

## DM 12 – Étude du cycle de Rankine

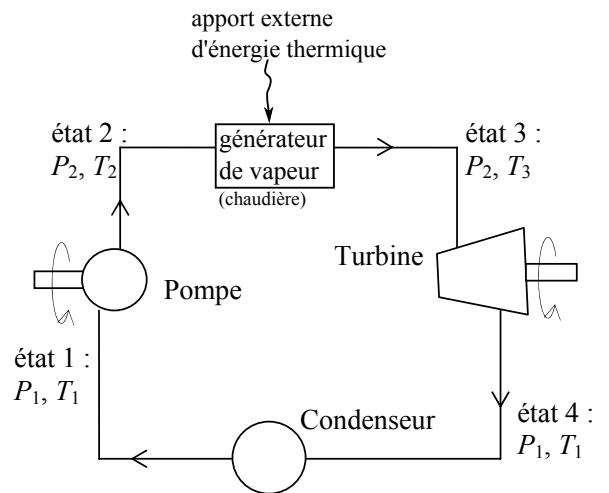
Une centrale thermique produit de la chaleur en brûlant un combustible fossile (charbon, gaz naturel). Une centrale nucléaire produit également de la chaleur en exploitant des réactions nucléaires de fission. Dans ces deux cas, il faut trouver un moyen de convertir cette énergie thermique en travail mécanique (rotation d'un arbre) qui peut ensuite, via un alternateur, être convertie en électricité.

La plupart des centrales thermiques ou nucléaires utilisent pour cela un cycle basé sur le cycle de Rankine (avec bien sûr des perfectionnements), que nous allons étudier ici. C'est aussi une version perfectionnée de ce cycle de base qui est utilisé dans les machines à vapeur des bateaux (la source de chaleur est alors une chaudière), ou dans les bateaux et sous-marins nucléaires (la source de chaleur est un réacteur nucléaire).

Le fluide caloporteur est l'eau. Il entre dans la pompe sous forme de liquide saturé (état 1), puis est comprimé de façon isentropique (adiabatique réversible) à la pression qui règne dans le générateur de vapeur (GV). En entrant dans le GV, l'eau se trouve sous forme de liquide comprimé à la pression  $p_2$  (état 2). Elle ressort sous forme de vapeur (état 3) à la même pression  $p_2$  puis pénètre dans la turbine où elle se détend de façon isentropique (adiabatique réversible) en entraînant l'arbre de l'alternateur. À la sortie de la turbine (état 4), l'eau est diphasée. Ce mélange liquide-vapeur est alors liquéfié à pression constante dans le condenseur et ressort dans l'état 1.

Il n'y a pas de parties mobiles dans le GV et dans le condenseur.

On utilise le diagramme entropique de l'eau fourni à la fin du document (doc. 2). Il représente la température en fonction de l'entropie massique de l'eau. On donne également une représentation schématisée (doc. 1) du diagramme  $T-s$ .



1. Sur cette représentation schématisée (doc. 1), indiquer la courbe de rosée, d'ébullition, le domaine du liquide, de la vapeur, de l'équilibre diphasique, ainsi que ce qui représente une évolution isobare et une évolution isenthalpique.

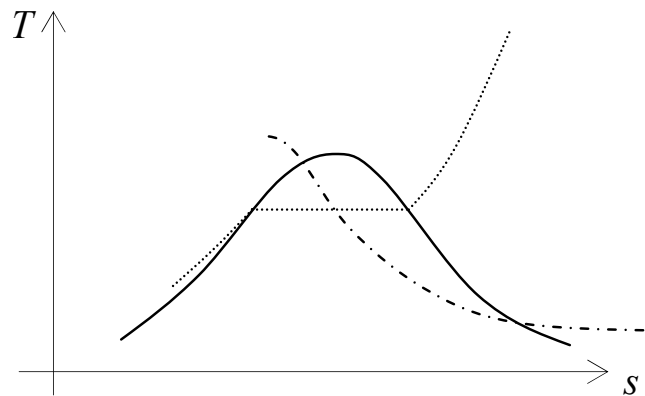
On donne  $p_2 = 50 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $p_1 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $T_3 = 773 \text{ K}$  ( $500^\circ\text{C}$ ). Les points 1 et 2 figurent déjà sur le diagramme  $T-s$  de l'eau fourni.

2. Sur le diagramme expérimental (doc. 2), placer les points 3 et 4 qui correspondent aux états 3 et 4 du fluide, et tracer le cycle de Rankine décrit par le fluide.
3. Toujours à l'aide du même diagramme, donner les valeurs numériques de  $T_1$ ,  $h_3$ ,  $h_4$ ,  $s_4$ ,  $s_v(T_1)$  entropie massique de la vapeur juste saturante à  $T_1$ , et  $s_l(T_1)$  entropie massique du liquide juste saturé à  $T_1$ .
4. Dédurre de la question précédente la valeur du titre en vapeur  $x_4$  à la sortie de la turbine. On exprimera pour cela  $s_4$  en fonction de  $x_4$ ,  $s_v(T_1)$  et  $s_l(T_1)$ .
5. On donne  $h_1 = 440 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  et  $h_2 = 475 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Exprimer puis calculer le transfert thermique massique  $q_{\text{GV}}$  reçu par le fluide dans le GV. Commenter son signe.
6. Faire de même pour le transfert thermique massique  $q_{\text{cond}}$  reçu par le fluide dans le condenseur. Commenter son signe.

