



CONCOURS D'ENTRÉE CYCLE INGENIEUR

OPTION : PHYSIQUE

Samedi 16 Avril 2016

Durée : 2 Heures

Durée : 2 heures

L'usage de la calculatrice n'est pas autorisé.

L'énoncé de cette épreuve comporte 6 pages.

Quelques exemples d'utilisation de l'énergie solaire

Le sujet comporte deux parties indépendantes. Tout résultat fourni par l'énoncé peut être utilisé par la suite même s'il n'a pas été obtenu par le candidat. La calculatrice étant interdite pendant cette épreuve, les résultats numériques seront donnés avec un à deux chiffres significatifs à l'initiative du candidat.

A Utilisation d'une lentille

Questions préliminaires : conducteur thermique unidimensionnel

On considère un conducteur thermique cylindrique de longueur L , de section S constante, d'axe Ox . La température T en un point du cylindre ne dépend que de l'abscisse x et du temps t . Un transfert d'énergie thermique s'effectue dans le cylindre. Les parois latérales sont supposées être isolées thermiquement.

On notera λ la conductivité thermique du matériau constituant le cylindre, c sa capacité thermique massique et ρ sa masse volumique. On notera $\vec{j} = j\vec{e}_x$ le vecteur densité de courant thermique, \vec{e}_x désignant le vecteur unitaire de l'axe Ox .

- A.1** Rappeler la loi de Fourier dans le cas unidimensionnel. On rappellera les unités de la conductivité thermique λ et de la densité de courant thermique.
- A.2** Faire un bilan d'énergie en considérant une tranche d'épaisseur dx et en déduire l'équation de la chaleur. On fera un schéma.
- A.3** À l'aide de l'équation précédente, indiquer comment déterminer la durée correspondant à un transfert thermique sur une longueur L .
- A.4** On se place en régime stationnaire. Les extrémités du cylindre sont maintenues à températures constantes de sorte que $T(0) = T_1$ et $T(L) = T_2$. Donner les expressions de $T(x)$ et j .

Inflammation d'une feuille de papier

La légende veut que lors de l'attaque de la ville de Syracuse en 212 av. J.-C. par la flotte romaine, l'utilisation de miroirs conçus par Archimède ait permis d'enflammer les voiles des navires en concentrant sur eux la lumière du Soleil. Cependant, les difficultés pratiques liées à la mise en œuvre de tels miroirs au cours d'une bataille laissent de sérieux doutes sur l'authenticité de cet épisode.

Il est néanmoins possible de réaliser à plus petite échelle une expérience similaire, en utilisant simplement une loupe et une feuille de papier. En concentrant les rayons du soleil sur le papier, la température de la zone éclairée augmente. Le papier s'enflamme spontanément si la température

atteint une valeur appelée température d'auto-inflammation.

On s'intéresse dans cette partie à différents phénomènes physiques susceptibles d'intervenir lors de l'inflammation d'une feuille de papier avec une loupe.

On dispose des données suivantes :

- L'irradiance, c'est à dire la puissance par unité de surface, maximale du rayonnement solaire arrivant au sol par temps clair vaut : $F = 1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.
- Le diamètre angulaire α du soleil est de $0,5^\circ$
- Caractéristiques génériques du papier :
 - température d'inflammation du papier 230°C
 - capacité thermique massique du papier : $c = 2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 - épaisseur de la feuille : $e = 0,1 \text{ mm}$
 - masse volumique $\rho = 0,7 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 - conductivité thermique : $\lambda = 0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Caractéristiques de la loupe :
 - lentille convergente de focale $f = 20 \text{ cm}$
 - diamètre 6 cm

A.5 Quelle est la taille de l'image du soleil formée par la loupe ?

La combustion du papier se produit lorsque sa température atteint une valeur appelée température de combustion spontanée. Pour le papier, elle est proche de 230°C . La partie du papier chauffée par le rayonnement solaire est également susceptible de perdre de l'énergie thermique. On considère les différents modes par lesquels ces fuites énergétiques sont possibles :

- Le rayonnement : la puissance thermique rayonnée par un corps à la température T est décrite par la loi de Stefan : $P_r = \sigma S_r T^4$ où $\sigma = 6 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan et S_r la surface du corps (usi = système international d'unités).
- La convection : la puissance thermique échangée par le mouvement d'ensemble de l'air de température T_0 au voisinage de la zone chauffée. On supposera que cet échange est décrit par la loi de Newton : $P_c = h S_c (T - T_0)$ où h est une constante appelée coefficient de transfert et S_c la surface du corps considéré en contact avec l'air. On donne $h = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.
- La diffusion thermique qui se produit dans la feuille.

