

Problème : La centrale nucléaire, une machine à vapeur particulière



Figure 1

Le sujet porte sur les machines à vapeur et plus particulièrement les centrales nucléaires. La première partie du sujet est une analyse de document accompagnée de questions. Dans cette partie, il est demandé de représenter l'allure de cycle dans différents diagrammes thermodynamiques : ces tracés seront fait sur votre copie. Le deuxième partie est un sujet ouvert portant sur un cas particulier de machine à vapeur : la centrale nucléaire. Dans cette partie, on utilisera la diagramme de Mollier joint au sujet.

1 Étude générale du cycle d'une machine à vapeur

1.1 Le cycle de Carnot d'un moteur à vapeur

Un cycle de Carnot est un cycle réversible comprenant deux transformations adiabatiques et deux transformations isothermes : un cycle de Carnot correspond donc à un cycle réversible d'une machine ditherme.

Théorème de Carnot :

Les transformations cycliques dithermes réversibles fournissent le rendement maximal. Celui-ci ne dépend que des températures des deux sources et non de la nature du système qui évolue pendant ce cycle.

Le rendement d'une machine thermique ditherme réelle est inférieur au rendement d'un moteur réversible fonctionnant entre les deux mêmes sources.

Dans le cas d'un machine à vapeur, le système (S) décrivant les cycles de transformation peut exister sous les deux phases liquide et gazeuse. Notons qu'il s'agit généralement de l'eau. Le cycle de transformation est situé en grande partie sous la courbe de saturation. La figure (2) représente le principe de fonctionnement d'un tel moteur.

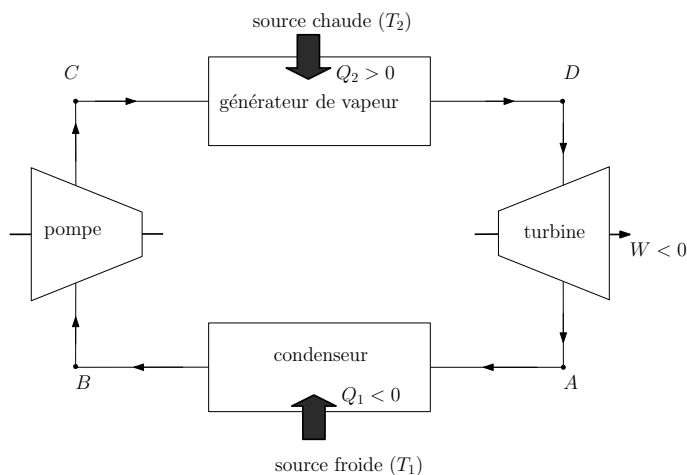


Figure 2 – Cycle de Carnot moteur à vapeur

1.2 Machine à vapeur réelle - Cycle de Rankine

1.2.1 Description

Les machines thermiques de type moteur réelles ne fonctionnent pas suivant un cycle de Carnot. On distingue, les machines à air (le fluide décrivant les cycles de transformation est monophasé) et les machines à vapeur (le fluide est cette fois diphasé).

Le rendement de ces machines est inférieur au rendement du cycle de Carnot associé.

Cycle de Carnot associé à un cycle moteur réel :

Le cycle de Carnot associé à un cycle moteur réel est le cycle fonctionnant entre les températures extrêmes du cycle réel : la température de la source chaude du cycle de Carnot est la température la plus chaude du cycle réel lors du contact avec la source chaude et la température de la source froide du cycle de Carnot est la température la plus froide du cycle réel lors du contact avec la source froide.

Les machines à vapeur réelles ne fonctionnent pas suivant un cycle de Carnot, mais suivant un cycle appelé cycle de Rankine dont le schéma de l'installation est donné figure (3).

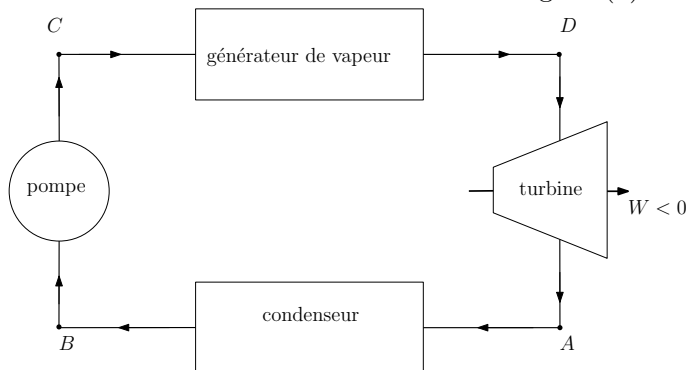


Figure 3 – installation de base d'une machine à vapeur

La différence principale entre les deux cycles est que dans le cas du cycle de Rankine l'eau arrive dans le générateur de vapeur (source chaude) à une température différente de celui-ci : on n'a donc pas une transformation isotherme.

