PHYSQ 261 LEC A1 : Physique de l'énergie et de l'environnement
Automne 2013 - EXAMEN FINAL

Nom SOLUTIONS

Numéro d'étudiant ____

Professeur Marc de Montigny
Date Mardi, 10 décembre 2013, de 14 h à 17 h
Lieu CSJ MCM 366

Instructions

- Ce cahier contient **14 pages**. Vous y écrirez directement vos réponses.
- L'examen compte **40 points** et vaut **40%** de la note finale du cours.
- L'examen contient **15 questions**. Vous pouvez obtenir une partie des points même si votre réponse finale n'est pas correcte.
- Cet examen est à livre fermé. Vous pouvez utiliser l'aide-mémoire (une feuille recto-verso) que vous aurez complété. À retourner avec l'examen quand vous aurez terminé.
- Vous pouvez utiliser le verso des pages pour vos calculs. *Je ne les corrigerai pas*, sauf si vous m'indiquez de le faire.
- Matériel permis: crayons ou stylos, calculatrices (programmables et graphiques permises). Tout appareil de communication est interdit. Mettez vos téléphones cellulaires hors circuit.

Si quelque chose n'est pas clair, dites-le moi!

Question 1. [4.0 points] Efficacité thermique La centrale nucléaire de Darlington, en Ontario (ci-dessous), contient un réacteur auquel il faut fournir de la chaleur au taux de 10980 MW pour produire de l'énergie électrique au taux de 3512 MWe.

A. À quel taux, en MW, la chaleur est-elle libérée dans l'environnement ?

B. Quelle est l'efficacité thermique η de cette centrale ?

C. Si cette centrale est refroidie par une tour humide (en anglais, *wet cooling tower*), quel volume d'eau est évaporé *par jour*, si on suppose que toute la chaleur perdue par la centrale cause l'évaporation ? (Pour l'eau: densité ρ = 1000 kg/m^3, chaleur latente d'évaporation $L_V = 2.26 \times 10^6$ J/kg.)

Solution

A. $\frac{Q_c}{t} = \frac{Q_h}{t} - \frac{W}{t} = 10980 - 3512 = 7468 \text{ MW}$

B. $\eta = \frac{W}{Q_h} = \frac{3512}{10980} = \ = 32\%$

C. $Q_c = mL_V = \rho V L_V \text{ , } \quad V = \frac{\left(\frac{Q_c}{t}\right)\Delta t}{\rho L_V} = \frac{\left(7468 \times 10^6\right)\left(24 \times 3600\right)}{\left(1000\right)\left(2.26 \times 10^6\right)} = 2.86 \times 10^5 \text{ m}^3$

Question 2. [2.0 points] Coefficients de performance (COP)

A. Quel est le COP d'un climatiseur *idéal* (ci-dessous) qui refroidit l'intérieur d'une maison à 20.0 °C quand il fait 35.0 °C à l'extérieur ?

B. Pour comparer, quel serait le COP d'une pompe à chaleur *idéale* qui réchaufferait une serre à 35.0 °C quand il fait 20.0 °C à l'extérieur ?

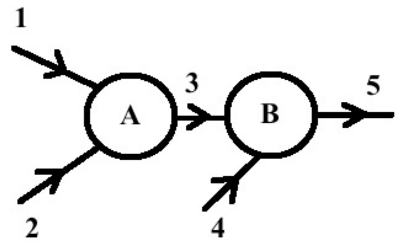
Solution

A. $COP = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} = \frac{1}{\frac{Q_h}{Q_c} - 1} = \frac{1}{\frac{T_h}{T_c} - 1} = \frac{1}{\frac{35+273}{20+273} - 1} = 19.5$

B. $COP = \frac{Q_h}{W} = \frac{Q_h}{Q_h - Q_c} = \frac{1}{1 - \frac{Q_c}{Q_h}} = \frac{1}{1 - \frac{T_c}{T_h}} = \frac{1}{1 - \frac{20+273}{35+273}} = 20.5$

