 .

En notant $\underline{n} = n_1 - i n_2$, compte tenu d'une approximation dont on ne se préoccupe pas ici, on admet les expressions respectives de n_1 et n_2 :

$$1 + \frac{\omega_p^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{2((\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \Omega^2\omega^2)} \quad \text{et} \quad \frac{\Omega\omega\omega_p^2}{2((\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \Omega^2\omega^2)}$$

- [19] Quelle est l'expression du champ électrique \vec{E} (observable) en fonction notamment de n_1 et n_2 ? Comment appelle-t-on n_1 et n_2 ? Justifier.
- [20] Constater qu'il apparaît un terme d'atténuation et en déduire la distance caractéristique δ du phénomène en fonction de c , ω et n_2 .
- [21] On donne $\omega_0 = 7,4 \cdot 10^{15} \text{ rad.s}^{-1}$ la pulsation centrale de la bande d'absorption de l'ozone. Dans quel domaine du spectre électromagnétique se situe ω_0 ? On donne $\Omega = 10^{14} \text{ rad.s}^{-1}$ ainsi que la densité particulaire maximum d'ozone dans la stratosphère $n_p = 4 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$. Calculer δ pour les deux fréquences suivantes :
- ◇ f_0 correspondant à la longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 250 \text{ nm}$
 - ◇ f correspondant à la longueur d'onde dans le vide $\lambda = 600 \text{ nm}$
- Conclure : pourquoi est-il important de maintenir la couche d'ozone stratosphérique ?

*
* *
*

Partie C : L'effet de serre

1. L'atmosphère terrestre

Données :

- * Rayon du Soleil : $R_S = 7 \cdot 10^8 \text{ m}$
- * Rayon de la Terre : $R_T = 6,4 \cdot 10^6 \text{ m}$
- * Distance Terre - Soleil : $d = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$
- * La constante de STEFAN : $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

On considèrera que le Soleil se comporte comme un corps noir à la température T_S et que la Terre se comporte comme un corps noir à la température T_0 .

- [22] Expliquer à quoi correspondent ϕ , T et σ dans la loi de STEFAN : $\phi = \sigma T^4$.
- [23] Quelle est l'expression de la puissance totale rayonnée par le Soleil en fonction de σ , T_S (température à la surface du Soleil) et R_S ?
- [24] Quelle est l'expression de la puissance reçue par la Terre en fonction de σ , T_S , R_S , R_T et d ?
- [25] Déterminer la température à la surface du Soleil T_S sachant que le maximum du spectre qu'il émet se situe à $\lambda_m = 520 \text{ nm}$. On pourra se reporter à la partie A question 3.

Tournez la page S.V.P.

En réalité la Terre réfléchit une partie de l'énergie qu'elle reçoit de la part du Soleil et absorbe le reste. La fraction réfléchie s'appelle l'albédo qu'on note A et dont on donne la valeur numérique $A = 0,34$.

- 26 Déterminer la température de la Terre T_0 , en régime permanent, en fonction de A , T_S , R_S et d . Calculer T_0 . Commenter.

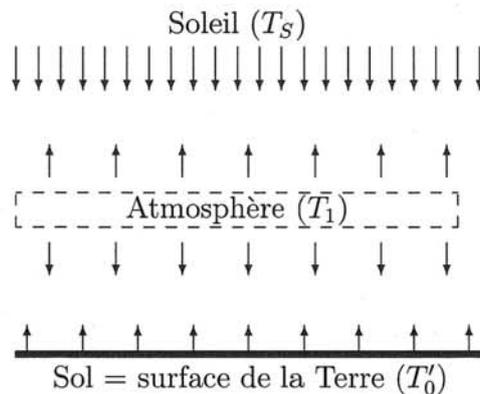
Avec le modèle qui va suivre, on souhaite interpréter le fait que le sol terrestre est en réalité à une température T'_0 supérieure à T_0 . C'est l'effet de serre.

On considère donc le sol à la température T'_0 et l'atmosphère à la température moyenne T_1 . L'atmosphère est assimilée à une couche sphérique dont le centre est celui de la Terre et d'épaisseur e , avec $e \ll R_T$. Le sol et l'atmosphère sont supposés rayonner comme des corps noirs de températures respectives T'_0 et T_1 .

- 27 Si on assimile une sphère de rayon $R_T + e$ à une sphère de rayon R_T ($e \ll R_T$), quelle est l'erreur relative commise sur le calcul de la surface ?
Faire l'application numérique. On prendra $e \simeq 10$ km.