A.6 Estimer la puissance reçue par le papier au niveau de la tache formée par la loupe.

A.7 Il est conseillé de noircir au crayon la partie du papier sur laquelle la lumière est concentrée. Expliquer pourquoi.

A.8 Donner les unités de la constante de Stefan et du coefficient de transfert.

A.9 Montrer à l'aide d'un bilan d'énergie que l'on peut écrire :

$$\rho c e S \frac{\partial T}{\partial t} = P_{\text{reçue}} - A T^4 - B(T - T_0) + C \frac{\partial T}{\partial r}$$

On donnera les expressions des coefficients A , B et C . On précisera la signification de chacun des termes de cette équation.

A.10 Donner une estimation numérique des valeurs maximales des termes $A T^4$, $B(T - T_0)$ et

$$C \frac{\partial T}{\partial r}.$$

En déduire le temps nécessaire pour atteindre la température d'auto-inflammation du papier. Commenter.

- A.11** Les relations précédentes ont été obtenues en supposant que l'énergie restait confinée au niveau de la tache lumineuse formée sur le papier. Vérifier que cette hypothèse est bien compatible avec le résultat de la question précédente.

B Étude d'une centrale solaire

Les centrales thermiques solaires n'ont longtemps existé que sous forme de projets de recherche ou de prototypes de démonstration. Cependant, depuis une dizaine d'année des centrales solaires commerciales ont été mises en œuvre. La première centrale solaire commerciale, la centrale PS10 (Planta Solar 10), a été mise en service en 2007 en Espagne. Elle a une capacité de production de 11 MW. Depuis, d'autres centrales solaires ont été mises en service dans de nombreux pays : Espagne, Allemagne, États-Unis, Turquie, Chine, Inde...

Vue aérienne de la centrale solaire d'Ivanpah
(Photo : Craig Butz - Wikipedia – licence Creative Commons)

La plus grande centrale solaire actuellement en service est la centrale d'Ivanpah, située en Californie dans le désert de Mojave près de Las Vegas. Elle génère 392 MW d'électricité à partir de trois tours solaires sur un site de 1400 ha. Chaque tour reçoit la lumière du soleil concentrée par des miroirs appelés héliostats. L'énergie reçue est utilisée pour chauffer de l'eau dans les évaporateurs situés au sommet des tours. La température de celle-ci atteint près de 600°C. L'eau est utilisée en circuit fermé. Le refroidissement de la vapeur, après passage dans la turbine, s'effectue avec des condenseurs à air.



Ce système de refroidissement permet à la centrale de ne consommer que très peu d'eau par rapport aux autres centrales thermiques.

Questions de thermodynamique

On considère le cycle d'une machine thermique ditherme durant lequel un fluide échange de l'énergie thermique avec deux thermostats de température T_C (source chaude) et T_F (source froide) ainsi qu'un travail W avec le milieu extérieur.

- B.1** En se plaçant dans l'hypothèse où les variations d'énergie potentielle et d'énergie cinétique sont négligeables, énoncer le premier principe de la thermodynamique des systèmes fermés.
- B.2** Que dire de la variation d'énergie ΔU d'une machine thermique au cours d'un cycle .
- B.3** Retrouver l'inégalité de Clausius pour une machine thermique ditherme.
- B.4** Définir le rendement d'un moteur thermique. Retrouver l'expression du rendement maximum.
- B.5** Rappeler très brièvement le principe de fonctionnement d'une centrale électrique thermique.

Dimensionnement de la centrale solaire d'Ivanpah

- B.6** En supposant que la centrale produise de l'électricité pendant 30 % de l'année, donner la puissance électrique moyenne produite par la centrale en TWh/an.