Question 3. [5.5 points] Principe du bilan matières Le schéma ci-dessous représente deux lacs: A (volume 3600 m^3) et B (volume 4100 m^3). Une rivière #1 (débit 2.0 m^3/s, concentration de polluant 20 g/m^3) alimente le lac A. Une rivière #2 (débit 5.0 m^3/s, concentration 12 g/m^3) alimente aussi le lac A. Une rivière #3 relie les deux lacs. Une rivière #4 (débit 3.5 m^3/s, concentration 15 g/m^3) alimente le lac B. On suppose que l'eau s'évapore *sans polluant* du lac A à 1.2 m^3/s, et du lac B à 0.9 m^3/s. On suppose un mélange idéal dans les deux lacs. Le polluant a un taux de conversion de 2.5 hr^{-1}.

A. Quel est le début volumique dans la rivière #3 ?
B. Quel est le début volumique dans la rivière #5 ?
C. Quelle est la concentration à l'équilibre du polluant dans le lac A ?
D. Quelle est la concentration à l'équilibre du polluant dans le lac B ?



Solution

A. Pour le lac A: $Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_{EA}$, qui donne
$Q_3 = Q_1 + Q_2 - Q_{EA}$ = 2 + 5 – 1.2 = 5.8 m^3/s.

B. Pour le lac B: $Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_{EB}$, qui donne
$Q_5 = Q_3 + Q_4 - Q_{EB}$ = 5.8 + 3.5 – 0.9 = 8.4 m^3/s.

Pour les parties C et D, on utilise le taux de conversion
$\kappa = 2.5 \dfrac{1}{\text{hr}} \dfrac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} = 6.94 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ et l'équation *entrée* = *sortie* + *conversion*.

C. Pour le lac A, on a $\rho_1 Q_1 + \rho_2 Q_2 = \rho_3 Q_3 + \kappa \rho_3 V_A$ qui donne

$$\rho_3 = \frac{\rho_1 Q_1 + \rho_2 Q_2}{Q_3 + \kappa V_A} = 12.1 \text{ g/m}^3$$

D. Pour le lac B, on a $\rho_3 Q_3 + \rho_4 Q_4 = \rho_5 Q_5 + \kappa \rho_5 V_B$, ce qui donne la concentration

$$\rho_5 = \frac{\rho_3 Q_3 + \rho_4 Q_4}{Q_5 + \kappa V_B} = 10.9 \text{ g/m}^3$$

Question 4. [3.0 points] Pollution thermique La centrale thermique Kalisindh (ci-dessous), devrait être en opération en 2014 près de Jhalawar (Inde). Cette centrale produira de l'énergie au taux de 1200 MWe. Elle sera refroidie par une tour humide dont le volume d'eau évaporée par jour (en supposant que toute la chaleur perdue par la centrale soit retirée par cette évaporation) sera d'environ 82000 m^3 par jour. Quel sera le rendement η de cette centrale ? (La densité et la chaleur latente d'évaporation de l'eau valent 1000 kg/m^3 et 2.26×10^6 J/kg, respectivement.)

Solution

$\eta = \dfrac{E_{\text{élec}}}{E_{\text{élec}} + Q_{\text{perdue}}}$ avec $E_{\text{élec}}/t$ = 1200 MW = 1.20×10^9 J/s.

