

## Thermodynamique M.E.F - Epreuve de préparation à l'écrit

---

On se propose, dans ce sujet, d'aborder plusieurs questions énergétiques dans le contexte international de volonté de réduire les émissions d'origine humaine de gaz carbonique dans l'atmosphère. En particulier, nous allons étudier, par une démarche scientifique adaptée, la faisabilité de certaines solutions de remplacement du carburant pétrolier pour le transport maritime.

### PARTIE A: CONTEXTE

Un secteur d'activité humaine grand émetteur de  $CO_2$  d'origine fossile est le transport maritime. Avec le phénomène de mondialisation des échanges économiques, les flux de marchandises au travers la planète sont principalement assurés par ce mode de transport.

#### I. Un petit document à lire

Ci dessous la reproduction de l'extrait d'un article de Ouest France daté du 28 juin 2012 ([http : //www.entreprises.ouest-france.fr/node/103032](http://www.entreprises.ouest-france.fr/node/103032)).

*Transport maritime : vers la réduction des émissions de gaz à effet de serre.*

*La Commission européenne franchit une première étape dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports maritimes. Elle a en effet proposé un texte législatif qui obligera les propriétaires de grands navires faisant escale dans les ports de l'Union européenne à surveiller et à déclarer les émissions annuelles de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) de leurs navires. Les émissions du transport maritime international représentent aujourd'hui 3 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) et 4 % des émissions de GES de l'Union européenne. Faute de mesures, elles devraient augmenter sensiblement à l'avenir, à l'instar des volumes d'échange entre tous les continents. Le règlement proposé vise donc à créer un cadre juridique à l'échelle de l'Union Européenne qui s'appliquera à la collecte et à la publication des données annuelles vérifiées relatives aux émissions de  $CO_2$  de tous les grands navires (d'une jauge brute supérieure à 5 000) faisant escale dans les ports de l'UE, indépendamment du lieu où ils sont immatriculés. Les armateurs seront tenus de surveiller et de déclarer les quantités vérifiées de  $CO_2$  émises par leurs grands navires qui effectuent des voyages à destination et en provenance de ports de l'UE, ainsi qu'entre ses ports. Ils devront également fournir d'autres informations, comme les données permettant de déterminer l'efficacité énergétique des navires. Un document de conformité délivré par un vérificateur indépendant devra être conservé à bord des navires et fera l'objet des inspections menées par les autorités des États membres. Il est proposé que ces règles s'appliquent à compter du 1er janvier 2018. Cette proposition va être examinée par le Parlement européen et le Conseil, dont l'accord est requis pour que le texte législatif soit adopté.*

**I.1.** Décrire en quelques mots (100 maximum) le phénomène appelé "effet de serre".

**I.2.** Quel est le gaz dans l'atmosphère terrestre qui est responsable de la quasi totalité de cet effet.

**I.3.** Expliquer, alors, pourquoi l'attention se porte sur les émissions de gaz carbonique ( $CO_2$ ) issu de la combustion de carburants fossiles.

**I.4.** Qu'est ce qu'un carburant qualifié de fossile ? Comment le définiriez vous à un élève curieux de ce terme qu'il aura appris en Sciences de la Vie et de la Terre ?

## II. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire a une importance fondamentale dans l'effet de serre. Etudions rapidement quelques unes de ses propriétés. On considère que le Soleil se comporte comme un corps noir à la température  $\Theta_S$ , température de surface du Soleil.

**II.1.** Proposer une expérience permettant de déterminer la température  $\Theta_S$  de la surface du Soleil. (réponse en 100 mots maximum).

**II.2.** Cette expérience conduit à une valeur de  $\Theta_S$  égale environ à  $\Theta_S = 5800$  K.

**II.2. a.** Calculer la puissance  $P_S$  rayonnée par le Soleil.

**II.2. b.** Calculer la puissance  $P_r$  reçue par la Terre de la part du Soleil.

**II.2. c.** A partir de vos connaissances, proposer une valeur de la température moyenne de la surface de la Terre, puis calculer la puissance  $P_T$  rayonnée par la Terre (la Terre étant assimilée à un corps noir).

**II.3.** Comparer la puissance reçue par la Terre et celle rayonnée par la Terre. Vos commentaires porteront sur deux points :

- la Terre est-elle en équilibre thermique ?
- dans le bilan de puissance échangé par la Terre, a-t-on oublié des contributions importantes ? Si oui, lesquelles ?

