

Contrôle continu du mardi 7 novembre 2023.

Durée : 1h15. Documents non autorisés.

Exercice I Questions de cours (10 min)

Q.1) Qu'est-ce qu'une limite planétaire ? Citez 4 exemples.

R.1) 2 pts Il s'agit d'un seuil quantitatif à ne pas dépasser pour que l'humanité puisse vivre durablement dans un écosystème sûr. Il y en a actuellement 9 : changement climatique, intégrité de la biosphère, cycles du carbone et de l'azote, changement d'usage des sols, introduction d'entités nouvelles dans l'environnement (toxiques, plastiques etc), consommation d'eau douce, concentration en aérosols, acidification des océans et diminution de l'ozone stratosphérique.

Q.2) Quelles sont les causes principales de disparition de la biodiversité ?

R.2) 2 pts Le rapport de l'IPBES en liste cinq : changement d'utilisation des terres, exploitation directe (chasse, pêche etc), changement climatique, pollutions et espèces exotiques envahissantes.

Exercice II Énergie (20 min)

Q.3) Un ou une cycliste, de masse $m = 80$ kg (vélo compris), roule à vitesse constante $v = 9$ km/h, sur une côte de pente $\alpha = 0,04$ rad (α étant faible, on prendra $\tan \alpha \simeq \sin \alpha \simeq \alpha$). Supposons qu'en côte, la principale force qui travaille est le poids : on néglige les différents frottements. Exprimer la puissance mécanique P_m fournie par notre cycliste. Faire l'application numérique.

R.3) 2 pts L'énergie cinétique étant constante, en l'absence de frottements, l'énergie mécanique à fournir (en pédalant) correspond à la variation d'énergie potentielle. La puissance fournie correspond donc à la variation par seconde de l'énergie potentielle :

$$P_m = \frac{dE_p}{dt} = \frac{d(mgz)}{dt} = mg \frac{dz}{dt} = mgv_z = mgv \sin \alpha \simeq mgv\alpha$$

A.N. $P_m = 80 \times 10 \times 2,5 \times 4 \times 10^{-2} = 80$ W

Q.4) Notre cycliste génère par ailleurs de la chaleur, évacuée principalement par transpiration. Donner un ordre de grandeur (très approximatif bien sûr) du volume de sueur généré par seconde d_v en expliquant précisément le raisonnement suivi.

On donne la chaleur latente de vaporisation de l'eau (énergie à fournir pour évaporer 1 kg d'eau) : $L_v = 2,5$ MJ/kg. En déduire un ordre de grandeur de la puissance évacuée par transpiration.

R.4) 2 pts Considérons qu'un millier de gouttes, de volume 1 mm^3 , sont générées en même temps sur toute la surface du corps et que la génération d'une goutte se fait toutes les 10 secondes : on trouve alors $d_v = 100 \text{ mm}^3/\text{s} = 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$.

Une autre façon de procéder est de penser à la quantité d'eau bu pendant/après un effort prolongé et de considérer que le même volume a été perdu par transpiration : par exemple, une bouteille de 0,5 L après un effort de 30 mn donne $d_v = 1 \text{ L/h} = 280 \text{ mm}^3/\text{s}$.

Les travaux de recherche consacrés à l'effort sportif rapportent effectivement un débit de sueur, pour un effort modéré et prolongé, de l'ordre de 1 L/h - mais nous aurions facilement, et par des estimations raisonnables et acceptables, nous tromper d'un facteur 10 ou même 100.

Il fallait utiliser la masse volumique de l'eau : $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$. La puissance cédée à la sueur pour son évaporation est donc de $d_v \rho L_v = 250 \text{ W}$.

Afin de produire de l'électricité sans émissions de CO_2 , notre cycliste décide de faire maintenant le même exercice physique (1 h par jour à la puissance P_m) sur un vélo d'appartement équipé d'un générateur qui transforme, avec une efficacité de conversion de $\simeq 100 \%$, la puissance mécanique reçue en puissance électrique.

Q.5) Quelle est, en kWh, l'énergie électrique générée par notre cycliste pendant un an ? En France, les émissions de CO_2 liées à la production électrique sont estimées à $75 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$. En déduire la masse de CO_2 dont notre cycliste a évité l'émission grâce à sa production décarbonée.

R.5) 2 pts 365 heures d'effort à la puissance 80 W fournissent 29,2 kWh d'électricité "zéro carbone". La même énergie, produite par les fournisseurs d'électricité français, mène à 2,2 kgCO_2 émis.