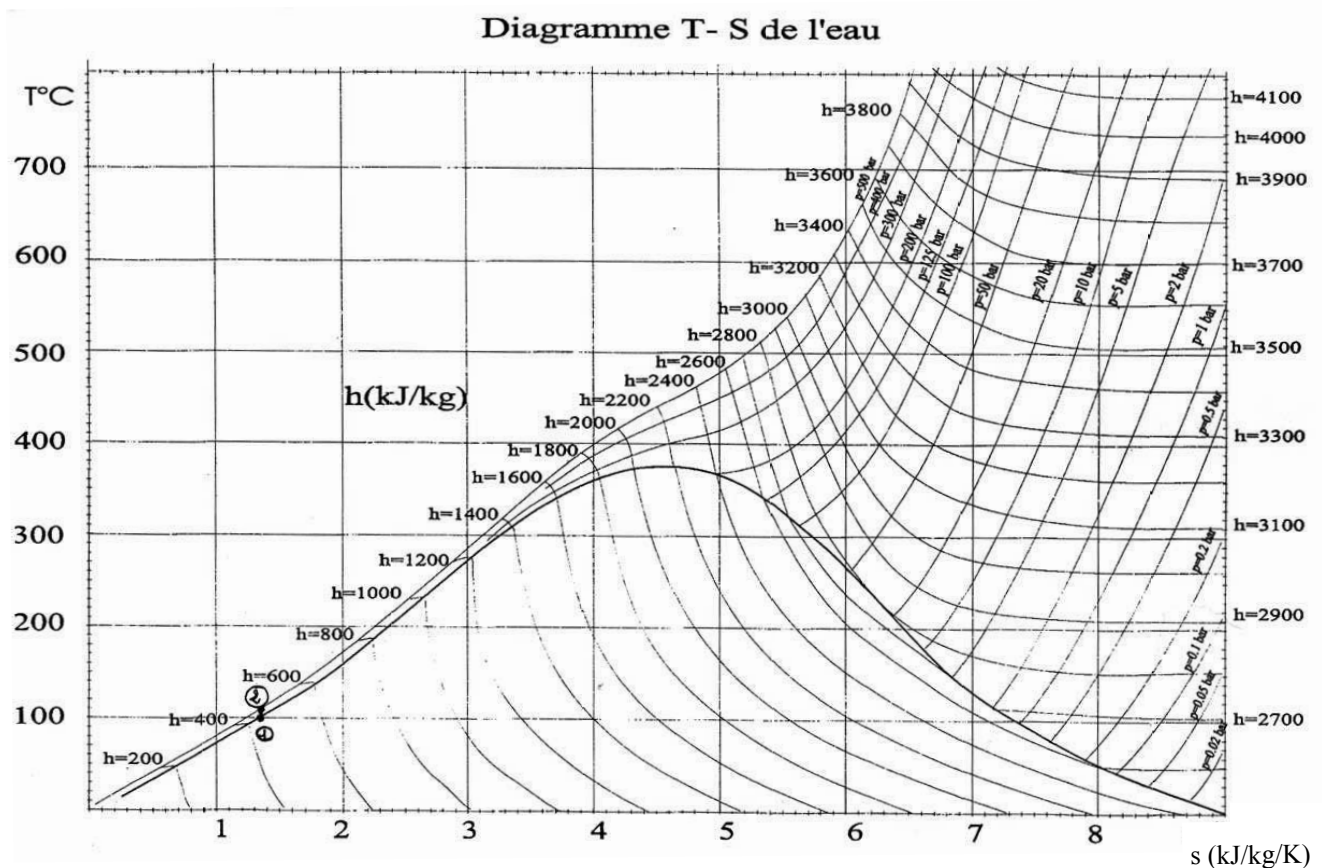
7. On considère qu'il y a une masse  $m$  d'eau en écoulement dans le système. En appliquant le premier principe sur un cycle au fluide caloporteur, donner l'expression du travail reçu  $W$  par le fluide au cours du cycle en fonction de  $m$ ,  $q_{GV}$  et  $q_{cond}$ .
8. Définir le rendement  $\eta$  du cycle, puis donner son expression en fonction de  $q_{GV}$  et  $q_{cond}$ , et enfin donner sa valeur numérique dans le cas considéré ici (les données de l'énoncé correspondent à la propulsion d'un sous-marin nucléaire).
9. Si on estime que le sous-marin a besoin d'une puissance motrice de 60 MW sur l'arbre en sortie de la turbine, quelle doit être la puissance thermique apportée par le réacteur nucléaire ?
10. (Facultatif) Calculer le travail indiqué massique reçu par le fluide lors de son passage dans la pompe, puis dans la turbine.

Le travail nécessaire au fonctionnement de la pompe est en fait prélevé sur l'arbre moteur de la turbine. Il convient donc de le retrancher au travail produit par la turbine. Donner l'expression puis la valeur du travail massique exploitable  $w_{net}$  que l'on récupère sur l'arbre moteur.

Enfin, quel débit massique faut-il imposer dans la machine pour assurer une puissance motrice de 60 MW sur l'arbre en sortie de la turbine ?



(doc. 1) Diagramme T-s schématique à compléter.



(doc. 2) Diagramme T-s de l'eau à compléter avec le cycle.