

ENSEM 1A UE Fondements de la mécanique

THERMODYNAMIQUE - Etude d'un cycle à fluide liquéfiable

*Durée : 2 heures, documents et téléphones non autorisés. Calculatrice autorisée.
La propreté, la lisibilité de la copie et le respect des notations données dans l'énoncé seront pris en compte dans la notation.*

I. Questions préliminaires (5 pts)

Ces questions préliminaires sont une aide pour répondre aux questions de la partie suivante. Il est donc conseillé de commencer par ces questions.

1. Donner l'allure des courbes de saturation d'un changement d'état liquide-vapeur en $p(V)$ et $T(s)$ avec les phases liquide (notée L) et gazeuse (notée G) et le domaine de coexistence liquide-gaz (noté L+G). Sur le diagramme $p(V)$ tracer le chemin suivi par une transformation isotherme. Et sur le diagramme $T(s)$, tracer le chemin suivi par une transformation isobare. (2 pts)
2. Le travail des forces de pression W_p n'est pas le seul travail pouvant exister. Par exemple, dans une turbine, l'énergie transférée aux aubages par le fluide est récupérable et est appelée travail utile (W_u). Le travail total est alors la somme du travail fournit par les forces de pression et du travail utile. En utilisant le 1^{er} principe, montrer que pour une transformation réversible et isobare, à la pression P_0 , faisant passer un système fermé d'un état A à un état B, la variation d'enthalpie peut s'écrire :

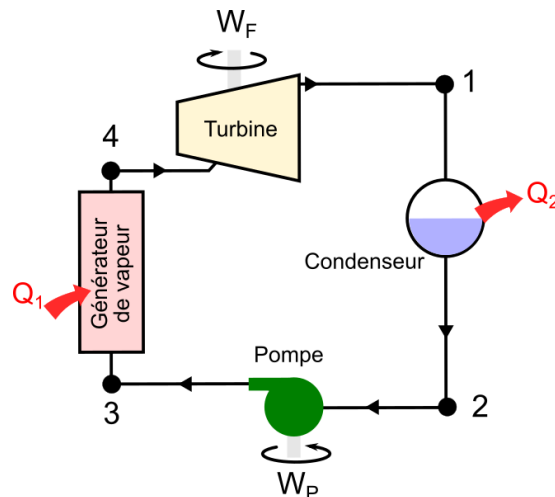
$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = W_u + Q$$

Où Q est la chaleur échangée au cours de la transformation. Que devient cette relation si la transformation A→B est adiabatique en plus d'être isobare ? Justifier vos réponses. (2 pts)

3. Quel est le rendement théorique η_c d'une machine idéale effectuant un cycle de Carnot entre une source chaude à T_1 et une source froide à T_2 ? (1 pt)

II. Machine motrice de Carnot à fluide liquéfiable (15 pts)

Dans une machine à combustion externe (voir figure), une pompe sert à fournir un travail W_P à un fluide moteur. Ensuite, un générateur de vapeur constitue la source chaude, il fournit au fluide une quantité de chaleur Q_1 (issu de gaz brûlés ou du circuit primaire d'eau d'un réacteur nucléaire). Une turbine, simple ou étagée, récupère le travail mécanique utile W_F issu de la détente de la vapeur d'eau dans ses aubages. Enfin, le condenseur constitue la source froide (eau prélevée dans une rivière) où le fluide moteur cède une quantité de chaleur Q_2 à cette source froide.



Initialement, la machine de Carnot utilisait de l'air comme fluide ce qui conduisait à des difficultés techniques pour réaliser une transformation isotherme suivie d'une transformation adiabatique. Ces difficultés peuvent être surmontées en utilisant un fluide liquéfiable dont toutes les transformations sont réversibles et décrivent un cycle se déroulant sous la courbe de saturation.

Les différentes étapes de ce cycle sont les suivantes :

- 1→2 : Passage du fluide dans le **condenseur** où une quantité de chaleur Q_2 est cédée à la source froide. La pression lors de cette transformation est constante à $P=0,1$ bar. L'état du fluide lors de cette transformation est un mélange entre l'état liquide et l'état gazeux.
- 2→3 : Passage du fluide dans la **pompe** où il reçoit un travail W_P . La pression du fluide passe de 0,1 bar en entrée (2) à 20 bars en sortie de la pompe (3). Cette transformation peut être considéré comme isentropique et (quasiment) isochore. En sortie de la pompe (3), le fluide est à l'état de liquide saturé.
- 3→4 : Passage du fluide dans le **générateur de vapeur** où il reçoit une quantité de chaleur Q_1 provenant de la source chaude. La pression au cours de cette transformation est constante à $P=20$ bars. A la sortie du générateur de vapeur, le fluide est à l'état de vapeur saturée.
- 4→1 : Passage du fluide dans la **turbine** où il cède un travail utile W_F aux aubages de la turbine. Comme pour la pompe, cette transformation est isentropique et peut être considérée comme quasiment isochore.

Données :

Extrait des tables thermodynamiques de l'eau à l'état saturé :

p (bar)	T (°C)	h_L^{sat} (kJ.kg ⁻¹)	h_G^{sat} (kJ.kg ⁻¹)	s_L^{sat} (kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹)	s_G^{sat} (kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹)
0,1	45,81	191,8	2585,0	0,65	8,15
20	212,42	908,8	2799,5	2,45	6,34

Hypothèses :

- Le fluide moteur considéré est de l'eau et on raisonnera sur une masse d'eau de 1 kg.
- Le régime est stationnaire.
- On néglige les pertes de charges et les pertes thermiques ainsi que les variations d'énergie cinétique et potentielle du fluide.

Diagrammes du cycle :

1. Représentez le cycle sur les diagrammes p(V) et T(s) en indiquant les différents points remarquables du cycle et son sens. Tracez également sur ces diagrammes, la courbe de saturation en indiquant les domaines correspondants aux états liquide (L), gazeux (G), et la coexistence de ces deux phases (L+G). (2 pts)

Bilans enthalpiques du cycle :

2. Donnez les enthalpies H_3 et H_4 correspondantes aux états (3) et (4), justifiez vos réponses. (2 pts)
3. En utilisant la règle des moments, déterminez les titres de vapeur x_1 et x_2 correspondants respectivement à la quantité de vapeur dans l'état (1) et dans l'état (2). (2 pts)
4. L'enthalpie étant elle aussi une grandeur extensive, la règle des moments peut également être appliquée. Déterminez les enthalpies H_1 et H_2 correspondantes respectivement aux états (1) et (2). (2 pts)

Détermination du travail et des chaleurs échangées - rendement du cycle :

5. Déterminez les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 respectivement reçue et cédée par le fluide au cours du cycle. (2 pts)
6. En vous servant du résultat établi à la question préliminaire 2, déterminez le travail W_P reçu par le fluide dans la pompe et le travail utile W_F cédé par le fluide à la turbine. Déduisez le travail net W_{net} du cycle. (2 pts)
7. Calculez le rendement théorique η_{th} du cycle et comparez cette valeur au rendement de la machine de Carnot η_c travaillant aux mêmes températures de sources chaude et froide. Qu'en concluez-vous ? (2 pts)
8. Pour l'étude de ce type de cycle, il est plus commode de raisonner sur le débit plutôt que sur une masse fixe de fluide. En considérant un débit massique de 10 kg.s⁻¹ dans le circuit, calculez la puissance nette P_{net} fournie par le fluide au cours du cycle? (1 pt)