La chaleur perdue, qu'on suppose égale à l'évaporation de l'eau, s'écoule au taux

$$\frac{Q}{t} = \frac{mL_V}{t} = \frac{\rho V L_V}{t} = \rho \frac{V}{t} L_V = (1000)\left(\frac{82000}{24 \times 3600}\right)\left(2.26 \times 10^6\right) = 2.14 \times 10^9 \text{ J/s}$$

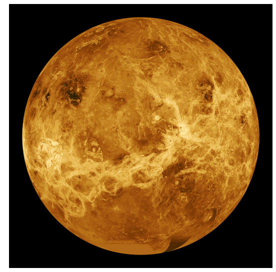
Le rendement est donc donné par

$$\eta = \frac{E_{\text{élec}}/t}{E_{\text{élec}}/t + Q_{\text{perdue}}/t} = \frac{1.20 \times 10^9 \text{ W}}{(1.20 + 2.14) \times 10^9 \text{ W}} = 0.359 = 36\%$$

Question 5. [3.5 points] Effet de serre sur Vénus Sachant que la constante solaire pour la Terre est de 1368 W/m^2, et que la distance entre le Soleil et la Terre vaut environ 1.496×10^{11} m,

A. quelle est la puissance P émise par le Soleil, en watts ?

B. En utilisant votre réponse, quelle est la constante solaire de Vénus (ci-dessous), qui est à 1.082×10^{11} m du Soleil ?



C. En considérant que votre réponse en B est l'intensité absorbée par un *disque* et redistribuée sur une *sphère*, et que l'albédo de Vénus vaut 0.75, quelle sera l'intensité réfléchie par l'atmosphère vers l'espace, en W/m^2 ?

D. Le reste de l'intensité incidente est absorbé par la planète qui émet ensuite comme un corps noir. Quelle sera donc la température de Vénus en °C ?

Solution

A. $P = I4\pi r^2 = (1368)4\pi\left(1.496\times10^{11}\right)^2 = 3.85 \times 10^{26}$ W

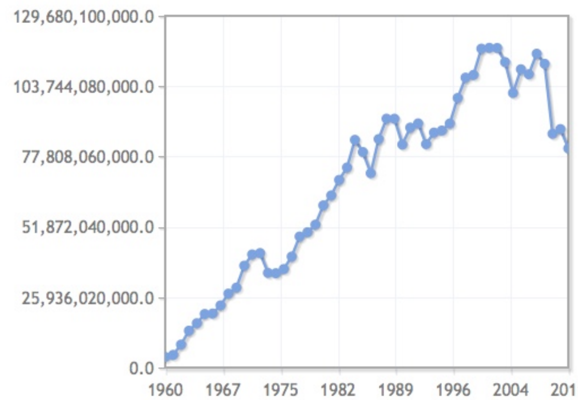
B. $I = \dfrac{P}{4\pi r^2} = \dfrac{3.85\times10^{26}}{4\pi\left(1.082\times10^{11}\right)^2} = 2615$ W/m^2

C. $\dfrac{I}{4}\alpha = \dfrac{2615}{4}(0.75) = 490$ W/m^2

D. L'intensité absorbée puis irradié est $\dfrac{I}{4}(1-\alpha) = \dfrac{2615}{4}(0.25)$ = 164 W/m^2. De la relation du corps noir, $I = \sigma T^4$, on trouve $T = \sqrt[4]{\dfrac{I}{\sigma}} = \sqrt[4]{\dfrac{164}{5.67^{-8}}}$ = 232 °K = –41 °C

Question 6. [1.5 point] Gaz à effet de serre Le schéma ci-dessous montre la production d'électricité par le charbon au Canada. En 2011, 80.812×10^9 kWh fut ainsi produit. De combien a augmenté la concentration de CO_2 atmosphérique, en ppm ou ppb, à cause de la consommation de charbon au Canada en 2011 ?

(Rappelez-vous que: 1. 25.2 Mtonnes de carbone sont émises par quad de charbon consommé (1 quad $\cong$ 293 $\times$ 10^9 kWh); 2. 48% du carbone émis est capté par l'atmosphère, et 3. 2.12 Gtonnes de carbone atmosphérique mène à une hausse de la concentration de CO_2 atmosphérique de 1 ppm.)