**II.4.** La puissance moyenne rayonnée par le Soleil est telle qu'au niveau de la surface de la Terre, la puissance moyenne absorbée par unité de surface de la Terre est  $\Phi'_r = 2,4.102 \text{ W.m}^{-2}$ . En déduire l'albédo moyen  $A$  de la Terre ? (L'albédo mesure la fraction de l'énergie solaire réfléchi par la surface de la Terre).

## PARTIE B: ORDRES DE GRANDEUR DES PHÉNOMÈNES EN JEU

Il est proposé, ici, deux méthodes pour trouver l'ordre de grandeur de la consommation d'un navire en régime de croisière - sans faire du tout de mécanique des fluides - mais simplement de l'analyse énergétique et dimensionnelle. Puis une discussion sur les ordres de grandeurs numériquement extraits. D'un point de vue mathématique, les calculs ne font intervenir rien d'autre que les quatre opérations algébriques élémentaires.

### I. Expression de la puissance du moteur

On considère, qu'en régime de croisière (hors phases d'accélération), le navire, pour se déplacer, doit mettre en mouvement l'eau qui est devant lui et donc la faire passer de la vitesse nulle à la vitesse  $v_n$  du navire.

**I.1.** Définir le terme "ordre de grandeur", comme vous pourriez le faire à un élève qui poserait la question.

**I.2. Par une analyse énergétique :** Considérons que la coupe transverse du navire est un rectangle de hauteur  $h$  (profondeur de flotaison du navire) et de largeur  $L$  (largeur du navire). Cette coupe définit une surface  $S = h \times L$ . Le navire se déplace à la vitesse  $v_n$ .

**I.2. a.** Faire deux schémas rapides du bateau, reportant ces dimensions : une vue de face, une vue de

profil.

**I.2. b.** Pendant un laps de temps  $\delta t$ , exprimer la quantité d'eau  $\delta m$  déplacée à l'avant du navire en fonction de  $\delta t, h, L, v_n$  et  $\rho_0$  la masse volumique de l'eau.

**I.2. c.** En supposant que cette masse d'eau passe de la vitesse nulle à la vitesse  $v_n$  pendant ce laps de temps, en déduire l'expression de sa variation d'énergie cinétique  $\Delta E_c$  en fonction de  $\delta t, h, L, v_n$  et  $\rho_0$ .

**I.2. d.** Supposant que le moteur du bateau a pour seule fonction de faire avancer le navire, en déduire l'expression littérale de la puissance mécanique  $P_M$  que doit fournir le moteur du navire pour qu'il avance.

**I.3. Par une analyse dimensionnelle.** L'analyse physique de l'environnement du bateau nous amène à faire l'hypothèse que les quantités physiques intervenant dans la puissance du moteur  $P_M$  sont uniquement  $\rho_0, L, h, v_n$ . L'hypothèse est faite que l'on peut chercher  $P_M$  sous la forme :

$$P_M = L^\alpha h^\beta \rho_0^\gamma v_n^\mu$$

expression dans laquelle  $\alpha \beta \gamma \mu$  sont les inconnues que nous allons déterminer.

**I.3. a.** De façon générale, exprimer la dimension d'une puissance  $[P]$  en fonction des dimensions  $[T]$  de temps,  $[L]$  de longueur, et  $[M]$  de masse.

**I.3. b.** Exprimer la dimension de  $P_M$ , notée  $[P_M]$ , en fonction de  $\alpha \beta \gamma \mu$  et  $[T], [L], [M]$ .

**I.3. c.** déduire des deux questions précédentes que

$$\alpha = \beta = 1 \text{ et } \gamma = 1 \text{ et } \mu = 3$$

**I.3. d.** En déduire que

$$P_M = \kappa L h \rho_0 v_n^3$$

où  $\kappa$  est une constante adimensionnée

**I.3. e.** Comparer cette expression avec celle obtenue dans la question précédente.

## II. Application numérique

Le pétrole est très largement utilisé comme source primaire d'énergie. Il en a résulté une nouvelle unité d'énergie, la tonne d'équivalent pétrole (ou tep). Elle correspond à l'énergie dégagée par combustion d'une tonne de pétrole, en moyenne. Une valeur arrondie de cette unité est la suivante :

$$1 \text{ tep} = 42 \text{ GJ}$$

Le navire utilise du fuel lourd comme carburant de son moteur thermique. On admet pour se simplifier les calculs qu'une tonne de fuel lourd produit une énergie de 1 tep lorsqu'il brûle.

**II.1.** En vous aidant des données utiles (dont certaines peuvent être trouvées dans l'annexe « données numériques » en fin d'énoncé) et en explicitant votre démarche, retrouver un ordre de grandeur de la valeur arrondie de la tonne d'équivalent pétrole ; on veillera à commenter le résultat obtenu.