Dans la suite du problème, on considérera donc que $R_T + e \simeq R_T$.

L'atmosphère absorbe la fraction α du rayonnement solaire et absorbe complètement le rayonnement terrestre. Par ailleurs, elle émet vers la Terre et vers l'Espace. La Terre absorbe le reste du rayonnement solaire et absorbe le rayonnement de l'atmosphère vers la Terre. Les échanges sont symbolisés dans le schéma ci-dessous, où les flèches représentent les rayonnements.



L'ensemble Terre-atmosphère a le même albédo A que la Terre seule.

- 28 Effectuer un bilan thermique pour le sol et un bilan thermique pour l'atmosphère.
29 Calculer T_1 et T'_0 en prenant $\alpha = 0,33$. Conclure.

2. Un gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO_2)

- 30 Quel est le nom du protocole international qui régleme les émissions de gaz à effet de serre ? Quelle est l'année de sa signature ?

2.1. Oscillateurs mécaniques au lycée

Des extraits du programme officiel des classes de Première S et de Terminale S figurent en annexe.

Les systèmes oscillants mécaniques sont abordés en classe de Terminale S.

- [31] Définir, pour une classe de Terminale S, un pendule pesant et un pendule simple. Quelles en sont les différences ?

En classe de Terminale S, par un ensemble d'expériences, on veut :

- * enregistrer un mouvement oscillant plus ou moins amorti,
- * vérifier la loi d'isochronisme des petites oscillations,
- * vérifier l'expression de la période propre d'un pendule simple.

- [32] Préciser, pour chacun des trois points qui précèdent, l'expérience réalisée, les graphes que doivent tracer les élèves pour interpréter chaque expérience, et les conclusions attendues.

- [33] Parmi les documentaires qu'on peut exposer aux élèves, on considère l'expérience du pendule de FOUCAULT qui a été reproduite au Panthéon ces dernières années.
En quelle année FOUCAULT a-t-il installé son pendule au Panthéon ?
Quel point primordial a mis en évidence cette expérience ?

Le dispositif solide-ressort est étudié en Terminale S. Un enseignant propose l'exercice suivant :

La liaison chimique entre l'atome d'hydrogène de masse m_H et l'atome de chlore de masse m_{Cl} , dans la molécule de chlorure d'hydrogène (HCl), peut être modélisée par un ressort de constante de raideur k , reliant les deux masses.

La période propre T_0 des oscillations de ce système est la même que celle d'un oscillateur comportant un ressort de constante de raideur k , dont une extrémité est fixe, tandis que l'autre est reliée à une masse dite masse réduite de valeur :

$$\mu = \frac{m_H m_{Cl}}{m_H + m_{Cl}}$$

Des mesures de spectroscopie montrent que la molécule $H^{35}Cl$, à l'état gazeux, absorbe les ondes électromagnétiques de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 3,3 \mu m$.

La fréquence des ondes absorbées est égale à la fréquence des oscillations de la molécule.

Calculer la constante de raideur du ressort modélisant la liaison H-Cl.

Données : $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, $M_H = 1,00 \text{ g.mol}^{-1}$, $M_{Cl} = 35,0 \text{ g.mol}^{-1}$ et $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

- [34] Rédiger brièvement la réponse attendue.

Dans l'exercice proposé à la question précédente, on demande à l'élève de Terminale S d'admettre que, en ce qui concerne le mouvement relatif, le système des deux masses est équivalent à un système unique de masse égale à la masse réduite du système. Cette équivalence est établie en première année de Classes Préparatoires aux Grandes Écoles en étudiant le système des deux masses dans son référentiel barycentrique.

- [35] Définir le référentiel barycentrique \mathcal{R}^* d'un système de points matériels.

Le référentiel \mathcal{R}^* est-il galiléen ? Justifier.

- [36] Proposer pour chaque question suivante une expérience à réaliser en classe de Première S. Donner clairement les réponses attendues.