Q.6) Rappeler une valeur approximative de la masse totale de gaz à effet de serre émis par personne et par an en France. Conclure sur le potentiel de cette méthode.

R.6) 1 pt Les émissions de gaz à effet de serre sont, en France, d'environ $10 \text{ tCO}_2\text{e}$ par personne et par an. On voit que cette méthode, qui évite $2,2 \text{ kgCO}_2$ d'émissions par personne, a un impact très limité, d'autant qu'elle ne concerne que ceux qui s'exercent de façon intense et très régulière.

Remarque : ce raisonnement est valable à condition de négliger l'empreinte carbone de fabrication du vélo d'appartement. Elle est difficile à connaître précisément mais sans doute de l'ordre de $100 \text{ kgCO}_2\text{e}$ (pour beaucoup de biens manufacturés, l'empreinte est de l'ordre de $0,5 \text{ kgCO}_2\text{e}$ par euro de prix), donc en fait pas du tout négligeable. Il faudrait donc amortir le vélo sur un très grand nombre d'années pour que l'impact carbone de l'opération soit positif.

Exercice III Formation de nuages sur la planète Mars (15 min)

Le climat de la planète Mars est froid et hyper-aride, mais il y a suffisamment de vapeur d'eau dans l'atmosphère pour créer de fins nuages de cristaux de glace. Ces cristaux se forment dans la branche ascendante de la cellule de Hadley lors de l'été de l'hémisphère Nord. On considère une parcelle d'atmosphère humide placée en surface en un point A. *Données* : altitude $z_A = 0 \text{ km}$, $T_A = 270 \text{ K}$, $r_{vap,A} = 0.08 \times 10^{-3} \text{ kg kg}^{-1}$, $c_p = 860 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, $L_v = 2800 \text{ kJ kg}^{-1}$ et $g = 3.72 \text{ m s}^{-2}$.

Q.7) Calculer l'énergie statique humide initiale $e_{h,A}$ de la parcelle.

R.7) L'énergie statique humide s'écrit : 1 pt

$$e_h = c_p T + g z + L_v r_{vap} \quad (1)$$

Au point A : $e_{h,A} = 860 \times 270 + 0 + 2800 \times 0.08 \times 10^{-3} = 232 \text{ kJ/kg}$ 0.5 pt + 0.5 pt unité ;
Attention : r_{vap} est bien donné en kg kg^{-1} dans le sujet donc il n'y a pas de conversion à faire.

- Q.8)** En montant dans la cellule de Hadley, la parcelle, comme sur Terre, se refroidit. Expliquer quel processus physique est à l'origine de ce refroidissement.
- R.8)** La pression de l'environnement de la parcelle décroît avec l'altitude [1 pt], donc quand la parcelle monte rapidement, elle subit une détente adiabatique et un refroidissement [1 pt]. Si l'air est saturé en vapeur d'eau, la condensation (liquide ou solide) de la vapeur d'eau cède à la parcelle de l'enthalpie de changement d'état, ce qui réchauffe la parcelle. Le refroidissement adiabatique humide est donc moins fort que le refroidissement adiabatique sec.
- Q.9)** La parcelle monte et condense pour former des cristaux de glace d'eau en un point B d'altitude z_B et de température $T_B = 200$ K. En écrivant la conservation de l'énergie statique humide entre les points A et B, déterminer l'altitude du point B où se forment les nuages. *Données : $r_{vap,B} = 0 \text{ g kg}^{-1}$.*
- R.9)** Par conservation de l'énergie statique humide, on peut écrire $e_{h,B} = e_{h,A}$, donc :

$$c_p T_A + L_v r_{vap,A} = c_p T_B + g z_B, \quad (2)$$

soit, en isolant z_B : [1 pt]

$$z_B = \frac{c_p}{g}(T_A - T_B) + \frac{L_v}{g}r_{vap,A} \quad (3)$$

$$z_B = 860/3.72 \cdot (270 - 200) + 2800 \cdot 3.72 \cdot 0.08 \cdot 10^{-3} = 16 \text{ km} \quad [0.5 \text{ pt} + 0.5 \text{ pt unité}]$$

Exercice IV Bilan énergétique au dernier maximum glaciaire (30 min)

Le Dernier Maximum Glaciaire (noté DMG) est la dernière grande glaciation qu'a connue la Terre il y a environ 20000 ans. À cette époque, le Groënland, l'Amérique du Nord jusqu'à la latitude de Chicago et le nord de l'Eurasie jusqu'à la latitude de la Hollande étaient sous des calottes glaciaires de plusieurs kilomètres d'épaisseur. La glace de mer était également bien plus étendue qu'actuellement. La figure 1 donnée en annexe montre le bilan énergétique du climat au DMG (chiffres en gras) comparé à l'époque actuelle (chiffres entre parenthèses).