1.2.2 Diagrammes

Les figures (4) et (5) représentent les diagrammes (P, v) et (T, s) d'un cycle de Rankine.

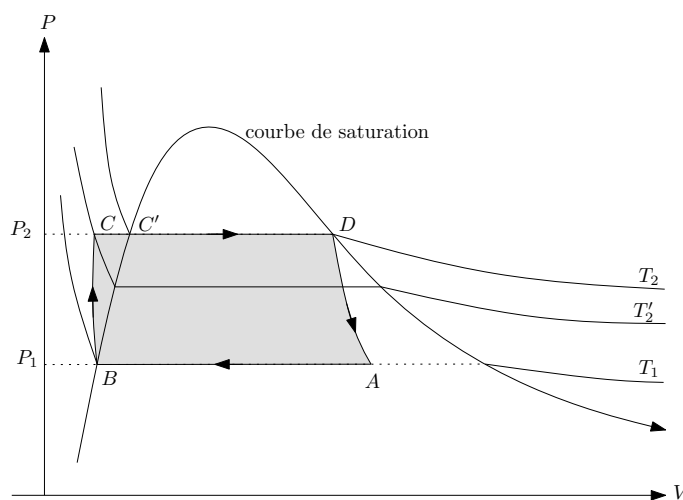


Figure 4 – Diagramme (P, v) d'un cycle de Rankine

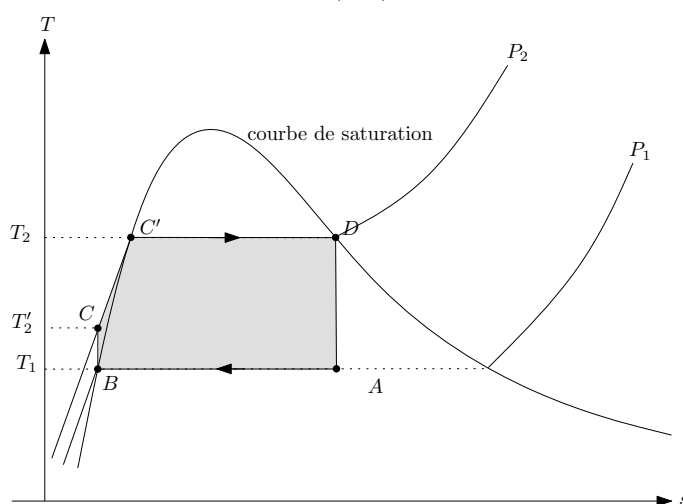


Figure 5 – Diagramme (T, s) d'un cycle de Rankine

Après passage dans la turbine (A), l'eau, en équilibre sous les deux phases gazeuse et liquide, est cependant majoritairement sous phase gazeuse. Elle est envoyée dans le condenseur : par contact thermique avec un courant d'eau venant de l'extérieur (source froide à la température T_1), l'eau du circuit voit sa phase liquide augmenter. A la sortie du condenseur, l'eau est sous forme d'eau saturante à la pression P_1 . L'eau arrive ensuite dans la pompe où elle est comprimée adiabatiquement (transformation rapide) jusqu'à la pression de la chaudière P_2 : elle arrive donc sous phase liquide dans la chaudière (C) mais à la température $T'_2 \neq T_2$. C'est ici que réside la différence fondamentale entre le cycle de Rankine et le cycle de Carnot : La transformation subie par l'eau lors du contact avec la source chaude n'est plus isotherme. On distingue deux phases lors du passage de l'eau dans la chaudière :

- ✘ La phase (CC') : il s'agit d'un échauffement isobare de l'eau, qui est sous phase liquide, jusqu'à la température de la chaudière T_2 , le point C' étant situé sur la courbe de saturation.
- ✘ La phase $(C'D)$: il s'agit de la vaporisation de l'eau. La transformation est isotherme et isobare.