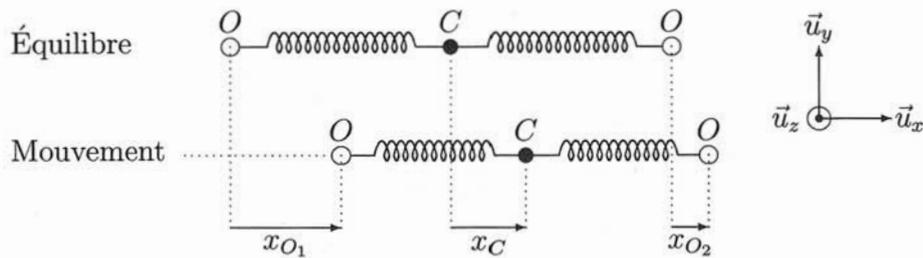
- ◇ Quelle est la particularité du mouvement du centre d'inertie d'un système soumis à des forces qui se compensent, dans un référentiel galiléen ?
- ◇ Comment varie le vecteur vitesse du centre d'inertie d'un système soumis à des forces qui ne se compensent pas, dans un référentiel galiléen ?

2.2. Mouvements d'élongation d'une molécule de CO₂

Soit une molécule de dioxyde de carbone constituant un système isolé. Chaque liaison carbone-oxygène est indépendante de l'autre. Les atomes sont assimilés à des points matériels de masse $m_O = 2,7 \cdot 10^{-26}$ kg pour l'oxygène et $m_C = 2,0 \cdot 10^{-26}$ kg pour le carbone.

L'atome de carbone interagit avec ses deux voisins, les deux atomes d'oxygène, lesquels n'interagissent pas entre eux.

À l'équilibre les deux liaisons carbone-oxygène sont identiques et ont donc même longueur. Les trois atomes restent toujours alignés dans la direction donnée par le vecteur unitaire \vec{u}_x . Au voisinage de l'état d'équilibre, on modélise les deux liaisons carbone-oxygène par deux ressorts identiques de constante de raideur $k = 1,4 \cdot 10^3$ N.m⁻¹ et de longueur à vide $\ell_0 = 0,17$ nm.



On repère par x_{O1} , x_C et x_{O2} les déplacements des atomes par rapport à la position d'équilibre de la molécule.

[37] On étudie la molécule de CO₂ dans son référentiel barycentrique R^* . Justifier que, dans cet exemple, R^* est galiléen.

[38] Justifier la relation : $m_O(x_{O1} + x_{O2}) + m_C x_C = 0$.

[39] Établir le système d'équations différentielles vérifiées par x_{O1} et x_{O2} , par application du principe fondamental de la dynamique.

Les solutions sont de la forme $x_{O1}(t) = \underline{A_{O1}}e^{i\omega t}$, $x_{O2}(t) = \underline{A_{O2}}e^{i\omega t}$, et $x_C(t) = \underline{A_C}e^{i\omega t}$, en notation complexe.

Déterminer les pulsations ω_1 et ω_2 conduisant à $\underline{A_{O1}}$, $\underline{A_{O2}}$ et $\underline{A_C}$ non nuls (on prendra $\omega_1 < \omega_2$).

Comment s'appellent ces pulsations ?

Les calculer.

[40] Décrire brièvement le mouvement de la molécule pour $\omega = \omega_1$ et $\omega = \omega_2$.

2.3. Propagation d'une onde électromagnétique dans l'atmosphère contenant du CO₂.

Les liaisons carbone-oxygène sont des dipôles. Chaque oxygène porte la charge $-\delta e$ et le carbone porte la charge $+2\delta e$ ($0 < \delta < 1$).

La molécule de CO₂ est supposée toujours rester alignée selon \vec{u}_x ; elle est dans le plan $z = 0$.

Une onde électromagnétique de pulsation ω , polarisée selon \vec{u}_x , se propage selon \vec{u}_z et va rencontrer une molécule de CO₂. On appelle cette onde l'onde *incidente*.

Son champ électrique est de la forme : $\vec{E}(z, t) = E_0 \cos\left(\omega t - \frac{\omega z}{c}\right) \vec{u}_x$ où c est la célérité de la lumière dans le vide.

On néglige l'action du champ magnétique.

- 41 Justifier que R^* est encore galiléen.
- 42 Établir le système d'équations différentielles vérifiées par x_{O1} et x_{O2} , par application du principe fondamental de la dynamique.
- 43 En régime sinusoïdal forcé, les solutions, en notation complexe, sont de la forme :

$$x_{O1}(t) = A_{O1}e^{i\omega t}, x_{O2}(t) = A_{O2}e^{i\omega t}$$
 Déterminer A_{O1} et A_{O2} en fonction de $\delta, e, E_0, \omega, \omega_2$ et m_O .
- 44 Exprimer le moment dipolaire $\vec{p}(t)$ de la molécule de CO_2 en fonction de $\delta, e, E_0, \omega, \omega_2, m_O, m_C$ et t .