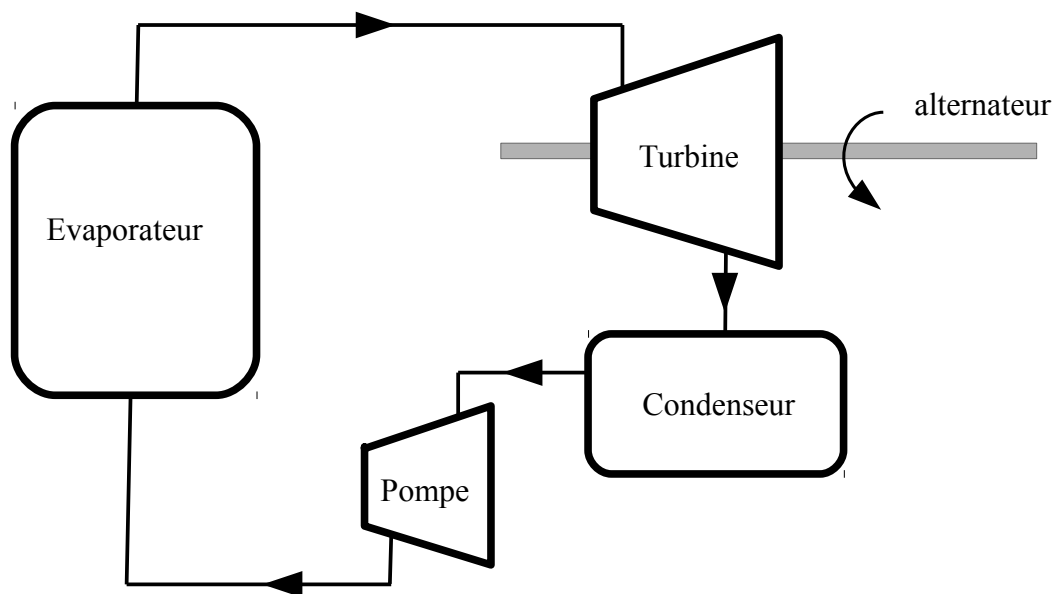
B.7 Montrer à l'aide de considérations géométriques simples que l'énergie moyenne reçue en 24h sur une surface horizontale S s'écrit :
$$E_{\text{jour}} = \int_{\text{jour}} F S \cos \theta \cdot dt$$
 où t est le temps, θ l'angle que fait le soleil avec la verticale locale et F l'irradiance solaire maximale.

En déduire que l'irradiance moyenne sur 24h est de l'ordre de $0,3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

B.8 En prenant en compte les différentes pertes thermiques (réflexion, radiation ...), on estime que seule 50 % de la puissance solaire est effectivement disponible au niveau des tours. En utilisant le fait que le rendement de la centrale est proche de 30 %, déterminer la puissance thermique moyenne nécessaire au fonctionnement de la centrale d'Ivanpah. En déduire la surface nécessaire en hectare ($1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$) au fonctionnement de la centrale.

Étude du cycle simplifié du cycle thermodynamique de la centrale

Le circuit de la centrale thermique comporte un générateur de vapeur, une turbine, un condenseur et une pompe qui permet la circulation de l'eau. On modélise les évolutions thermodynamiques de l'eau par un cycle de Rankine.



Les transformations subies par l'eau dans le cycle de Rankine sont décrites ci-dessous :

- $A \rightarrow B$: évolution isobare à la pression P_1 de l'eau dans le condenseur vers l'état de liquide saturant par échange thermique avec l'air.
- $B \rightarrow C$: passage dans la pompe. L'eau, après une compression adiabatique réversible, atteint la pression P_2 .
- $C \rightarrow D$: passage dans l'évaporateur qui porte l'eau de façon isobare à l'état vapeur à la température T_2 .
- $D \rightarrow A$: détente adiabatique réversible dans la turbine de la pression P_2 à la pression P_1 .

On indique par ailleurs que les turbines des centrales thermiques ne fonctionnent correctement que si la proportion de vapeur dans le fluide est supérieure à 90 %.

Le cycle correspondant est représenté sur la figure donnée en annexe.