Solution

$$\left(80.812\times10^{9}\text{ kWh}\right)\frac{1\text{ quad}}{293\times10^{9}\text{ kWh}}\frac{25.2\text{ Mt}}{\text{quad}}0.48\frac{1\text{ ppm}}{2120\text{ Mt}} = 0.00157\text{ ppm ou }1.57\text{ ppb}$$

Question 7. [3.0 points] Puissance et résistance Considérez une ligne de transport d'énergie opérant à 10 kV. Cette ligne est faite d'un métal dont le coefficient thermique de résistivité vaut $\alpha = 3.93 \times 10^{-3}$ °C. Quand la température passe de –20 °C à 20 °C,

A. est-ce que la puissance perdue dans la ligne augmente ou diminue ?
B. De quelle pourcentage, par rapport à sa valeur initiale ?

Solution

A. On utilise $P = \frac{V^2}{R} \propto \frac{1}{R}$, et $R(T) = R_0\left[1+\alpha\left(T-T_0\right)\right]$, on voit que si T augmente, R augmente aussi, car α est positif, et la puissance diminue

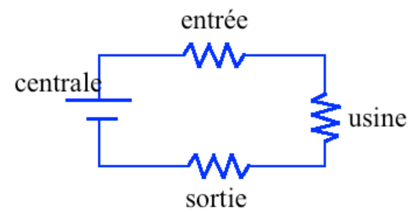
B. Si T_0 = –20 °C et T_1 = 20 °C, on a donc

$$\frac{P_1 - P_0}{P_0} = \frac{R_0 - R_1}{R_1} = \frac{-\alpha\left(T_1 - T_0\right)}{1+\alpha\left(T_1 - T_0\right)} = \frac{-(0.00393)(20-(-20))}{1+(0.00393)(20-(-20))} = -0.1358$$

diminue de 13.6%

Question 8. [2.0 points] Puissance dissipée et voltage Une usine est alimentée à 100 kW par une centrale électrique. On considère la centrale comme une source de voltage en série avec une résistance pour la ligne d'entrée , une 2è résistance pour l'usine et une 3è résistance pour la ligne de sortie, tel qu'illustré ci-dessous. Chaque ligne a une résistance de 5 ohms. Le voltage à l'usine vaut 2000 V.

A. Combien de puissance la centrale doit-elle fournir ?
B. Quelle serait la puissance fournie par la centrale si l'usine avait plutôt un voltage de 4000 V ?



Solution

A. Le courant est donné par $I = \frac{P}{V} = \frac{100000}{2000} = 50\ \text{A}$. La puissance perdue dans les deux résistances vaut donc $P_{perdue} = 2RI^2 = 2(5)(50)^2 = 25000\ \text{W}$. Ceci plus les 100000 W utilisé à l'usine donne donc 100 + 25 kW = 125 kW.

B. Le courant est donné par $I = \frac{P}{V} = \frac{100000}{4000} = 25\ \text{A}$. La puissance perdue dans les deux résistances vaut donc $P_{perdue} = 2RI^2 = 2(5)(25)^2 = 6250\ \text{W}$. Ceci plus les 100000 W utilisé à l'usine donne donc 100 + 6.25 kW = 106 kW.

Question 9. [2.5 points] Circuit à courant alternatif Un propriétaire de magasin veut utiliser sa porte tournante (à droite) comme générateur. La porte est une boucle rectangulaire de 2.0 m par 3.0 m. Il enroule 800 tours de fil autour du périmètre de la boucle. Un flot constant de clients maintient la porte en rotation à 0.25 tour/s. Le champ magnétique terrestre mesure 6.0×10^{-5} T. Le système est branché à une résistance de 0.50 Ω.

A. Quel est le maximum V_{max} du voltage ainsi généré ?
B. Quel est le voltage efficace V_{rms} ?
C. Quelle est la valeur maximale de la puissance ?
D. Quel est la puissance moyenne ?
E. Quel est le courant efficace I_{rms} ?