Une molécule de CO_2 est donc modélisée par un dipôle rayonnant. On peut montrer que la puissance moyenne rayonnée par ce dipôle s'exprime par :

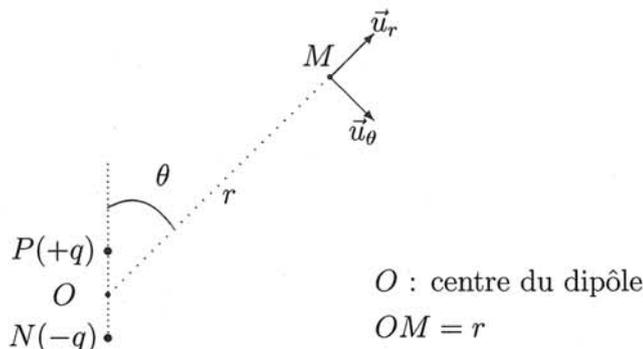
$$\langle \mathcal{P} \rangle = \frac{\mu_0 \omega^4 p_0^2}{12\pi c}$$

où p_0 est l'amplitude de $\vec{p}(t)$.

On rappelle que le champ électrique rayonné par un dipôle oscillant NP est :

$$\vec{E}(M, t) = \frac{\ddot{p}(t - r/c)}{4\pi\epsilon_0 r c^2} \sin\theta \vec{u}_\theta$$

où \ddot{p} est la dérivée seconde de p par rapport au temps.



- 45 Expliquer brièvement d'où vient la puissance quatrième dans ω^4 dans l'expression de $\langle \mathcal{P} \rangle$.
- 46 Exprimer la puissance moyenne I_0 en $z = 0$ transportée par l'onde incidente à travers une unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation, en fonction de μ_0, c et E_0 .
 En déduire que $\langle \mathcal{P} \rangle = SI_0$ et exprimer S en fonction de $\delta, e, \omega, \omega_2, \mu_0, m_O$ et m_C .

L'atmosphère contient n molécules de CO_2 par unité de volume. On considérera qu'un tiers d'entre elles sont alignées dans chacune des directions de l'espace.

Les molécules de CO_2 rayonnent de l'énergie qu'elles prennent à l'onde incidente et l'intensité de l'onde incidente diminue donc avec z .

- 47 Effectuer un bilan d'énergie sur un volume élémentaire de hauteur dz . En déduire que $I(z)$ est de la forme $I(z) = I(0)e^{-z/L}$, avec $I(0) = I_0$.
 Exprimer L en fonction de S et n .

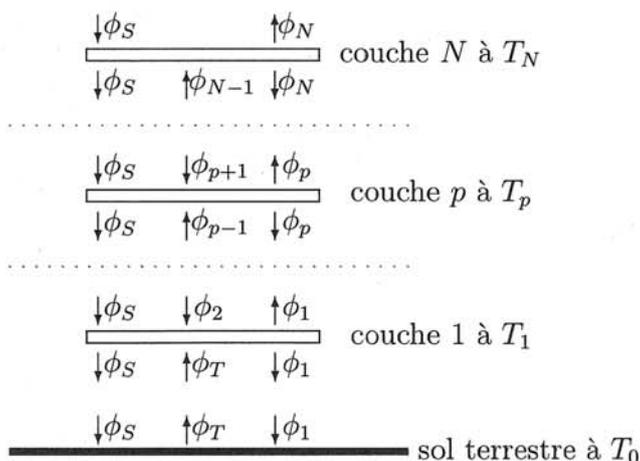
Quel est le sens physique de L ?

- [48] En déduire que l'onde est fortement absorbée pour $\omega \rightarrow \omega_2$.
Expliquer qualitativement pourquoi l'onde n'est pas absorbée pour $\omega \rightarrow \omega_1$.
- [49] Calculer la longueur d'onde dans le vide λ_2 correspondant à la pulsation ω_2 . À quel domaine du spectre électromagnétique appartient-elle ? Commenter.

2.4. Conséquence de l'augmentation de la quantité de CO₂ gazeux dans l'atmosphère

On suppose que la quantité de CO₂ gazeux augmente et on modélise cette augmentation par la superposition de N couches de CO₂ gazeux entourant la Terre. Chaque couche contient la même concentration fixée C_0 en CO₂ gazeux.

