

Étude du système liquide-vapeur

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

L'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur (gaz) 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	1,00.10 ⁻³	146,34	25,24	2560,67
50	0,123	1,01.10 ⁻³	208,96	12,04	2587,42
100	1,013	1,04.10 ⁻³	418,42	1,673	2671,44
185	11,238	1,13.10 ⁻³	784,17	0,174	2778,03
285	69,200	1,35.10 ⁻³	1261,11	0,028	2768,83

où T désigne la température, p_s la pression de vapeur saturante, v_L le volume massique de liquide saturant (à la limite d'apparition de vapeur), h_L l'enthalpie massique du liquide saturant, v_G le volume massique de la vapeur saturante (à la limite d'apparition de liquide), et h_G l'enthalpie massique de la vapeur saturante.

Diagramme de Clapeyron (p, v) du système liquide-vapeur de l'eau.

On désigne par p la pression du système liquide-vapeur, par v son volume massique et par h son enthalpie massique.

1. a) Représenter l'allure du diagramme de CLAPEYRON de l'eau. On prendra soin d'y faire figurer la courbe de saturation et de préciser la position du point critique C , les domaines liquide (L), liquide + vapeur (L+V) et vapeur (V).
b) Représenter, sur le diagramme précédent, l'allure de l'isotherme critique $T = T_C$ et l'allure d'une isotherme $T < T_C$.
2. Rappeler la définition du titre massique en vapeur (ou en gaz) x d'un système liquide-vapeur. Montrer que ce titre massique peut s'écrire :

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

3. On désigne par $\ell_V(T)$ la chaleur latente massique de vaporisation à la température T , et par c_L désigne la capacité thermique massique du liquide saturant.
 - a) Rappeler la relation reliant $\ell_V(T)$ à $h_G(T)$ et $h_L(T)$.
 - b) Montrer que si c_L est supposée constante, l'entropie massique d'un système liquide-vapeur de titre massique en vapeur x en équilibre à la température T est donnée par la relation :

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

Dans toute la suite du problème, la capacité thermique massique c_L du liquide est constante et vaut 4,18 kJ.kg⁻¹.K⁻¹.

Le coefficient de dilatation isobare α de l'eau liquide, supposé constant, vaut 1,5.10⁻⁴ K⁻¹.

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 fixé dans une position qui délimite un volume $V = 10,0\text{L}$ dans le cylindre. L'introduction d'une masse $m = 10,0\text{g}$ d'eau dans le cylindre permet d'obtenir un système liquide-vapeur en équilibre à la température $T = 100^\circ\text{C}$.

- Calculer numériquement le titre massique en vapeur x de ce système.
- On modifie maintenant le volume du dispositif en faisant subir une détente adiabatique réversible au système liquide-vapeur, de la température T à la température $T' = 50^\circ\text{C}$. Calculer le titre massique en vapeur x' du système liquide-vapeur à la fin de la détente.
- Quel titre massique en vapeur x'' aurait-on dû avoir, à la température $T = 100^\circ\text{C}$, pour qu'au cours de la détente de la question précédente ce titre reste constant ?

Modèle de fonctionnement d'une turbine à vapeur - Cycle de Rankine.

Le circuit secondaire d'une centrale nucléaire comporte les éléments suivants : un générateur de vapeur, une turbine, un condenseur et une pompe d'alimentation. Les transformations subies par l'eau dans ce circuit sont modélisées par le cycle de RANKINE décrit ci-dessous :

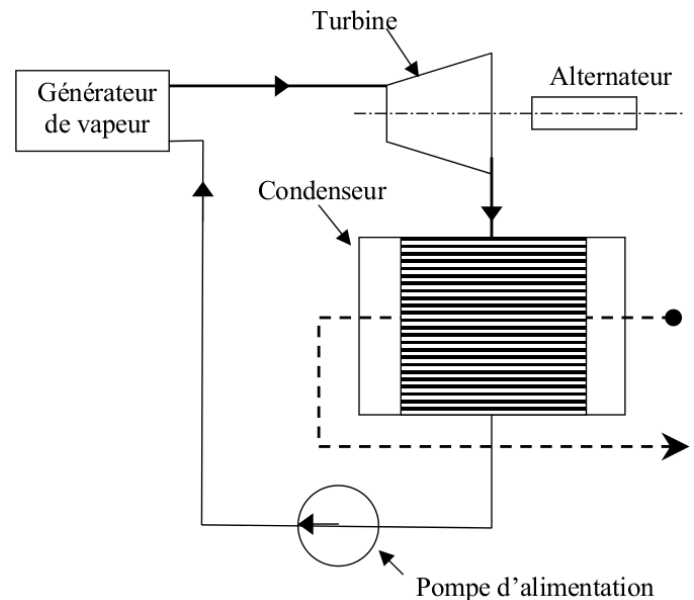
A→B : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, du liquide saturant sortant du condenseur à la pression $p_1 = 0,056\text{ bar}$ (état *A*). La compression se fait de la pression p_1 à la pression $p_2 = 69,200\text{ bar}$, inférieure à la pression critique. Elle entraîne une 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 . L'état *F* est diphasé.

F→A : liquéfaction totale, dans le condenseur, sous la pression p_1 , de la vapeur présente dans l'état *F*.



- Représenter l'allure du cycle décrit par l'eau dans le diagramme de CLAPEYRON (p, v). On fera figurer la courbe de saturation sur le diagramme, et l'état (L), (L+V), ou (V) de l'eau. Que vaut la température T_1 dans l'état *A*? Que vaut la température T_2 dans l'état *E*? Justifier.