Après le passage dans la chaudière, en D , l'eau est sous forme de vapeur sèche. Elle pénètre dans la turbine où elle se détend adiabatiquement : Elle cède du travail tout en se condensant. Dans de nombreux ouvrages, le cycle de Rankine présente une phase (BC') légèrement différente, moyennant une approximation étudiée ci-après.

1.2.3 Analyse de la portion (BC')

Dans la transformation (BC'), l'eau est sous phase liquide. En considérant qu'il s'agit d'un fluide incompressible, on peut dire que la compression adiabatique réversible (BC) n'a d'autre effet que d'augmenter la pression de l'eau de P_1 à P_2 , sa température restant constante ainsi que son volume.

Concernant la transformation (CC'), l'eau étant toujours sous phase liquide, on peut considérer qu'elle est non seulement isobare mais aussi isochore.

Enfin, on utilise le **résultat commun à tous les diagrammes : la courbe d'ébullition est confondue avec une isochore.**

Le cycle obtenu est le cycle de Rankine " de base ". Celui-ci peut subir des transformations pour des raisons techniques ou de rendement.

1.2.4 Cycle de Rankine avec surchauffe- cycle de Hirn

Le principe du cycle de Hirn est de sortir de la courbe de saturation en (D) afin d'éviter la condensation de l'eau lors du passage dans les turbines.

De fait, à partir de (D), on procède à un échauffement de la vapeur d'eau à pression constante de la température T_2 jusqu'à la température $T_3 > T_2$ (point (D')). Ainsi lors du passage dans la turbine, correspondant ici à la transformation (D'A), l'eau reste sous phase gazeuse. Notons que le point (A) se trouve en général sur la courbe de saturation.

1.2.5 Rendement d'un cycle de Rankine

Le rendement d'un cycle de Rankine peut être déterminé facilement par une approche graphique. On rappelle que le rendement d'un cycle moteur est défini par la relation :

$$r = \frac{|W|}{Q_{c,tot}}$$

Où W est le travail total reçu par le fluide au cours d'un cycle et où $Q_{c,tot}$ est la somme des transferts thermiques positifs reçu par le fluide à la traversée des différents éléments constituant la machine thermique au cours d'un cycle.

On introduit alors les surface S_1 (aire du cycle $(A_0B_0BAA_0)$) et S_2 (aire du cycle $(ABCC'DA)$) dans le cycle de Rankine, comme représenté figure (6).

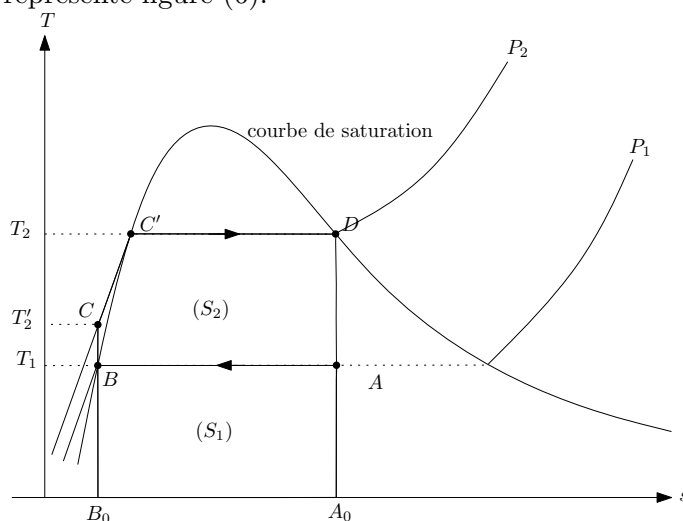


Figure 6 – Diagramme (T, s) d'un cycle de Rankine

Le rendement vaut alors :