Modèle des N couches de CO₂ superposées



Le sol terrestre se comporte comme un corps noir de température T_0 et émet un flux surfacique ϕ_T .

On ne tient pas compte ici de l'albédo de la Terre.

ϕ_S est le flux solaire reçu par la Terre, par unité de surface de la Terre.

ϕ_p est le flux surfacique émis vers le haut et vers le bas par la couche p , de température T_p .

Le rayonnement émis par une couche est complètement absorbé par les autres couches.

Les couches sont transparentes au rayonnement solaire, qui arrive sous incidence normale sur chaque couche.

- [50] À partir d'un ordre de grandeur usuel pour T_0 , déterminer l'ordre de grandeur de la longueur d'onde d'émission maximum du sol terrestre.
En déduire que la couche 1 de CO₂ gazeux absorbe totalement le rayonnement de flux ϕ_T .
- [51] Effectuer un bilan radiatif pour :
 - ◊ le sol,
 - ◊ le sol et la couche 1,
 - ◊ le sol et les couches 1 à p ,
 - ◊ le sol et toutes les couches.
- [52] En déduire d'une part ϕ_p en fonction de ϕ_S , N et p , et d'autre part ϕ_T en fonction de ϕ_S et N .
- [53] Dédire de la loi de STEFAN l'expression de T_0 en fonction de ϕ_S , N et σ , la constante de STEFAN.

Conclure : quelle est la conséquence de l'augmentation de la quantité de CO₂ gazeux dans l'atmosphère ?

*
* * *

Partie D : Un exemple de production d'énergie sans émission de gaz à effet de serre, l'EPR de Flamanville 3

Les premières centrales nucléaires françaises encore en fonctionnement devraient être arrêtées en 2020. Ceci impose la construction de leurs remplaçantes cinq ans avant. EDF a donc décidé, en mai 2006, conformément à la politique énergétique actuelle de la France, de construire un réacteur nucléaire dit de "troisième génération", de type EPR (European Pressurized water Reactor – ou REP, Réacteur nucléaire à Eau sous Pression, en français), à Flamanville dans la Manche.

Sa mise en service est prévue pour 2012. Sa puissance sera de 1650 MW, contre 1450 MW pour les réacteurs les plus puissants actuellement, et devra permettre de répondre à une demande d'électricité qui devrait doubler d'ici les trente prochaines années.

On considère tous les gaz comme des **gaz parfaits**.

1. L'énergie d'origine nucléaire au lycée

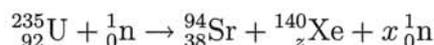
Les transformations nucléaires sont abordées en classe de Terminale S (cf. annexe) notamment afin de comprendre que la conversion masse-énergie peut être à l'origine de la production d'énergie dans les centrales nucléaires.

- 54 En quelle année la radioactivité a-t-elle été découverte ? Par qui ?
- 55 Définir un noyau radioactif.
- 56 Qu'appelle-t-on radioactivité β^- ? β^+ ? α ? Qu'est-ce que le rayonnement γ ?
- 57 On a mesuré l'activité d'un échantillon contenant du radon 220 en opérant, toutes les 20 secondes, des comptages successifs d'une durée de 1 seconde. Les résultats du nombre n d'impulsions détectées par le compteur sont regroupés dans le tableau suivant :

Date t (s)	0	20	40	60	80	100	120	140	160
n	483	380	290	227	182	140	103	87	64

La durée du comptage est-elle adaptée ?

- 58 Proposer une séance de travaux pratiques qui permettrait aux élèves d'acquérir et d'exploiter les données de la question précédente.
 - ◇ Indiquer le matériel utilisé, le principe de l'expérience et le protocole à suivre.
 - ◇ Expliciter les objectifs visés en termes de connaissances ainsi que les compétences au cours de cette séance.
- 59 Dans une centrale nucléaire française fonctionnant avec un réacteur à eau pressurisée (EPR), on réalise la fission contrôlée de l'uranium 235.
On s'intéresse à la réaction suivante :



dans laquelle z et x ne sont pas précisés.

◊ À partir de cette réaction et des données qui suivent, proposer l'énoncé d'un exercice.