### II.2. Consommation horaire du porte container

**II.2. a.** Considérant que le bateau se déplace à 7 nœuds, évaluer numériquement la puissance mécanique

$P_M$  du moteur du bateau.

**II.2. b.** Le moteur du navire a un rendement  $r \sim 40\%$ . En déduire la puissance calorique  $P_Q$  que doit recevoir le moteur diesel pour pouvoir fonctionner.

**II.2. c.** En déduire la valeur numérique de la consommation horaire d'un porte container en régime de croisière.

**II.2. d.** La comparer avec une consommation habituelle d'un moyen de transport d'un particulier. Commenter.

**II.3.** Dans notre modèle de calcul de  $P_M$ , la longueur du navire n'intervient pas. Grâce à ce petit modèle expliquer pourquoi les bateaux marchands sont de plus en plus longs mais pas de plus en plus larges.

### PARTIE C: SOLUTIONS ALTERNATIVES, ALTERNATIVES ET COMPAGNIE.

Etant donné que la température de l'eau de océans est stratifiée (autour de  $20^\circ\text{C}$  en surface et autour de quelques degrés C en profondeur), il est possible théoriquement de faire fonctionner une machine ditherme motrice entre ces deux réservoirs de température. Nous allons dans cette partie étudier cette solution.

#### I. Généralités sur les moteurs thermiques

**I.1.** Proposer en quelques lignes une définition du mot chaleur (ou transfert thermique).

**I.2.** Proposer en quelques lignes une réponse à donner à un élève de classe terminale scientifique qui a rencontré dans un article de vulgarisation le terme entropie et souhaite connaître le sens de ce mot.

**I.3.** Montrer, en appliquant le premier et le second principe de la thermodynamique, qu'une machine thermique, fonctionnant sur un cycle, en contact avec une seule source de chaleur ne peut pas être un moteur. On fera un schéma explicatif montrant le système étudié en contact avec un réservoir de température,  $R_0$  et un organe mécanique  $\Gamma$ .

#### **I.4. Rendement d'un machine cyclique motrice ditherme**

**I.4. a.** Rappeler (ou redémontrer si besoin) l'inégalité de Clausius-Carnot reliant les quantités de chaleur  $Q_0$  et  $Q_1$  échangées par le système pendant un cycle et les températures  $T_0$  et  $T_1$  des deux réservoirs de température.

**I.4. b.** Rappeler et discuter la définition du rendement  $r$  de la machine motrice.

**I.4. c.** Dans le cas où le cycle subi par le système est composé uniquement de transformations quasi-statiques, donner l'expression du rendement idéal, appelé rendement de Carnot, noté  $r_c$ , en fonction de la température froide  $T_0$  et de la température chaude  $T_1$ .

#### II. Moteur de Stirling idéal

Dans son principe, le moteur de Stirling est le candidat idéal pour fonctionner entre les deux sources de températures constituées par l'eau de surface (réservoir chaud) et l'eau des profondeurs (réservoir froid). En effet ce moteur est constitué d'un gaz enfermé dans une enceinte étanche, qui constitue donc un système fermé. Les échanges de chaleur se font avec des réservoirs de température qui peuvent être de n'importe quelle nature. C'est son gros intérêt par rapport au moteur à combustion, la source chaude est extérieure au moteur. On essaie donc de dimensionner un moteur de Stirling qui fonctionnerait entre la source chaude ( $R_1$  constituée par l'eau de surface à  $\Theta_1 = 27^\circ\text{C}$ ) et la source froide ( $R_0$  constituée par

l'eau de profondeur à  $\Theta_0 = 7^\circ \text{C}$ ).

Le moteur fonctionne sur quatre branches principales de transformations de l'air contenu dans l'enceinte. Ces quatre transformations sont modélisées de la façon suivante, par quatre transformations quasi-statiques :

1. Le gaz est comprimé de façon isotherme à la température  $\Theta_0$  du volume initial  $V_0$  à un volume  $V_1$  fixé à la construction.
2. Le gaz est chauffé de façon isochore jusqu'à la température  $\Theta_1$ .
3. Le gaz est détendu de façon isotherme, jusqu'au volume initial  $V_0$ .
4. Le gaz est refroidi de façon isochore jusqu'à la température  $\Theta_0$ .

Le Gaz est considéré comme parfait, de capacités calorifiques molaires  $c_v$  et  $c_p$ . Le rapport  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  vaut 1,4. L'enceinte contient  $n$  moles, qui est la quantité que nous cherchons à dimensionner pour que le moteur fonctionne.

**II.1.** Dans un diagramme  $P(V)$ , tracer ce cycle en notant par les lettres  $A, B, C$  et  $D$  les quatre points remarquables.