La Terre reçoit un éclairement instantané en incidence normale du Soleil E de 1368 W m^{-2} (parfois noté \mathcal{F}_s). Le pouvoir réfléchissant combiné de son atmosphère et de sa surface est l'albédo noté A_b . La température de la surface de la Terre est notée T_s . Le flux surfacique d'énergie solaire entrant dans le système (après retrait de la composante réfléchi par l'atmosphère et la surface) est noté F_{in} et le flux surfacique d'énergie émis par la Terre est noté F_{out} . On se placera ici toujours à l'équilibre radiatif $F_{in} = F_{out}$.

- Q.10)** Établir le bilan des flux entrant et sortant à la surface de la Terre dans le modèle à deux faisceaux. On fera l'hypothèse d'un corps noir pour l'émissance de la surface. On rappelle également qu'à la surface, l'éclairement reçu du Soleil s'écrit $F_{in} = \frac{E}{4}(1 - A_b)$. On rappelle enfin que dans le modèle à deux faisceaux, le flux surfacique infrarouge descendant s'écrit $F^-(\tau) = F_{out} \frac{\tau}{2}$ avec τ l'épaisseur optique pouvant servir de coordonnée verticale valant $\tau = 0$ au sommet de l'atmosphère et τ_s à la surface de la Terre.

- R.10)** La surface reçoit l'éclairement solaire et l'émissance infrarouge de l'atmosphère au-dessus d'elle. Elle émet également une émissance qui suit la loi de Stefan-Boltzmann à sa température [1 pt]. On a donc à l'équilibre radiatif la densité de flux reçue qui est égale à celle émise, autrement dit : [1 pt]

$$F_{in} + F^-(\tau_s) = \sigma T_s^4. \quad (4)$$

Q.11) En déduire l'expression de la température de surface T_s à l'équilibre radiatif suivante :

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{F_{\text{out}}}{\sigma} \left(1 + \frac{\tau_s}{2}\right)} \text{ avec } F_{\text{out}} = F_{\text{in}} = \frac{E}{4}(1 - A_b). \quad (5)$$

R.11) Comme $F_{\text{in}} + F^-(\tau_s) = \sigma T_s^4$ et qu'à l'équilibre radiatif $F_{\text{in}} = F_{\text{out}}$, on peut écrire :

$$F_{\text{out}} + F_{\text{out}} \frac{\tau_s}{2} = \sigma T_s^4 \quad (6)$$

d'où : 1 pt

$$F_{\text{out}} \left(1 + \frac{\tau_s}{2}\right) = \sigma T_s^4 \quad (7)$$

Au DMG, il y a 20000 ans, la température moyenne de surface était inférieure de 4°C bien que l'éclairement était similaire à celui de l'époque actuelle.

Q.12) En vous aidant des rayonnements solaires réfléchis indiqués en haut à gauche de la figure 1, calculer l'albédo A_b pour le DMG et pour l'époque actuelle.

R.12) L'albédo est par définition la fraction de l'éclairement solaire incident qui est réfléchi 1 pt. Donc pour le DMG, l'albédo vaut $A_b = 107/342 = 0.313$ 0.5 pt. Pour l'époque actuelle, $A_b = 102/342 = 0.298$ 0.5 pt

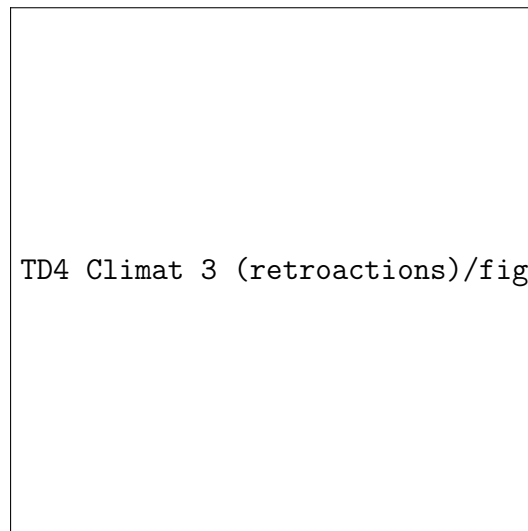
Q.13) À l'aide de l'équation 5 et de la valeur de l'albédo trouvée à la question précédente, calculer la température de surface moyenne au DMG. *Données : épaisseur optique totale infrarouge des gaz à effet de serre au DMG $\tau_s = 1.15$. Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.*

R.13) L'application numérique donne directement :

$$T_s = (1368. / 4. / 5.67E-8 * (1. - 0.313) * (1 + 1.15/2.))^{0.25} = 284 \text{ K} \quad \text{1 pt}$$

Q.14) Placer sur un diagramme de rétroaction la température de surface moyenne de la planète, la surface de glace de mer et l'albédo moyen de la planète. Indiquer le signe des couplages. Faire apparaître la boucle de rétroaction due à l'albédo de la glace de mer. Est-ce une rétroaction positive ou négative?