◊ Le résoudre en indiquant pour chaque question les connaissances et les compétences évaluées

Données :

- * masse de $^{235}_{92}\text{U} = 234,99332 \text{ u}$
- * masse de $^{94}\text{Sr} = 93,89446 \text{ u}$
- * masse de $^{140}\text{Xe} = 139,89195 \text{ u}$
- * masse de $^1_0\text{n} = 1,00886 \text{ u}$
- * pouvoir calorifique du pétrole = 42 MJ.kg^{-1}
- * $1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- * $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- * $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- * $1 \text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

2. La température du circuit primaire

On considère le moteur ditherme de CARNOT fonctionnant de manière réversible entre deux sources de températures T_1 et T_2 ($T_1 < T_2$). Le cycle décrit par le fluide (l'agent thermique) se compose de deux isothermes et deux adiabatiques.

Les transferts thermiques avec les sources froide et chaude sont notés respectivement Q_1 et Q_2 . Le travail transféré est noté W .

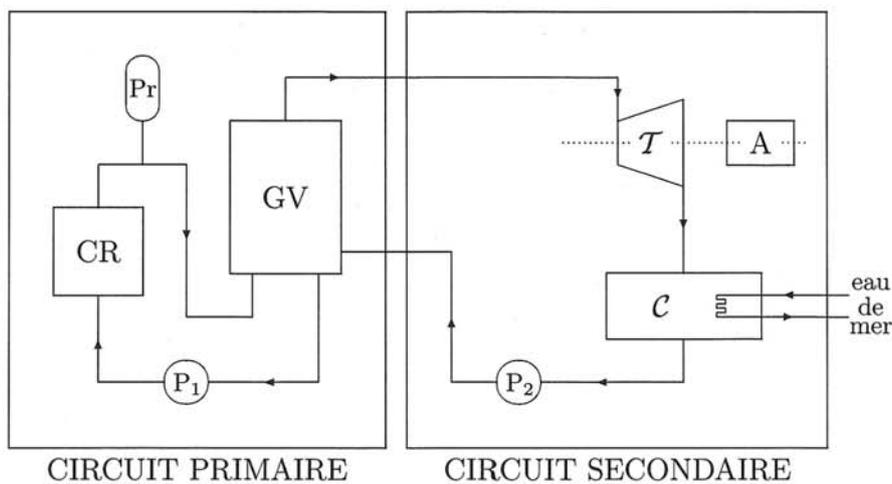
[60] Faire les bilans énergétique et entropique pour le fluide, en appliquant les deux principes de la thermodynamique.

[61] Définir le rendement. L'exprimer en fonction de T_1 et T_2 . Comment s'appelle ce rendement ? Que représente-t-il physiquement ?

3. Étude thermodynamique du circuit secondaire

Principe de fonctionnement :

Soit le schéma simplifié d'un réacteur EPR 1650 MW ci-dessous.



(une seule boucle est représentée)

Le circuit primaire comporte quatre éléments : le cœur situé dans la cuve réacteur (CR), le

pressuriseur (Pr), le générateur de vapeur (GV) et la pompe primaire (P_1).

Pour augmenter l'efficacité, une tranche nucléaire comporte quatre boucles parallèles comportant chacune un GV et une pompe P_1 .

La pression est maintenue constante dans le cœur grâce à un unique pressuriseur situé dans une des quatre boucles.

Les deux circuits primaire et secondaire sont fermés. Dans le cas de Flamanville 3, c'est de l'eau de mer qui joue le rôle d'eau de refroidissement du condenseur \mathcal{C} .

* Dans le réacteur, la fission nucléaire produit une grande quantité de chaleur. L'eau ainsi chauffée circule dans le circuit primaire où elle est mise sous pression pour la maintenir à l'état liquide.

* Le circuit primaire chauffe le circuit secondaire par échange thermique. L'eau du circuit secondaire, propulsée par la pompe secondaire (P_2), se transforme en vapeur dans le générateur de vapeur. Elle fait tourner une turbine (\mathcal{T}) couplée à un alternateur (A) qui produit de l'électricité.

* Le circuit secondaire comporte la partie secondaire du générateur de vapeur (source chaude), une turbine \mathcal{T} , un condenseur \mathcal{C} (source froide) et une pompe d'alimentation, P_2 (cf. schéma ci-dessus).

