

Physique - Devoir Maison 09
samedi 23/05/2026

Corrigé

I Étude d'une installation nucléaire REP

Considérons une centrale nucléaire REP produisant une puissance électrique $\mathcal{P}_e = 900$ MW. Le fluide circulant dans le circuit secondaire est de l'eau, dont l'écoulement est supposé stationnaire. Le cycle thermodynamique décrit par l'eau est un cycle ditherme moteur. L'eau liquide sera supposée incompressible et de capacité thermique massique isobare supposée constante. Le tableau ci-dessous donne diverses données thermodynamiques relatives à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau.

θ (°C)	P_{sat} (bar)	Liquide saturant			Vapeur saturante sèche		
		v_l ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	h_l ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	s_l ($\text{JK}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)	v_v ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	h_v ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	s_v ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
30	0,043	1,0047	125,22	0,4348	32,892	2555,92	8,4530
180	10	1,1276	763,18	2,1395	0,119404	2777,84	6,5854
270	55	1,3053	1190,10	2,9853	0,03505	2788,46	5,9226

I.A Cycle de Carnot

Dans une première approche simplifiée, on considère le moteur ditherme de Carnot fonctionnant de manière réversible entre deux sources de température T_{ch} et T_{fr} ($T_{\text{fr}} < T_{\text{ch}}$).

1. Donner, en la redémontrant, l'expression du rendement de Carnot associé à ce cycle.

Réponse :

Soit le système constitué par le fluide en évolution cyclique du moteur ditherme. Notons W le travail reçu, Q_{ch} le transfert thermique reçu de la part de la source chaude et Q_{fr} le transfert thermique reçu de la part de la source froide au cours d'un cycle. Par application du premier principe sur un cycle au système, on a

$$\Delta U = W + Q_{\text{ch}} + Q_{\text{fr}} = 0$$

car U , l'énergie interne du système, est une fonction d'état. L'application du seconde principe sur un cycle au système fournit :

$$\Delta S = S_e + S_c = S_e = Q_{\text{fr}}/T_{\text{fr}} + Q_{\text{ch}}/T_{\text{ch}} = 0$$

car S , l'entropie du système, est une fonction d'état, et l'évolution est réversible ($S_c = 0$). L'expression du rendement pour un moteur est défini par

$$\eta = \frac{-W}{Q_{\text{ch}}}$$

Dans le cas du moteur ditherme de Carnot, on obtient donc l'expression suivante

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{fr}}}{T_{\text{ch}}}$$

2. Donner la valeur numérique de ce rendement en prenant $T_{\text{ch}} = 543$ K et $T_{\text{fr}} = 303$ K, les deux températures extrêmes de l'eau dans le circuit secondaire.

Réponse :

$$\eta_{\text{Carnot}} = 0,442$$

3. Sachant qu'un réacteur REP fournit à l'eau du circuit secondaire, via le générateur de vapeur, une puissance thermique $P_t = 2785$ MW, que vaut le rendement thermodynamique réel de l'installation ? On supposera que la puissance mécanique transmise à la turbine est intégralement convertie en puissance électrique. Commenter.

Réponse :

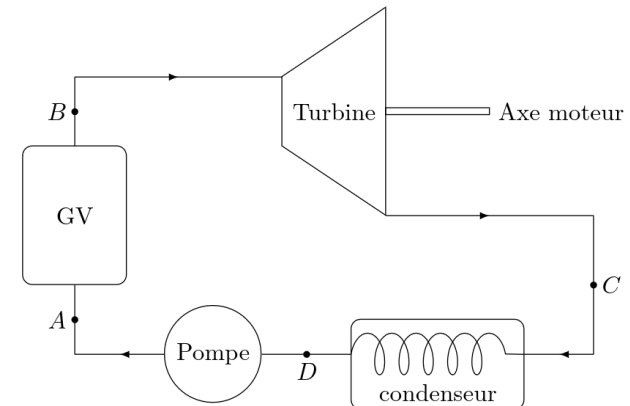
$$\eta_{\text{réel}} = \frac{P_e}{P_t} = 0,323$$

qui est bien inférieur au rendement de Carnot. Cette différence s'explique simplement par la non prise en compte des causes d'irréversibilités pour le rendement de Carnot. Dans une centrale nucléaire, augmenter le rendement n'est pas l'objectif principal ; il faut aussi prendre en compte la sécurité de l'installation (bien contenir les matériaux radioactifs dans le fluide primaire), et la minimisation de l'usure des pièces, car arrêter la centrale pour effectuer des réparations est difficile, et coûte très cher !