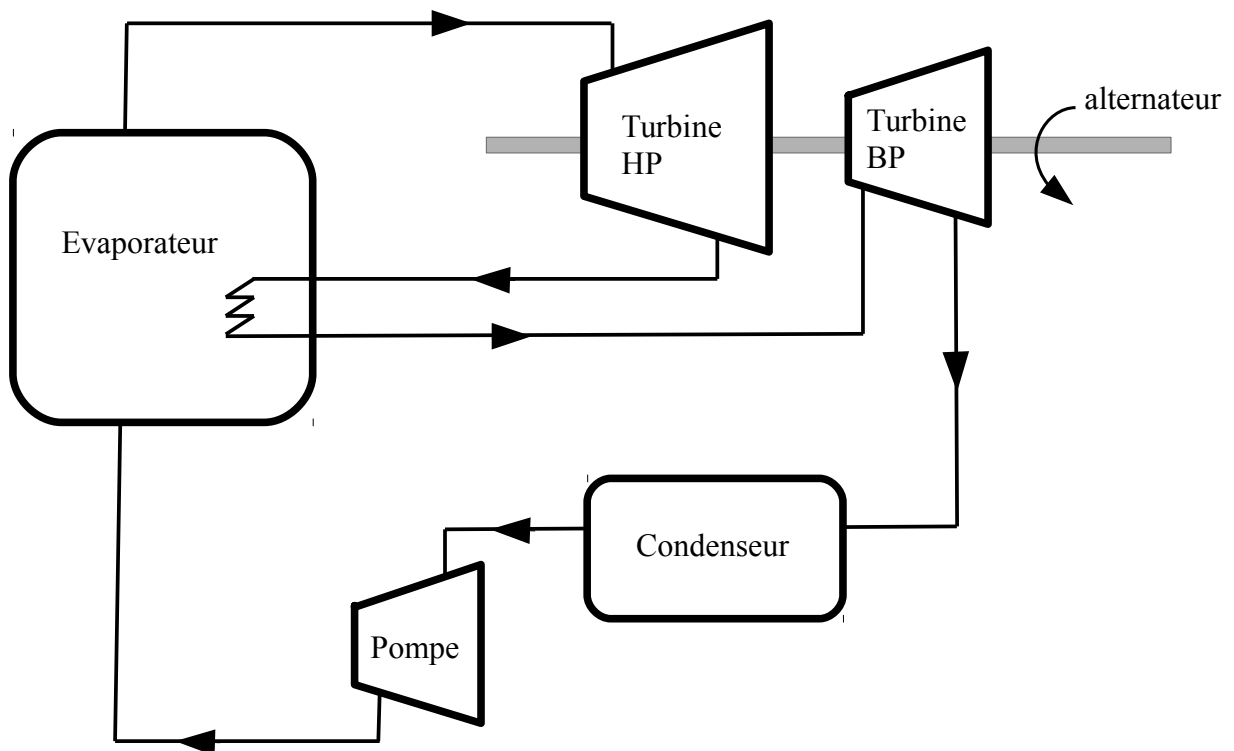
B.9 Écrire le premier principe de la thermodynamique des systèmes ouverts.

On supposera dans la suite que les variations d'énergies potentielle et cinétique massiques sont faibles devant les variations d'enthalpie massique du fluide.

- B.10** Identifier sur le diagramme donné en annexe les états A, B, C et D. Préciser l'état physique de l'eau, la pression et la température de l'état correspondant. En cas de mélange diphasique, indiquer la fraction massique de liquide correspondante.
- B.11** Déterminer pour chacune des transformations le travail massique et le transfert thermique massique reçus par le fluide.
- B.12** Calculer l'efficacité thermodynamique de ce cycle. Comparer la valeur du rendement du cycle avec le rendement de Carnot. Commenter.
- B.13** Le cycle présenté ici n'est pas exploité en pratique. Quelle difficulté rend ce cycle inutilisable concrètement ?

Pour pallier le problème associé au cycle précédent, on utilise en pratique le cycle de Rankine avec resurchauffe. Deux turbines sont utilisées au cours de ce cycle :

- Une turbine haute pression permet au cours d'une transformation adiabatique réversible de passer de la vapeur d'eau à l'état de vapeur saturante (État E)
- La vapeur est alors chauffée de façon isobare à la température T_2 en passant une nouvelle fois dans l'évaporateur (État F).
- Elle est ensuite injectée dans la deuxième turbine (la turbine basse pression) où elle suit une nouvelle transformation adiabatique réversible jusqu'à la pression P_1 (État A').



- B.14** Représenter sur le diagramme donné en annexe, le cycle de Rankine avec resurchauffe. On indiquera la position des états E, F et A'.
- B.15** Quel est le transfert thermique massique total reçu de la source chaude ? Quel est le travail massique fourni à la turbine ? En déduire le rendement du cycle. Le problème soulevé à la question **B.13** a-t-il été résolu ?
- B.16** Connaissant le rendement global de la centrale (donné à la question **B.8**), déterminer le débit massique du circuit d'eau associé à une tour.

CANDIDAT N° :