3.1. Diagramme de CLAPEYRON du système liquide-vapeur de l'eau

- [62] Représenter l'allure du diagramme (P, V) de l'eau où P est la pression et V le volume. Placer la courbe de saturation, le point critique, les domaines du liquide (L), de la vapeur (V) et du mélange liquide-vapeur (L+V).

3.2. Modélisation du fonctionnement du circuit secondaire : cycle de RANKINE

On raisonne sur $m = 1$ kg de fluide. La capacité thermique massique isobare du fluide liquide supposée constante est $c = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Le coefficient de dilatation isobare α de l'eau liquide, supposé constant, est $\alpha = 1,5.10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Les transformations subies par l'eau sont les suivantes :

- * $A \rightarrow B$: compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression $P_1 = 0,05$ bar à la pression $P_2 = 70$ bar, du liquide saturant sortant du condenseur à la pression P_1 (point A)
- * $B \rightarrow D$: échauffement isobare à P_2 du liquide dans le générateur de vapeur jusqu'à un état de liquide saturant (point D)
- * $D \rightarrow E$: vaporisation totale isobare à P_2 jusqu'à un état de vapeur saturante (point E).
- * $E \rightarrow F$: détente adiabatique réversible dans la turbine de P_2 à P_1 jusqu'à un état de mélange liquide-vapeur (point F).
- * $F \rightarrow A$: liquéfaction totale isobare dans le condenseur à P_1 , de la vapeur présente en F.

- [63] Représenter le cycle (cycle de RANKINE) dans le diagramme de CLAPEYRON (P, v).

Le transfert thermique peut s'écrire : $\delta q = cdT + kdP$, où k est le coefficient massique de chaleur de compression isotherme et où c est la capacité thermique massique isobare du système étudié.

- [64] \diamond Dans le cas d'une transformation réversible élémentaire, établir :

$$dh = cdT + (k + v)dP$$

où h est l'enthalpie massique du système, et établir :

$$ds = \frac{c}{T}dT + \frac{k}{T}dP$$

où s est l'entropie massique du système

◊ En exprimant que dh et ds sont des différentielles totales exactes, établir : $k = -T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P$

En déduire l'expression de k en fonction de T , v et α .

Dans toute la suite, on supposera que l'eau liquide est incompressible. On donne son volume massique : $v_\ell = 10^{-3} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$.

On note $\Delta T = T_B - T_A$ l'augmentation de température du liquide dans la pompe d'alimentation.

[65] Compte tenu que $\Delta T \ll T_A$, calculer ΔT à partir de l'expression de la variation d'entropie du système de A à B . On donne $T_A = 306 \text{ K}$.

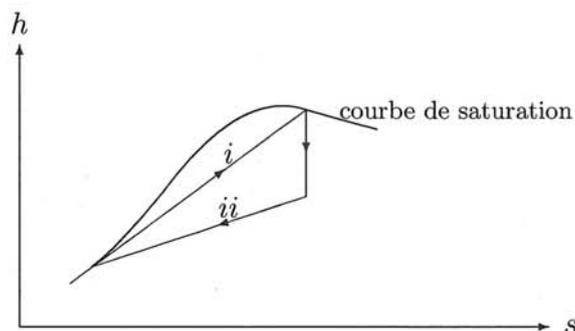
Dans la suite du problème, on néglige donc ΔT devant T_A et donc $T_B \simeq T_A$.

[66] Calculer la variation d'enthalpie massique Δh_{AB} du liquide au cours de la compression AB .

Que pensez-vous de la valeur de Δh_{AB} ?

[67] On effectue le bilan enthalpique pour le fluide au cours d'un cycle. On néglige Δh_{AB} . Exprimer alors le travail massique w en fonction des enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie de la turbine (h_E et h_F).

On donne l'allure du cycle dans le diagramme de MOLLIER en coordonnées (h, s) .



[68] Placer les points A , B , D , E et F .

Justifier l'allure du cycle. Justifier que la pente de (i) est supérieure à celle de (ii) .

L'intérêt de ce diagramme est que l'on peut lire directement les transferts d'énergie mis en jeu.

Indiquer où se trouvent les grandeurs massiques q_1 , q_2 et w associées aux grandeurs définies dans le paragraphe **D 2**.