$$r = \frac{S_2}{S_1 + S_2}$$

Questions

- Cycle de Carnot :
 - Déterminer le rendement d'un cycle de Carnot moteur fonctionnant entre les températures T_1 et $T_2 < T_1$
 - Donner l'allure d'un cycle de Carnot moteur dans les diagrammes (P, v) ; (T, s) ; (P, h) et Mollier. On pourra considérer que le cycle reste sous la courbe de saturation.
- Machines à vapeur réelles : Donner des exemples de machines à vapeur monophasées et diphasées. Proposer un ordre de grandeur pour les rendements des cycles de Carnot associés.
- Cycle de Rankine :
 - Pourquoi la transformation subie par l'eau dans le générateur de vapeur est-elle fondamentalement irréversible ?
 - Pourquoi cherche-t-on à éviter la condensation de la vapeur dans les turbines ?
 - Représenter l'allure d'un cycle de Rankine et du cycle de Carnot associé, dans des diagrammes (P, v) ; (T, s) ; (P, h) et Mollier.
 - Justifier l'expression du rendement proposé au paragraphe 1.2.5. Par une analyse graphique, montrer que le rendement du cycle de Carnot associé est effectivement plus grand que le rendement du cycle de Rankine comme prévu par le théorème de Carnot.
 - Pour quelle(s) raison(s) ne choisit-on pas un cycle de Carnot ?
- Cycle de Rankine de base : Représenter l'allure d'un cycle de Rankine de base dans les diagrammes (P, v) ; (T, s) ; (P, h) et Mollier. On précisera à chaque fois la position du point C .
- Cycle de Hirn : Représenter l'allure d'un cycle de Hirn dans les diagrammes (P, v) ; (T, s) ; (P, h) et Mollier.

2 Étude d'une centrale nucléaire

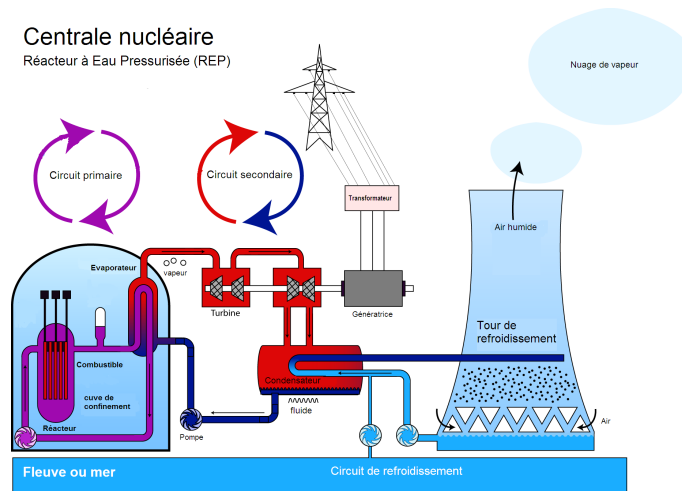


Figure 7 – Les différents éléments d'une centrale nucléaire

2.1 Présentation

Comme toute centrale thermique, une centrale nucléaire génère de la vapeur pour produire de l'électricité en faisant tourner des turbines. Au lieu de brûler du charbon ou du fioul, le générateur de vapeur utilise l'énergie nucléaire produite par la fission de l'uranium 235 dans le cœur du réacteur. Lorsqu'un noyau d'uranium se scinde en deux noyaux plus légers et quelques neutrons, la somme des masses des

produits de la réaction est inférieure à la masse du noyau initial : d'après la relation entre masse et énergie $E = m \times c^2$, on en déduit qu'il y a libération d'énergie. A titre de comparaison, notons que la fission d'un noyau d'uranium produit une énergie de 200 MeV alors que cette énergie correspond à la combustion de 55 tonnes de fioul.

L'installation d'une centrale nucléaire est composée de deux parties : une partie classique, identique à celle que l'on trouve dans toute centrale thermique, et une partie strictement nucléaire.

2.1.1 Partie nucléaire

Dans le cœur du réacteur, la réaction de fission de l' U^{235} se produit libérant de neutrons. Ces derniers peuvent à leur tour provoquer d'autres réactions de fission. On a ainsi une réaction en chaîne contrôlée par des barres de contrôle ayant un effet inhibiteur en absorbant les neutrons. L'énergie produite est extraite du cœur par un circuit d'eau sous pression maintenue à l'état liquide ($P \approx 150$ bar alors que la température atteint 320°C) : C'est le circuit primaire.

2.1.2 Partie classique

L'eau du circuit secondaire effectue des cycles caractéristiques des machines à vapeur.

