DM n° 17 de Physique - Machines thermiques

Étude d'une turbine à vapeur

Ce problème a pour objectif l'étude du système liquide-vapeur de l'eau et de son utilisation dans le circuit secondaire des centrales nucléaires.

L'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur est caractérisé, à différentes températures, par les données suivantes :

θ (°C)	P_s (bar)	Liquide saturant		Vapeur saturante	
		v_L (m ³ · kg ⁻¹)	h_L (kJ · kg ⁻¹)	v_G (m ³ · kg ⁻¹)	h_G (kJ · kg ⁻¹)
35	0,056	$1,00 \cdot 10^{-3}$	146,34	25,24	2560,67
50	0,123	$1,01 \cdot 10^{-3}$	208,96	12,04	2587,42
100	1,013	$1,04 \cdot 10^{-3}$	418,42	1,673	2671,44
185	11,238	$1,13 \cdot 10^{-3}$	784,17	0,174	2778,03
285	69,200	$1,35 \cdot 10^{-3}$	1261,11	0,028	2768,83

Où :

- θ est la température
- P_s est la pression de vapeur saturante
- v_L est le volume massique du liquide saturant
- h_L est l'enthalpie massique du liquide saturant
- v_G est le volume massique de la vapeur saturante
- h_G est l'enthalpie massique de la vapeur saturante

Autres données valables pour l'ensemble de l'exercice :

- $c_L = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ est la capacité thermique massique du liquide saturant
- $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ est le coefficient de dilatation isobare de l'eau liquide

A Diagramme de Clapeyron du système liquide-vapeur de l'eau

On désigne par P la pression du système liquide-vapeur, par v son volume massique, par x son titre massique de vapeur lors de l'équilibre liquide-vapeur et par $\ell_V(T)$ la chaleur latente massique de vaporisation à la température T .

1. Représenter l'allure du diagramme de Clapeyron (P, v) de l'eau. Préciser la position du point critique C, les domaines liquide (L), liquide + vapeur (L+V), et vapeur (V).
2. Représenter, sur un diagramme identique au précédent, les allures de l'isotherme critique T_C et d'une isotherme $T < T_C$, en justifiant cette dernière.
3. Montrer que, dans le domaine (L+V), le titre massique en vapeur x est donné par les relations

$$x = \frac{v - v_L}{v_G - v_L} \quad \text{ou} \quad x = \frac{h - h_L}{h_G - h_L}$$

4. Rappeler la relation reliant $\ell_V(T)$ à $h_G(T)$ et $h_L(T)$.

B Détente adiabatique réversible d'un système liquide-vapeur

On dispose d'un cylindre indéformable muni d'un piston. Le cylindre et le piston ont des parois calorifugées. Le piston est initialement fixé dans une position qui délimite un volume $V = 10\text{ L}$ dans le cylindre. L'introduction d'une masse $m = 10\text{ g}$ d'eau dans le cylindre initialement vide permet d'obtenir un système liquide-vapeur en équilibre à la température $\theta = 100^\circ\text{C}$. On fait ensuite subir au système une détente adiabatique réversible de la température θ à la température $\theta' = 50^\circ\text{C}$.

5. Exprimer et calculer le titre massique en vapeur x de ce système avant la détente.

Remarque : il y a deux méthodes possibles, qui donnent le même résultat...

6. Déterminer l'entropie massique de vaporisation $\Delta s_v(T)$ en fonction de $\ell_v(T)$ et T .
 7. Sachant que la variation d'entropie d'une phase condensée de capacité thermique C , sur une transformation entre T_1 et T_2 , s'écrit $\Delta S = C \ln \frac{T_2}{T_1}$, montrer que l'entropie massique d'un système liquide-vapeur, de titre massique en vapeur x , en équilibre à la température T est donnée par

$$s(x, T) = c_L \ln(T) + \ell_v(T) \frac{x}{T} + \text{cste}$$

8. Exprimer et calculer le titre massique en vapeur x' à la fin de la détente.
 9. Quel titre massique en vapeur x'' aurait-on dû avoir, à la température θ , avant la détente, pour qu'au cours de celle-ci ce titre reste constant ?

C Cycle de Rankine au sein d'une turbine à vapeur

Le circuit secondaire d'une centrale nucléaire comporte un générateur de vapeur utilisant l'énergie thermique provenant du combustible nucléaire, une turbine permettant de transférer mécaniquement l'énergie vers la production électrique, un condenseur et une pompe d'alimentation. Les transformations subies par l'eau dans ce circuit sont modélisées par le cycle de Rankine :

- A→B : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression $P_1 = 0,056\text{ bar}$ à la pression $P_2 = 69,200\text{ bar}$, du liquide saturant sortant du condenseur à la pression P_1 (état A). Cette compression entraîne une élévation ΔT de la température du liquide.
 - B→D : échauffement isobare du liquide dans le générateur de vapeur qui amène le liquide de l'état B à l'état de liquide saturant sous la pression P_2 (état D).
 - D→E : vaporisation totale, dans le générateur de vapeur, sous la pression P_2 .
 - E→F : détente adiabatique réversible, dans la turbine, de P_2 à P_1 .
 - F→A : liquéfaction totale, dans le condenseur, sous la pression P_1 , de la vapeur présente dans l'état F.
- P_1 et P_2 sont les pressions de vapeur saturante correspondantes respectivement aux températures T_1 et T_2 .

10. Représenter et justifier le cycle décrit par l'eau dans le diagramme de Clapeyron (P, v).

Il est possible de prendre en compte, pour un liquide supposé incompressible, l'influence de la pression sur les variations d'entropie. L'entropie massique du liquide s'écrit alors, en fonction des variables T et P ,

$$s(T, P) = c_L \ln T - \alpha v_L P + \text{cte}$$

11. Sachant que $\Delta T \ll T_1$ et en supposant que le liquide est incompressible (avec $v_L = 10^{-3}\text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), exprimer et calculer ΔT . Commenter cette valeur.
 Dans la suite du problème on négligera ΔT .
12. Exprimer et calculer le titre x_F du système liquide-vapeur sortant de la turbine (état F).
 13. En déduire l'enthalpie massique h_F du système liquide-vapeur sortant de la turbine.
 14. Exprimer et calculer les quantités d'énergie Q_1 et Q_2 reçues par une masse $m = 1\text{ kg}$ d'eau par transfert thermique, respectivement dans le condenseur et dans le générateur de vapeur.
 15. Calculer le travail W reçu par la masse m , au cours du cycle.
 16. Définir et calculer le rendement thermodynamique ρ du cycle.
 17. Déterminer et calculer le rendement ρ_C d'un cycle de Carnot décrit entre les mêmes températures extrêmes T_1 et T_2 . Commenter