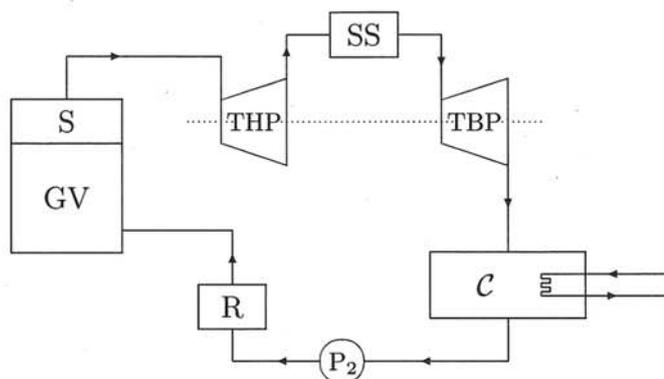
[69] On donne $w = -967 \text{ kJ.kg}^{-1}$ et $q_2 = 2561 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Calculer le rendement.

3.3. Optimisation du cycle

On part du cycle précédent (cycle de RANKINE) et on ajoute un surchauffeur (S) de sorte que le fluide sort du générateur de vapeur (GV) sous forme de vapeur surchauffée (vapeur sèche).

Il est plus efficace d'utiliser deux turbines : une à basse pression (TBP) et une à haute pression (THP). Entre les deux, on place un sécheur-surchauffeur (SS).

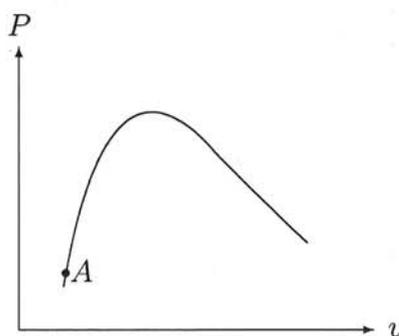
Le sécheur-surchauffeur sépare le liquide de la vapeur et resurchauffe la vapeur à la sortie de THP de façon isobare. Il joue donc, à l'entrée de TBP le même rôle que le surchauffeur du générateur de vapeur à l'entrée de THP. Sur la figure ci-après, R représente un réchauffeur.



Les transformations sont maintenant modélisées par :

- * $A \rightarrow B$: compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, du liquide saturant sortant du condenseur, de la pression $P_1 = 0,05$ bar à une pression intermédiaire P_{int} (avec $P_1 < P_{\text{int}} < P_2$).
- * $B \rightarrow D$: échauffement isobare dans le réchauffeur jusqu'au liquide saturant, à la pression P_{int} .
- * $D \rightarrow D'$: compression adiabatique réversible du liquide saturant, de la pression P_{int} à la pression $P_2 = 70$ bar.
- * $D' \rightarrow E'$: échauffement isobare à P_2 du liquide dans GV, vaporisation totale isobare à P_2 dans GV, puis passage isobare dans le surchauffeur à P_2 .
- * $E' \rightarrow F'$: détente adiabatique réversible dans THP de P_2 à P_{int} . En F' l'état du système est un mélange liquide-vapeur proche de la vapeur saturante.
- * $F' \rightarrow F''$: passage dans le sécheur-surchauffeur isobare à P_{int} . En F'' l'état est de la vapeur surchauffée (sèche), proche de la vapeur saturante.
- * $F'' \rightarrow F$: détente adiabatique réversible dans TBP de P_{int} à P_1 . En F l'état est un mélange liquide vapeur.
- * $F \rightarrow A$: liquéfaction totale isobare dans le condenseur à P_1 , de la vapeur présente en F .

On a représenté la courbe de saturation sur le diagramme (P, v) sur lequel on a placé le point A :



- [70] Représenter le cycle décrit ci-dessus sur le diagramme (P, v) et placer les points B, D, D', E', F', F'' et F .
- [71] Une conséquence de l'ajout d'un surchauffeur est d'obtenir de la vapeur surchauffée au lieu de la vapeur saturante qu'on trouvait dans le cycle non optimisé du paragraphe D 3.2. L'aire du cycle est donc augmentée. Quel en est l'intérêt ?

Données :

* $h_{D'} = 510 \text{ kJ.kg}^{-1}$

* $h_{E'} = 2716 \text{ kJ.kg}^{-1}$

* $h_{F'} = 2186 \text{ kJ.kg}^{-1}$

* $h_{F''} = 2279 \text{ kJ.kg}^{-1}$

* $h_F = 1756 \text{ kJ.kg}^{-1}$

72 Exprimer littéralement en fonction des enthalpies massiques aux points D' , E' , F' , F'' et F le rendement du circuit secondaire et le calculer. Conclure.