Solution

A. $V_{\max} = NBA\omega = (800)(6\times10^{-5})(2\times3)(0.25\times2\pi)$ = 452 mV

B. $V_{rms} = \dfrac{V_{\max}}{\sqrt{2}} =$ 320 mV

C. $P_{\max} = \dfrac{V_{\max}^2}{R} = \dfrac{0.452^2}{0.5}$ = 409 mW

D. $P_{moy} = \dfrac{1}{2}P_{\max}$ = 204 mW

E. $I_{rms} = \dfrac{P_{moy}}{V_{rms}} = \dfrac{204}{320}$ = 639 mA

Question 10. [2.5 points] Réacteurs nucléaires Un morceau de 5.00 g d'uranium-235, de section efficace σ = 582 barns (1 barn = 1×10^{-28} m^2), est bombardé de neutrons pendant 2 heures, avec une intensité de 5.00×10^{16} neutrons par s par m^2. Combien de noyaux d'uranium-235 seront transmutés en uranium-236 en captant un neutron ? (Rappel: $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ noyaux par mole)

Solution

$$\Delta N = \frac{N_a m \sigma N}{A} = \frac{\left(6.02\times10^{23}\ \text{noyaux/mol}\right)(5\ \text{g})\left(582\times10^{-28}\ \text{m}^2\right)\left(5.00\times10^{16}\ \text{s}^{-1}\text{m}^{-2}\right)}{235\ \text{g/mol}}$$
$$= 3.727\times10^{13}\ \text{s}^{-1}$$

Donc, au bout de deux heures, on aura

$$\Delta N \times t = \left(3.727\times10^{13}\ \text{s}^{-1}\right)\left(2\times3600\ \text{s}\right) = 2.68\times10^{17}\ \text{noyaux}$$

Question 11. [3.0 points] Radioactivité Lorsque des isotopes de molybdène Mo(99,42) sont produits, leur demi-vie de 65.93 h permet leur transport vers des hôpitaux, où ils seront désintégrés en technétium Tc(99,43), qui sert à marquer (*to tag*) des médicaments.

A. Quel type de désintégration produit du Tc(99,43) à partir de Mo(99,42) ?
B. Calculez la constante de désintégration λ du Mo(99,42).
C. Quel est le nombre de noyaux de Mo(99,42) requis pour avoir une activité initiale de 3.75 μCi ?
D. Quelle sera l'activité du Mo(99,42) ving-quatre heures plus tard ?

Solution

A. bêta négative : ${}^{99}_{42}\mathrm{Mo} \rightarrow {}^{99}_{43}\mathrm{Tc} + e^- + \bar{\nu}$

B. $\lambda = \dfrac{\ln 2}{T_{1/2}} = \dfrac{\ln 2}{65.93} \approx 0.0105\ \mathrm{h}^{-1}$

C. $N = \dfrac{A}{\lambda} = \dfrac{3.75\times10^{-6}\ \mathrm{Ci}}{0.0105} \dfrac{3600\ \mathrm{s}}{\mathrm{h}} \dfrac{3.7\times10^{10}\ \mathrm{s}^{-1}}{\mathrm{Ci}} = 4.75\times10^{10}$ noyaux

D. $A = A_0 e^{-\lambda t} = 3.75\mu\mathrm{Ci}\times e^{-0.0105\times24} =$ 2.91 μCi ou 1.08×10^5 dés./s

Question 12. [2.0 points] Énergie nucléaire En 2007, la consommation d'énergie dans les résidences de l'Alberta fut de 1.698×10^{17} J. Sachant que chaque fission d'uranium-235 libère 170 MeV en énergie, quelle masse d'uranium-235 aurait été requise pour fournir l'énergie consommée par l'Alberta en 2007 ?
(Noyau d'uranium: 235 u, 1 u = 1.66×10^{-27} kg)