I.B Cycle de Rankine

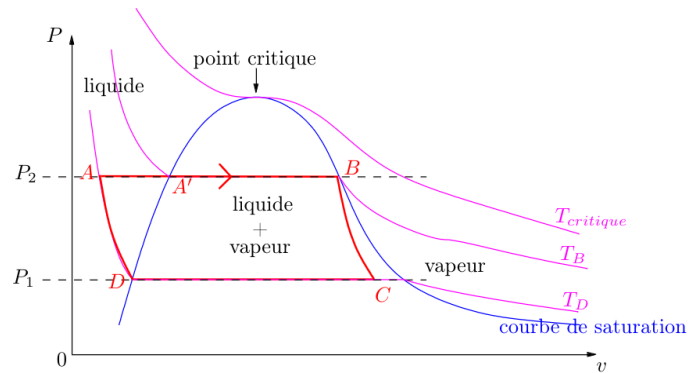
L'eau du circuit secondaire subit les transformations suivantes (représentées dans la figure suivante).

- de A à B : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression $P_2 = 55$ bar jusqu'à un état de liquide saturant (état noté A'), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (état B) ;
- de B à C : détente adiabatique réversible dans la turbine, de la pression P_2 à la pression $P_1 = 43$ mbar ;
- en C, le fluide est diphasé ;
- de C à D : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;
- de D à A : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression P_1 à la pression P_2 , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu et ainsi, $T_D \approx T_A$.



4. Représenter dans le diagramme de Clapeyron (P, v) l'allure de la courbe de saturation de l'eau, ainsi que les isothermes T_B , T_D et $T_{critique}$, cette dernière température étant celle du point critique de l'eau. Préciser les domaines du liquide, de la vapeur, de la vapeur saturante. Représenter sur ce même diagramme l'allure du cycle décrit par l'eau du circuit secondaire. Indiquer le sens de parcours du cycle et placer les points A, A', B, C et D.

Réponse :



5. D'après l'extrait de table thermodynamique, quelles sont les valeurs des températures, des enthalpies massiques et des entropies massiques aux points A', B et D ? On pourra donner les valeurs sous forme de tableau.

Réponse :

D'après les données :

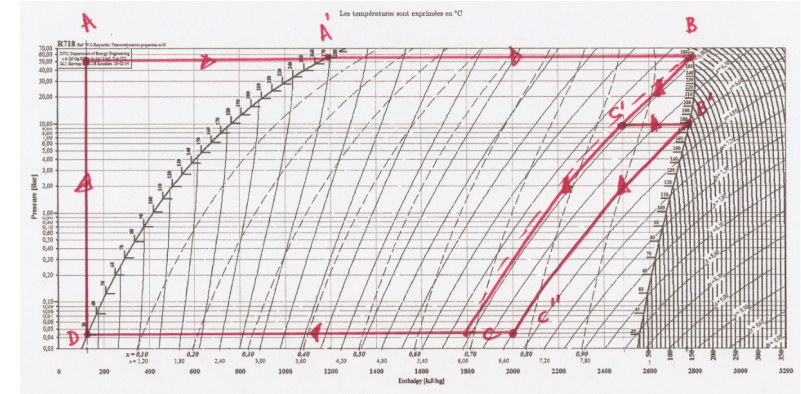
	P (bar)	θ (°C)	h (kJ.kg ⁻¹)	s (J.K ⁻¹ .kg ⁻¹)
A'	55	270	1190,10	2,9853
B	55	270	2788,46	5,9226
C	$4,3 \times 10^{-2}$	30	125,22	0,4348

De B vers D, on a bien une détente d'après l'énoncé donc le volume massique v augmente, mais le point C est bien à l'intérieur de la courbe de saturation (mélange liquide vapeur).