**II.2.** Exprimer littéralement l'état du gaz, en chacun de ces points, en fonction, entre autres, de  $\chi = \frac{P_1}{P_0}$ .

**II.3.** Exprimer littéralement le travail échangé par le gaz sur chacune des 4 branches du cycle, en fonction, entre autres, de  $\chi = \frac{P_1}{P_0}$  et de  $\gamma$ .

**II.4.** Exprimer littéralement la chaleur échangée par le gaz sur chacune des 4 branches du cycle, en fonction, entre autres, de  $\chi = \frac{P_1}{P_0}$  et de  $\gamma$ .

**II.5. Application numérique d'ordre de grandeur**

On revient sur les applications numériques du moteur diesel étudié dans la partie "Ordres de grandeur des phénomènes en jeu", et on essaie de dimensionner  $n$  du moteur de Stirling qui pourrait remplacer le moteur diesel. un cycle moteur dure un laps de temps  $\delta t_c = 1$  s. En effet ces très gros moteurs tournent plutôt très lentement (à cause des contraintes mécaniques de la masse des pièces en mouvement). On fait donc l'hypothèse que le moteur de Stirling tournerait à la même vitesse

**II.5. a.** Dans le cas d'un cycle "idéal" (toutes les transformations sont quasi-statiques), calculer numériquement les chaleurs échangées  $Q_0$  et  $Q_1$  ainsi que le travail  $W$ , que devrait échanger ce moteur de Stirling durant un cycle, s'il devait remplacer un moteur diesel de porte-conteneur.

**II.5. b.** En déduire le nombre de moles  $n$ .

**II.5. c.** Dans l'état de départ du cycle, le gaz est proche des conditions de températures et pression atmosphériques. En déduire numériquement l'ordre de grandeur du volume de l'enceinte du moteur de Stirling.

**II.5. d.** En déduire les dimensions du cylindre de ce moteur.

**II.5. e.** Conclure sur la faisabilité du remplacement de moteur diesel par un moteur Stirling.

### III. Moteur électrique

Une autre solution pour remplacer le moteur diesel (ou l'assister) serait d'utiliser un système de moteur électrique. La difficulté de mise en œuvre est alors la production d'électricité et son stockage. Ainsi l'idée

serait de stocker l'électricité dans des batteries. Pour produire cette électricité, l'immense surface du porte container peut être tapissée de cellules photovoltaïques.

**III.1.** En utilisant vos connaissances, le tableau numérique proposé, et le fait que le rendement de conversion des cellules photovoltaïques est de l'ordre de 10% estimer l'ordre de grandeur de la surface de panneaux solaires qu'il faudrait utiliser sur le porte-container pour que l'électricité produite puisse faire tourner les moteurs électriques.

**III.2.** En prenant pour modèle une batterie classique de voiture (plomb, acide sulfurique) d'une capacité de charge de 40 A.h, estimer le volume de batteries qu'il faudrait pour assurer l'autonomie de navigation du navir pendant tout la nuit (12 heures). Estimer le poids que cela représente.

**III.3.** Commenter et conclure.

— Fin —

#### PARTIE D: ANNEXE - DONNÉES NUMÉRIQUES ET FORMULAIRE

Célérité de la lumière :  $c = 299792458 m.s^{-1}$  ; on prendra  $c = 3,00.108 m.s^{-1}$  Constante de Planck :  $h = 6,62.10^{-34} J.s$

Constante de Stefan :  $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$

Charge élémentaire :  $e = 1,60.10^{-19} C$

Constante d'Avogadro :  $N_A = 6,02.1023 mol^{-1}$  ; Constante de Boltzmann :  $k_B = 1,38.10^{-23} J.K^{-1}$

Energies de liaison ( en kJ.mol<sup>-1</sup>) :  $H - O : 459$  ;  $O = O : 494$  ;  $C = O : 799$  ;  $C - H : 411$  ;  $C - C : 346$ .

Rayon du Soleil :  $R_S = 7,0.10^5$  km

Distance Terre-Soleil :  $D = 1,5.10^8$  km (= 1 unité astronomique) ; Rayon (moyen) de la Terre  $R_T = 6,4.10^3$  km

Loi de Wien : La longueur d'onde  $\lambda_m$  du maximum de l'émissivité spectrale du corps noir à la température T est inversement proportionnelle à la température T.

On a :  $\lambda_m T = 2898 \mu m.K$ . Loi de Stefan : La puissance rayonnée par unité de surface d'un corps noir de température T est

$$P_r = \sigma.T^4$$

(où  $\sigma$  est la constante de Stefan :  $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ ).