



DEVOIR SURVEILLÉ 10 – PHYSIQUE-CHIMIE

D.Malka – MPSI 2016-2017 – Lycée Saint-Exupéry

16.06.2017

Durée de l'épreuve : 3h00

L'usage de la calculatrice est autorisé.

L'énoncé de ce devoir comporte 5 pages.

- Si, au cours de l'épreuve, vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, signalez le sur votre copie et poursuivez votre composition en expliquant les raisons des initiatives que vous êtes amené à prendre.
- Il ne faudra pas hésiter à formuler des commentaires. Le barème tiendra compte de ces initiatives ainsi que des qualités de rédaction de la copie.
- La numérotation des exercices doit être respectée. Les résultats doivent être systématiquement encadrés.
- Les pages doivent être numérotées de la façon suivante : n°page courante/nombre total de pages.

Problème 1 – Cycle de fonctionnement d'une centrale nucléaire du futur

Les centrales nucléaires de la génération 6 prévues vers les années 2030 devront être sûres et présenter un rendement important. Une option étudiée parmi 6 grands choix est le réacteur à très haute température refroidi à l'hélium. Ce type de réacteur offrirait l'avantage d'améliorer l'efficacité de la conversion énergétique, compte tenu de la température élevée de la source chaude et de permettre en sus la production d'hydrogène. Dans ces installations de forte puissance, on utilise le cycle de Brayton (ou cycle de Joule) pour extraire le travail et, en fin de compte, produire de l'électricité.

Dans ce problème, on cherche à évaluer l'efficacité du cycle moteur.

Le gaz utilisé dans la centrale est l'hélium, dont les caractéristiques sont :

- $C_{V,m} = 3R/2$, $C_{P,m} = 5R/2$ avec $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$. On pose $\gamma = \frac{C_{P,m}}{C_{V,m}}$.
- $M_{He} = 4,00.10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$.
- Dans l'ensemble du problème, le gaz est supposé obéir au modèle du gaz parfait. Le fluide ne subit aucune transition de phase.

Rappel :

- La variation d'entropie molaire du gaz parfait entre deux états A et B s'écrit :

$$\Delta S_m = C_{P,m} \ln \left(\frac{T_B}{T_A} \right) - R \ln \left(\frac{P_B}{P_A} \right)$$

- En régime stationnaire, le premier principe appliqué à un fluide en écoulement s'écrit :

$$\Delta H_m = Q_m + W_{u,m}$$

avec Q_m le transfert thermique molaire et W_u le travail molaire reçu autre que celui des forces pressantes.

Un gaz parfait circule dans une installation. Il échange du travail avec l'extérieur dans le compresseur et la turbine. Le travail fourni par le passage du gaz dans la turbine sert d'une part à faire fonctionner le compresseur (turbine et compresseur montés sur le même axe) et d'autre part à fabriquer de l'électricité. Les transferts thermiques ont lieu dans des échangeurs (fig.1). Le fluide, ici un gaz d'hélium, décrit le cycle de Brayton.

Ce cycle est constitué de deux isobares et de deux isentropiques :

- compression adiabatique réversible du point 1 avec une température $T_1 = 300\text{ K}$ et une pression $p_1 = 20\text{ bar}$ vers le point 2 à la pression $p_2 = 80\text{ bar}$,
- détente isobare du point 2 vers le point 3 à la température $T_3 = 1300\text{ K}$,
- détente adiabatique réversible de 3 vers 4 (de $p_3 = p_2$ à $p_4 = p_1$),
- compression isobare de 4 vers 1.

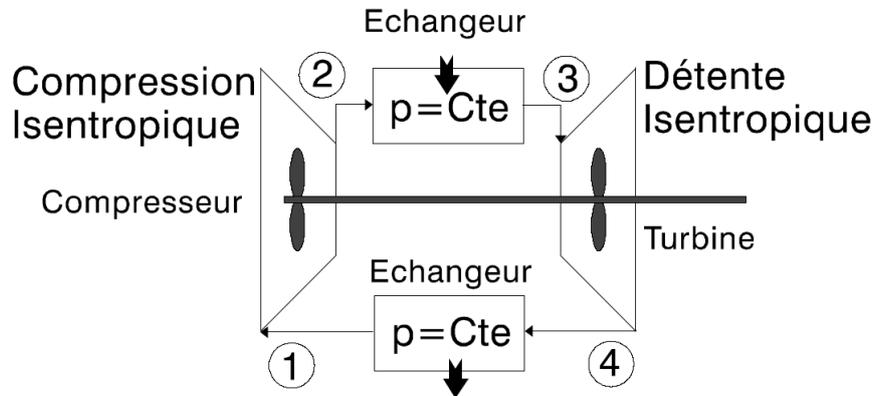


FIGURE 1 – Cycle de Brayton

1. Montrer que :

$$C_{V,m} = \frac{R}{\gamma - 1} \quad \text{et} \quad C_{P,m} = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$$

2. Pour une transformation $A \rightarrow B$ isentropique, démontrer la relation :

$$\frac{T_A}{p_A^\beta} = \frac{T_B}{p_B^\beta} \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

Donner la valeur numérique de β .

3. Déterminer les températures T_2 et T_4 . Effectuer l'application numérique.
4. Tracer le cycle de Brayton sur un diagramme $p = f(V_m)$.
5. Sur quelles portions du cycle le fluide est-il en contact avec la source chaude ? avec la source froide ? Que vaut la température de la source chaude ? de la source froide ?
6. Calculer les travaux molaire $W_{12,m}$ et $W_{34,m}$ échangés avec l'extérieur (travaux utiles reçus) lors des transformations $1 \rightarrow 2$ et $3 \rightarrow 4$. Effectuer l'application numérique pour une mole d'hélium.
7. Exprimer les transferts thermiques molaires reçus $Q_{23,m}$ et $Q_{41,m}$. Effectuer l'application numérique.
8. Proposer une expression de l'efficacité du moteur et calculer sa valeur numérique.

Dans la suite, on s'intéresse à l'influence du rapport de pression $r_p = \frac{p_2}{p_1}$ sur le rendement de la centrale.

9. Exprimer le travail molaire reçu au cours d'un cycle à partir des températures extrêmes T_3 et T_1 , de R , de β et du rapport des pressions $r_p = \frac{p_2}{p_1}$.
10. Montrer que la valeur absolue du travail molaire passe par une valeur maximale en fonction du rapport des pressions r_p pour :

$$r_{pm} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{1}{2\beta}}$$

Calculer numériquement r_{pm} .

11. On montre que l'efficacité peut s'écrire :

$$e_m = 1 - \frac{1}{r_p^\beta}$$

Calculer e pour $r = r_{pm}$. Commenter.

12. Comparer l'efficacité précédente à l'efficacité e_{rev} d'un moteur de Carnot obtenue en utilisant les deux températures extrêmes du cycle. Interpréter.

Problème 2 – Etude sommaire d'une pompe à chaleur

La pompe à chaleur est un dispositif qui, en mode "chauffage" puise l'énergie thermique dans l'air, dans le sol ou dans l'eau des nappes phréatiques, pour la transférer vers le local à réchauffer. Elle est constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide caloporteur à l'état liquide, gazeux ou biphasé selon les éléments qu'il traverse. La circulation se fait en régime permanent; on néglige les variations d'énergies cinétique et de pesanteur.

En régime stationnaire, le premier principe appliqué à un fluide en écoulement s'écrit :

$$\Delta h = q + w$$

avec h l'enthalpie massique du fluide, q le transfert thermique massique reçu et w le travail massique reçu autre que celui des forces de pression.

Le cycle de la pompe à chaleur se compose de quatre étapes (fig.2), en dehors desquelles les échanges thermiques ou mécaniques sont supposés nuls :

- Compression : le gaz subit une compression adiabatique qui l'amène de l'état 1 (p_1, T_1) à l'état 2 (p_2, T_2). On note w le travail massique reçu par le fluide.
- Condensation : le gaz se liquéfie totalement à pression constante p_2 jusqu'à la température T_3 . Il cède de l'énergie à la source chaude, et l'on note $q_{23} < 0$ l'énergie massique échangée.
- Détente : le fluide traverse un tuyau indéformable et ne permettant pas les échanges thermiques. La pression du fluide redescend jusqu'à p_1 et sa température vaut alors T_4 .
- Évaporation : le liquide s'évapore totalement à pression constante p_1 jusqu'à la température T_1 . Il reçoit l'énergie massique $q_{41} > 0$ de la source froide.

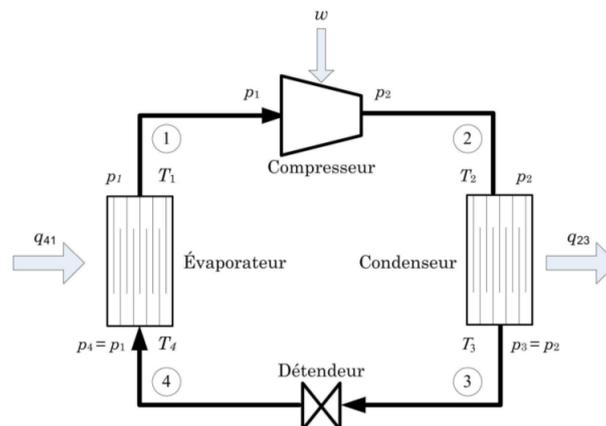


FIGURE 2 – Cycle de la pompe à chaleur

Le cycle parcouru par le fluide caloporteur est représenté dans le diagramme (p, h) fourni en annexe.

1. A l'aide du diagramme (p, h) que la transformation 1 – 2 est réversible.
2. Justifier que la phase de détente est isenthalpique.
3. Pour chacun des points 1 à 4 du cycle, indiquer dans un tableau les valeurs numériques respectives de l'enthalpie massique, la pression et la température ainsi que l'état du fluide.
4. Proposer une expression, en fonction des échanges énergétiques, pour l'efficacité de la pompe à chaleur.
5. Estimer numériquement cette efficacité.
6. Ecrire les premier et deuxième principe de la thermodynamique appliqués sur un cycle à une machine ditherme fonctionnant entre une source froide à la température T_F et une source chaude à la température T_C .
7. Exprimer l'efficacité de Carnot d'une pompe à chaleur. Calculer sa valeur pour la pompe à chaleur étudiée. Commenter.
8. Calculer le débit massique du fluide permettant d'assurer une puissance de chauffage de 4 kW. Avec quelle puissance électrique faut-il alors alimenter la pompe à chaleur ?

Problème 3 – Aciers inoxydables

L'acier inoxydable est un alliage majoritairement composé de fer, de moins de 1,2 % (en masse) de carbone et contenant également au moins 10,5 % (en masse) de chrome nécessaire pour garantir la formation d'une couche passive résistante à la corrosion. En effet, au contact du dioxygène, une couche d'oxyde de chrome va se créer à la surface du matériau. Cette couche protège alors l'acier et a la particularité de pouvoir s'auto-régénérer.

1. L'élément chrome.

- 1.1 Le chrome a pour numéro atomique $Z = 24$. A l'aide des règles usuelles de remplissage, proposer la configuration électronique de l'atome de chrome dans son état fondamental.
- 1.2 En réalité, la configuration électronique du chrome dans son état fondamental fait exception à l'une des règles de remplissage et se termine par $ns^1(n-1)d^5$. Justifier simplement ce comportement particulier.

2. **Acier inoxydable** La figure fig.3 présente un diagramme simplifié potentiel-pH du chrome à 298 K. La concentration des espèces dissoutes étant de 1 mol.L^{-1} , ce dernier fait intervenir 6 espèces : $\text{Cr}(s)$, $\text{Cr}^{2+}(aq)$, $\text{Cr}^{3+}(aq)$, $\text{Cr}_2\text{O}_3(s)$, $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, CrO_4^{2-} .

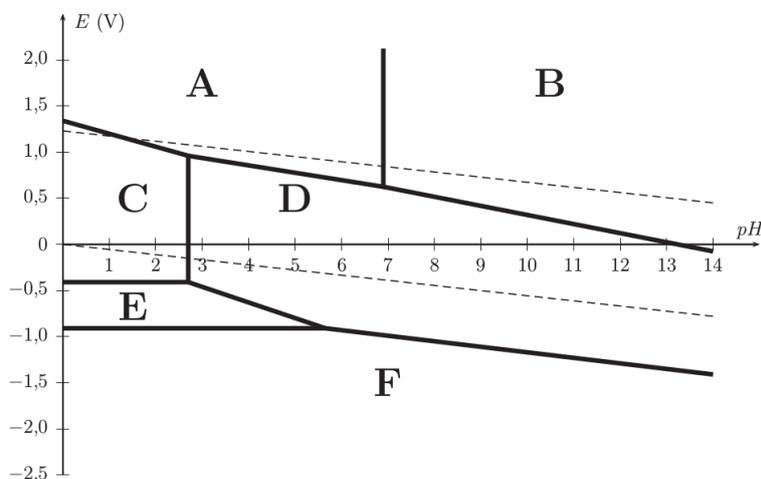


FIGURE 3 – Diagramme E-pH du chrome

- 2.1 Indiquer pour chacun des domaines (A, B, C, D, E, F) du diagramme l'espèce chimique correspondante.
- 2.2 Sur ce diagramme ont été portées deux droites en pointillés délimitant le domaine de stabilité thermodynamique de l'eau. Rappeler les équations de ces deux droites en utilisant les conventions habituelles.
- 2.3 Discuter du comportement du chrome métallique dans une eau désaérée et dans une eau aérée.

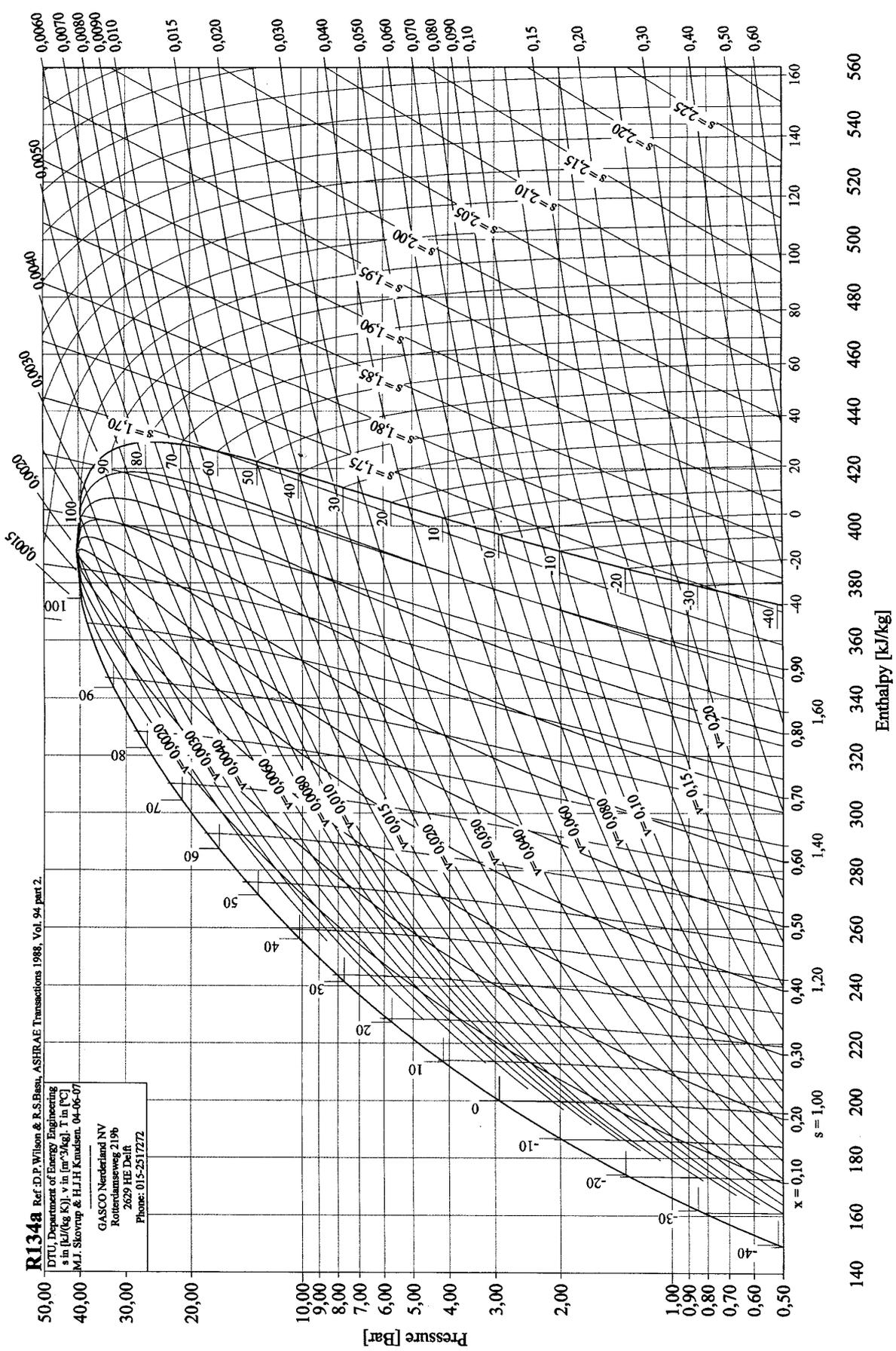
Une couche de passivation dite native se forme toujours à la surface d'un acier inoxydable. Lorsque celui-ci est en présence d'une solution dont la valeur du pH est égale à 6, l'acier inoxydable résiste toujours très bien à l'oxydation.

- 2.4 Quel oxyde de chrome est responsable de la passivation? Quelle est la conséquence pour l'acier inoxydable étudié?

 FIN DE L'ENONCE

R134a Ref: D.F. Wilson & R.S. Basu, ASHRAE Transactions 1988, Vol. 94, part 2.

DTU, Department of Energy Engineering
 s in [kJ/kg K], v in [m³/kg], T in [°C]
 M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 04-06-07
 GASCO Nederland NV
 Rotterdamseweg 219b
 2629 HE Delft
 Phone: 015-2517272



Enthalpy [kJ/kg]

Pressure [Bar]