6. Le diagramme enthalpique (P, h) de l'eau est donné en fin d'énoncé. Placer, avec soin et à l'échelle, les points A', B, C, D du cycle. On explicitera la méthode.

Réponse :

De A à B, c'est une isobare donc horizontale, à la pression P_2 avec B sur la courbe de rosée. De B à C, on a une adiabatique réversible donc isentropique d'après le second principe ; il convient alors de suivre les courbes rouges à entropie constante ; en allant vers le bas, car dans une détente, P diminue. Le point C se trouve alors à la pression P_1 . De C à D, on a encore une isobare, qui cesse sur la courbe d'ébullition. Pour finir, de D à A, on a encore une isentropique, mais les courbes isentropiques ne sont pas tracées dans cette région ; on utilise alors le fait qu'elle est aussi presque isotherme d'après l'énoncé pour placer le point A, aussi à la pression P_2 .



7. Dans toute la suite, on négligera les variations d'énergie cinétique et potentielle dans les bilans énergétiques. Exprimer alors, sans démonstration, le premier principe de la thermodynamique pour un fluide en écoulement stationnaire recevant de manière algébrique le travail massique utile w_u et le transfert thermique massique q .

Réponse :

Pour un fluide en écoulement stationnaire traversant une partie active où il reçoit par unité de masse un travail utile w_e et un transfert thermique q , le premier principe s'exprime sous la forme (en négligeant les variations d'énergies cinétique et potentielle)

$$h_s - h_e = w_u + q$$

où e et s désignent l'entrée et la sortie de la partie active d'un étage.

8. Exprimer le travail massique w_{BC} reçu par l'eau dans la turbine. Donner sa valeur numérique, en s'aidant du diagramme enthalpique.

Réponse :

L'évolution dans la turbine étant adiabatique, on a

$$w_{BC} = h_C - h_B \approx -990 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

en prenant pour h_B la valeur du tableau pour la vapeur saturante (évite une incertitude de lecture) puis $h_C \approx 1800 \text{ kJ/kg}$, par lecture graphique.

9. Exprimer le transfert thermique massique $q_{AA'}$ reçu par l'eau liquide quand elle passe de manière isobare de la température T_A à la température $T_{A'}$ dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique.

Réponse :

De A à A', l'évolution s'effectue sans travail utile, on a donc

$$q_{AA'} = h_{A'} - h_A \approx 1070 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

en prenant $h_A \approx 120 \text{ kJ/kg}$ par lecture graphique, puis $h_{A'} = 1190,1 \text{ kJ/kg}$, par lecture du tableau de données.

10. Exprimer le transfert thermique massique $q_{A'B}$ reçu par l'eau quand elle se vaporise complètement dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique.

Réponse :

De A' à B, l'évolution s'effectue sans travail utile, on a donc

$$q_{A'B} = h_{B'} - h_{A'} \approx 1600 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

en prenant uniquement les valeurs numériques à partir du tableau de données pour plus de précision. Il est primordial de bien prendre la même valeur pour h'_A dans cette question et la précédente !

11. Calculer alors le rendement de Rankine de l'installation. Comparer au rendement de Carnot et commenter. Comparer ensuite au rendement réel et commenter.

Réponse :

Le rendement du cycle de Rankine de l'installation s'exprime donc sous la forme

$$\eta_{\text{Rankine}} = \frac{-w_{BC}}{q_{AA'} + q_{A'B}} \approx 0,37$$

qui est supérieur au rendement réel (comme on le verra le cycle réel n'est pas celui de Rankine mais une modification de ce dernier, évoquée dans la suite du problème). Le rendement de Carnot calculé avec les températures extrêmes du cycle de Rankine proposé est

$$\eta_{\text{Carnot-Rankine}} = 1 - \frac{T_D}{T_B} \approx 0,44$$

qui est bien supérieur au rendement de Rankine. En effet, ici, on a pris en compte une source d'irréversibilité thermique lors de $A \rightarrow A'$, où le liquide est initialement à 303 K, puis chauffé en contact d'un thermostat à 543 K ; il y a donc échange thermique sous différentes températures, ce qui est irréversible.