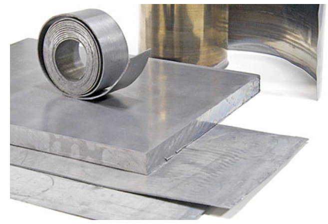
Solution

Le nombre de désintégrations requis est

$N = \dfrac{E_{\text{total}}}{E_{\text{1des}}} = \dfrac{1.698\times10^{17}\ \mathrm{J}}{170\ \mathrm{MeV}\times\left(1.6\times10^{-13}\ \mathrm{J/MeV}\right)} = 6.2426\times10^{27}$ dés. La masse requise d'uranium est donc $m = Nm_U = \left(6.2426\times10^{27}\right)\left(235\times1.66\times10^{-27}\ \mathrm{kg}\right) = 2440\ \mathrm{kg}$

Question 13. [2.0 points] Protection contre la radioactivité Un écran de plomb d'épaisseur égale à 1.0 cm réduit de moitié l'intensité initiale de rayons gamma.

A. L'intensité sera réduite à quel facteur de sa valeur initiale si l'écran a 10 cm ?
B. Quelle épaisseur sera nécessaire pour réduire l'intensité par un facteur 100 ?



Solution

On utilise $N(x) = N_0 \exp(-\mu x)$ et la donnée pour obtenir le coefficient $\mu = -\frac{1}{x}\ln\frac{N(x)}{N_0} = -\frac{1}{0.01}\ln\frac{1}{2} = 69.3\text{ m}^{-1}$. Ou, tout simplement, $\mu = \frac{\ln 2}{L_{1/2}} = \frac{\ln 2}{0.01} = 100\ln 2 = 69.3\text{ m}^{-1}$.

A. $\frac{N(0.1)}{N_0} = \exp(-69.3 \times 0.1) = 9.7 \times 10^{-4}$ ou environ 1/1000.

B. $x = -\frac{1}{\mu}\ln\frac{N(0.1)}{N_0} = -\frac{1}{69.3}\ln\frac{1}{100} = 6.6\text{ cm}$.

Question 14. [1.5 point] Dosimétrie Une plante de 125 grammes est irrradiée par des rayons bêta avec une activité de 2000 désintégrations par seconde. Quelle dose *D* (en J/kg) cette plante reçoit-elle pendant une journée si l'énergie moyenne des bêtas vaut 0.12 MeV?

Solution

L'énergie des bêtas vaut

$(2000\text{ dés/s}) \times \left(\frac{0.12\text{ MeV}}{\text{dés}} \times \frac{1.6 \times 10^{-13}\text{ J}}{\text{MeV}}\right) \times (24\text{ h} \times 3600\text{ s}) = 3.32 \times 10^{-6}\text{ J}$, de sorte la dose vaut $D = \frac{E}{m} = \frac{3.32 \times 10^{-6}\text{ J}}{0.125\text{ kg}} = 2.66 \times 10^{-5}\text{ J/kg}$

Question 15. [2.0 points] Énergie éolienne Le parc éolien Anholt, au Danemark, compte 111 turbines qui sont chacune équipée de pales (*blades*) de rayon égal à 60 m. Si la vitesse vaut environ 9.0 m/s et que la densité de l'air est égale à 1.3 kg/m^3, quelle est la puissance disponible

A. pour la limite de Betz (c.-à-d. $P_{\max}$) ?

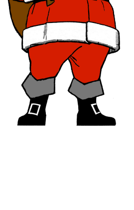
B. si l'efficacité globale $\eta\eta_e$ vaut 0.42 ?

Solutions

A. $P_{\max} = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 v^3 \frac{16}{27} = \frac{1}{2}(1.3)\pi(60)^2(9.0)^3\frac{16}{27} =$ 3.2 MW

B. $P = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 v^3 \eta\eta_e = \frac{1}{2}(1.3)\pi(60)^2(9.0)^3(0.42) =$ 2.3 MW

J'accepte aussi (111 turbines) $\times P$ qui donne A. 350 MW, B. 250 MW



Joyeux Noël !