R.14) Le diagramme est le suivant : 0.5 pt



TD4 Climat 3 (retroactions)/fig-2PY125-alb-feedback.pdf

Le signe de la boucle de rétroaction est obtenue en multipliant le signe des couplages : c'est une boucle positive donc amplificatrice 0.5 pt

Q.15) On rappelle que l'effet de serre \mathcal{E} est défini comme étant la différence entre la densité de flux émise par la surface et celle émise au sommet de l'atmosphère :

$$\mathcal{E} = F^+(\tau_s) - F_{\text{out}} \quad (8)$$

À l'aide de la figure 1, calculer la valeur de l'effet de serre au DMG et à l'époque actuelle. Commenter.

R.15) On utilise le schéma dans l'infrarouge. Actuel : $390-240 = 150 \text{ W/m}^2$; au DMG : $371-235 = 136 \text{ W/m}^2$ 0.5 pt. On constate bien que l'effet de serre était moindre au DMG, ce qui est en accord avec une température d'équilibre de la surface inférieure en moyenne à celle de l'époque actuelle 0.5 pt.

Annexe

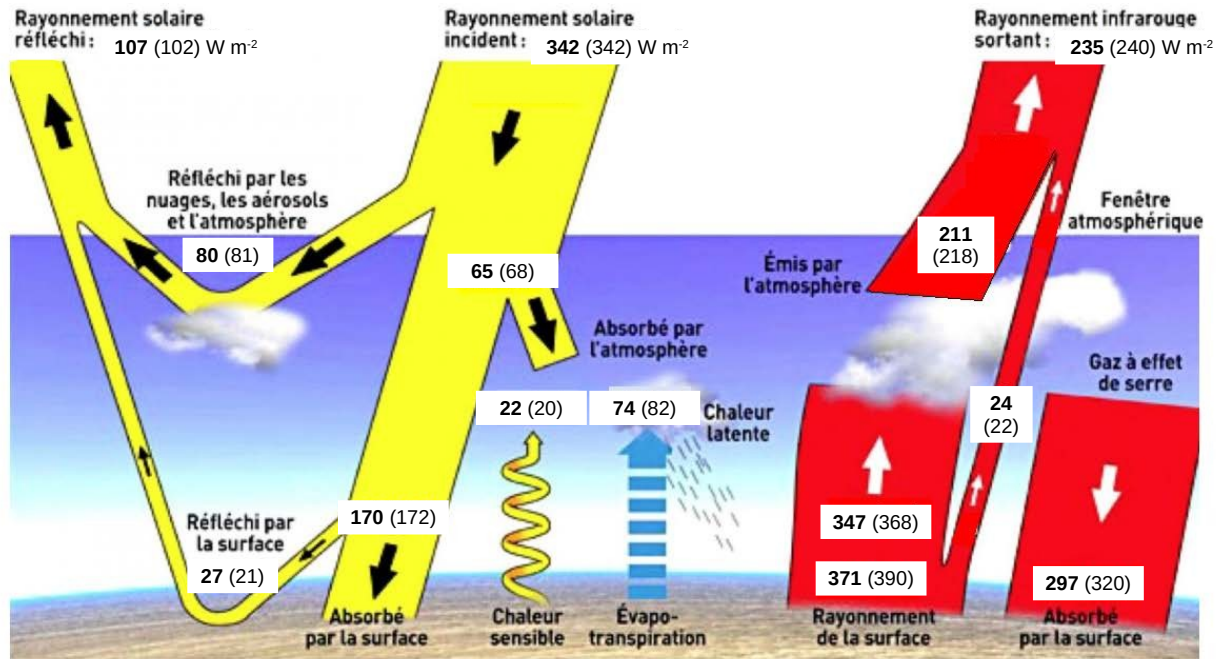


FIGURE 1 – Bilan énergétique au Dernier Maximum Glaciaire (chiffres en gras). Les chiffres de l'époque actuelle sont rappelés entre parenthèses.