12. Dans quel état se trouve l'eau à la fin de la détente de la turbine ? Donner le titre massique en vapeur à l'aide du diagramme enthalpique. En quoi est-ce un inconvénient pour les parties mobiles de la turbine ?

Réponse :

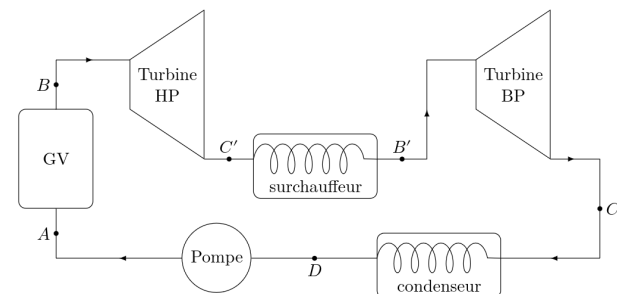
À la fin de la détente dans la turbine, l'état de l'eau est décrit par le point C qui correspond à un mélange diphasé liquide-vapeur. Par lecture graphique, on a $x_C \approx 0,68$. L'eau étant partiellement liquide, cela peut entraîner la corrosion des pièces métalliques constituant la turbine.

I.C Cycle de Rankine avec détente étagée

Le cycle réel est plus compliqué que celui étudié précédemment (voir figure suivante). En effet, d'une part, la détente est étagée : elle se fait d'abord dans une turbine « haute pression » puis dans une turbine « basse pression ». D'autre part, entre les deux turbines, l'eau passe dans un « surchauffeur ». Les transformations sont maintenant modélisées par :

- de A à B : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression $P_2 = 55 \text{ bar}$, jusqu'à un état de liquide saturant (état noté A'), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point B) ;

- de B à C' : détente adiabatique réversible dans la turbine « haute pression », de la pression P_2 à la pression $P_3 = 10 \text{ bar}$;
- de C' à B' : échauffement isobare à la pression P_3 , dans le surchauffeur, jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point B') ;
- de B' à C'' : détente adiabatique réversible dans la turbine « basse pression », de la pression P_3 à la pression $P_1 = 43 \text{ mbar}$;
- de C'' à D : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;
- de D à A : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression P_1 à la pression P_2 , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu.



13. Placer les nouveaux points C', B', C'' sur le diagramme enthalpique du document réponse.

Réponse :

Voir cycle question 6.

14. Comparer les titres massiques en vapeur des points C' et C'' au titre massique en vapeur du point C. Quel est l'intérêt de la surchauffe ?

Réponse :

Graphiquement, $x_{C'} \approx 0,85$ et $x_{C''} \approx 0,77$ tous deux supérieurs à x_C . L'intérêt de la surchauffe est donc de limiter la fraction liquide de l'eau lors de la détente pour limiter la corrosion de la turbine et donc éviter son usure prématurée.

15. À l'aide du diagramme enthalpique, déterminer le nouveau rendement du cycle. Commenter.

Réponse :

Le nouveau rendement se calcule comme suit :

$$\eta_{\text{étagé}} = -\frac{w_{BC'} + w_{B'C''}}{q_{AB} + q_{C'B'}} = -\frac{h_{C'} - h_B + h_{C''} - h_{B'}}{h_B - h_A + h_{C'} - h_{B'}} \approx 0,38$$

Le rendement pour le cycle de Rankine étagé est proche du précédent, aux incertitudes de mesures près lors des lectures graphique. L'intérêt est donc de limiter l'usure des turbines, au prix d'une conception plus complexe.