- ✘ Elle est vaporisée dans le générateur de vapeur au contact de tubes parcourus par l'eau du circuit primaire.
- ✘ Afin d'éviter le phénomène de condensation de l'eau dans les turbines, on surchauffe l'eau après un passage dans une première série de turbines (turbines haute-pression notées τ_1) avant de l'envoyer dans une deuxième série de turbine (turbines basse-pression notées τ_2).
- ✘ La phase de condensation se fait grâce à une circulation d'eau extérieur à la température de 30°C .
- ✘ Le schéma de l'installation du circuit secondaire est donné figure (8) et le cycle décrit par l'eau est représenté figure (9).

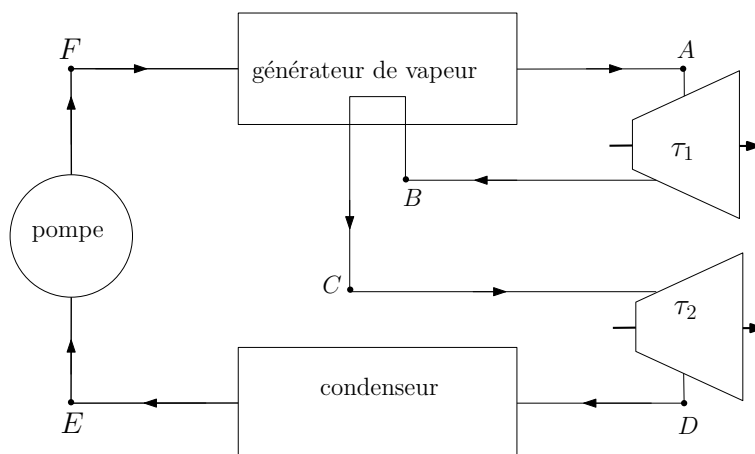


Figure 8 – Schéma du circuit secondaire

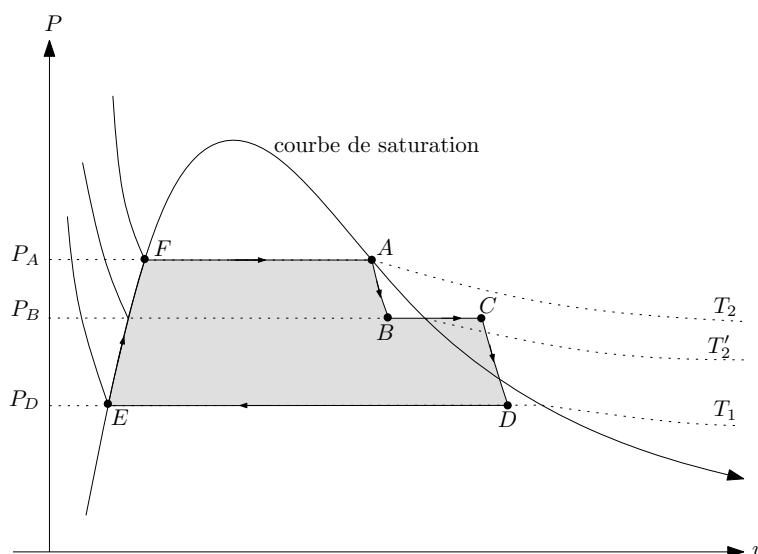


Figure 9 – Diagramme (P, v) d'un cycle de Rankine avec surchauffe

2.1.3 Détermination du débit massique de l'eau du circuit secondaire

On note :

- ✘ x le titre massique de la vapeur d'eau.
- ✘ h l'enthalpie massique de l'eau et on prendra $h = 0$ dans l'état $P^o = 1 \text{ atm}$, $T_o = 273 \text{ K}$
- ✘ s l'entropie massique de l'eau et on prendra $s = 0$ dans l'état $P^o = 1 \text{ atm}$, $T_o = 273 \text{ K}$

On souhaite déterminer le débit massique nécessaire pour que le réacteur étudié fournisse une puissance électrique $P = 1300 \text{ MW}$. Pour cela, on utilise les informations suivantes :

- ✘ $T_A = 287^\circ\text{C}$; $P_A = 70 \text{ atm}$; $P_B = 10 \text{ atm}$; $T_C = 270^\circ\text{C}$ et $P_D = 0.05 \text{ atm}$
- ✘ La capacité thermique massique de l'eau liquide, supposée constante, vaut $C_L = 4.18 \text{ kJ/K/kg}$

En utilisant le diagramme de Mollier ci-joint, déterminer le débit massique de l'eau dans le circuit secondaire ainsi que le rendement thermodynamique de l'installation. Le comparer au rendement du cycle de Carnot associé.