- On admet que dans le cas général, c'est-à-dire lorsque l'on prend en compte la compressibilité non nulle, la forme complète de la différentielle de l'entropie massique du liquide s'écrit, en fonction des variables T et p :

$$ds = c_L \frac{dT}{T} - \alpha v_L dp$$

On note $\Delta T = T - T_1$ l'élévation de la température du liquide dans la pompe d'alimentation.

Sachant que $\Delta T \ll T_1$, calculer ΔT : on supposera pour ce calcul que le liquide est incompressible et que son volume massique v_L vaut $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$.

Dans la suite du problème, on négligera ΔT . On notera T_2 la température dans l'état *D*.

- Calculer le titre en vapeur x_F et l'enthalpie massique h_F du système liquide-vapeur sortant de la turbine (état *F*).

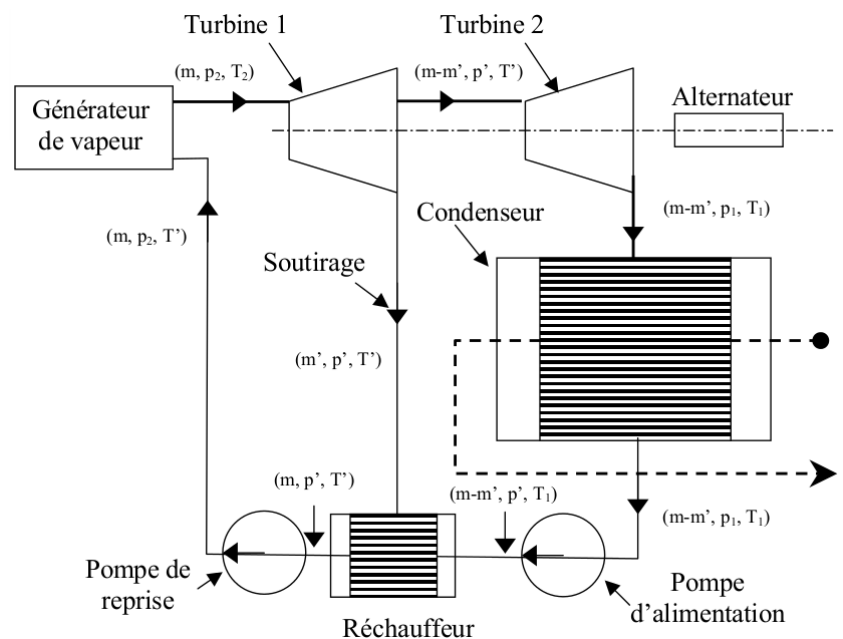
10. a) Calculer les transferts thermiques massiques q_1 et q_2 reçus par l'eau, respectivement dans le condenseur et dans le générateur de vapeur.
 - b) En déduire le travail massique w reçu par le fluide au cours du cycle.
 - c) Calculer le rendement ρ du cycle. Comparer ce rendement à celui de Carnot, noté ρ_C , décrit entre les mêmes températures extrêmes T_1 et T_2 .
11. Calculer la variation d'enthalpie massique Δh_{AB} du liquide au cours de la compression AB : on supposera, pour ce calcul, que le liquide est incompressible et que son volume massique v_L vaut $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. Commenter cette valeur.
12. Dans le calcul du bilan enthalpique du fluide au cours du cycle, on peut négliger la variation d'enthalpie Δh_{AB} . Montrer alors que le travail w peut s'exprimer en fonction des enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie de la turbine.

Cycle de Rankine avec soutirage

On se propose de modifier l'installation par adjonction d'une deuxième turbine et la pratique du soutirage, qui a pour but de réchauffer le liquide avant qu'il soit réinjecté dans le générateur de vapeur.

La pratique du soutirage consiste à prélever, à la sortie de la première turbine, sous la pression $p' = 11,238 \text{ bar}$, une masse m' de vapeur saturante. Cette vapeur est envoyée dans un réchauffeur où elle est mise en contact, par l'intermédiaire d'un échangeur, avec la masse $m - m'$ de liquide saturant issue du condenseur, cette dernière ayant été préalablement comprimée de p_1 à p' par la pompe d'alimentation (voir figure ci-après).

Au cours de cette opération, la masse m' de vapeur saturante se liquéfie sous la pression constante p' . L'énergie ainsi libérée est entièrement utilisée pour réchauffer la masse $m - m'$ de liquide de la température T_1 (sortie du condenseur) à la température T' .



À la sortie du réchauffeur, le fluide se trouve à l'état liquide dans les conditions T' , p' . Une pompe de reprise comprime ce liquide, de manière adiabatique, de p' à p_2 , puis le refoule dans le générateur de vapeur où il subit un échauffement isobare de T' à T_2 avant de se vaporiser de nouveau.

13. Représenter le cycle de RANKINE avec soutirage dans le diagramme de CLAPEYRON. On fera figurer la courbe de saturation sur le diagramme, ainsi que l'état (L), (L+V), ou (V) de l'eau. Que vaut T' ? Justifier.
14. À partir d'un bilan enthalpique traduisant les transferts thermiques entre la vapeur saturante et le liquide dans le réchauffeur, calculer le rapport $\frac{m'}{m}$. Donner sa valeur numérique.
15. a) Calculer le titre x'_1 et l'enthalpie massique h'_1 du système liquide-vapeur à la fin de la première détente et avant soutirage.
 - b) Calculer le titre x_2 et l'enthalpie massique h_2 du système liquide-vapeur à la fin de la deuxième détente.
16. On adopte l'approximation suggérée à la question 12.. Calculer le travail massique total w_s reçu par le fluide au cours d'un cycle avec soutirage.
17. Calculer le rendement ρ_s du cycle avec soutirage. Conclure.