



BLAISE PASCAL  
PT 2021-2022

DM 13 – à rendre vendredi 4 mars

# Thermodynamique industrielle

Vous êtes invités à porter une attention particulière à la rédaction et au soin de votre copie. Les numéros des questions doivent être mis en évidence et les résultats encadrés.

Travailler avec vos cours et TD ouverts est **chaudement recommandé** : un DM est un entraînement, pas une évaluation. En cas de besoin, **n'hésitez pas à me poser des questions**, à la fin d'un cours ou sur le serveur de la classe.

Ce « DM facultatif » est donné pour votre travail personnel mais n'est pas à rendre, et son corrigé est déjà en ligne.



Flasher ce code pour  
accéder au corrigé

## Optimisation d'une installation motrice à vapeur

De nombreuses installations motrices à vapeur, au premier rang desquelles figurent toutes les centrales électriques, fonctionnent suivant un cycle thermodynamique dérivé d'un même cycle de base, le cycle de Rankine. Cet exercice a pour objectif d'étudier le cycle de Rankine et une amélioration possible appelée soutirage de vapeur. Le fluide utilisé est de l'eau, dont le diagramme des frigoristes est donné en fin d'énoncé.

### Hypothèses de travail :

- (H1) Les variations d'énergies cinétique et potentielle sont partout négligées ;
- (H2) Toutes les évolutions sont supposées réversibles, sauf dans le détendeur éventuel ;
- (H3) Tous les éléments de l'installation sont supposés globalement calorifugés ;
- (H4) La puissance indiquée reçue par le fluide au niveau des pompes qui ne compriment que du liquide est négligée ;
- (H5) L'évolution du fluide dans les conduites de l'installation est supposée adiabatique, réversible, isobare et isotherme.

Conformément aux exigences du jury de l'épreuve de thermodynamique, tu justifieras soigneusement tes réponses, et en particulier toutes les simplifications du premier principe, et tu complèteras le diagramme de manière lisible.

### A - Cycle de Rankine

L'installation se compose de quatre éléments en système fermé, représentés figure 1 : une pompe d'alimentation, un générateur de vapeur (chaudière à gaz, réacteur nucléaire, etc.), une turbine à vapeur et un condenseur équipé d'un circuit de réfrigération au contact de l'environnement extérieur. L'installation est parcourue avec un débit massique  $D_m$ .

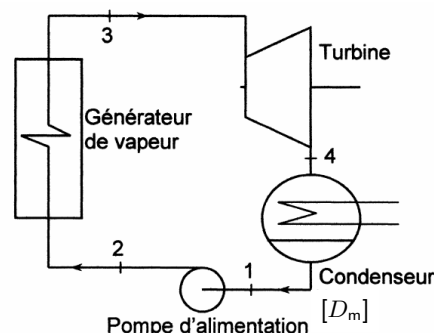


Figure 1 – Installation motrice à vapeur simple.

La pompe alimente le générateur de vapeur en liquide haute pression (point 2,  $P_2 = 30$  bar). Dans le générateur de vapeur, isobare, le liquide est porté à ébullition puis vaporisé totalement. Pour simplifier l'étude, on suppose qu'il n'y a pas de surchauffe : la turbine est alimentée en vapeur saturante sèche (point 3). Enfin, après détente dans la turbine, la vapeur humide basse pression (point 4,  $P_4 = 0,1$  bar) se liquéfie totalement dans un condenseur isobare. Pour simplifier de nouveau, on suppose que la liquéfaction cesse à l'état de liquide juste saturant (point 1).

- 1 - Montrer que l'évolution dans la pompe est isenthalpique.
- 2 - Représenter en rouge le cycle de Rankine sur le diagramme des frigoristes du document réponse en justifiant.
- 3 - Définir le rendement thermodynamique  $\eta_0$  du cycle en fonction des puissances échangées dans les différents éléments de l'installation, puis des enthalpies massiques aux différents points du cycle. Le calculer numériquement.
- 4 - Comparer la valeur de  $\eta_0$  au rendement de Carnot  $\eta_{\max}$  obtenu à partir des températures extrêmes du fluide au cours du cycle.

## B - Installation à soutirage avec réintroduction du liquide en aval

Étudions maintenant une amélioration de l'installation précédente dans laquelle est ajoutée un réchauffeur, voir figure 2. Il s'agit d'un échangeur double flux qui permet de réchauffer l'eau entre la sortie de la pompe principale et l'entrée dans le générateur de vapeur. Le fluide chaud est fourni par un soutirage de vapeur à la turbine, réintroduit dans le circuit principal en aval du réchauffeur par l'intermédiaire d'une pompe secondaire.

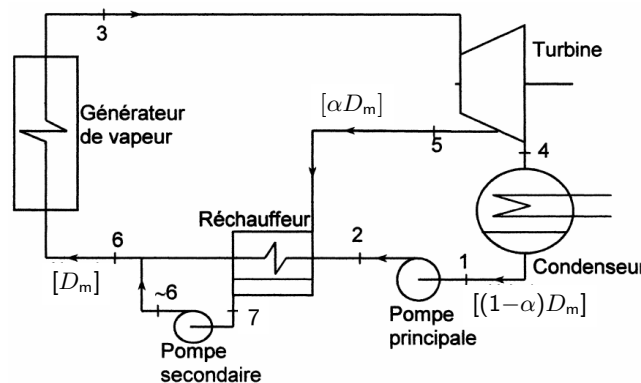


Figure 2 – Installation motrice à vapeur à soutirage et réintroduction du liquide en aval du détenteur.

Plus précisément, de la vapeur humide (fluide diphasé, point 5) est soutirée au cours de la détente dans la turbine à une pression intermédiaire  $P_5$  ( $P_3 > P_5 > P_4$ ). La condensation de la partie vapeur de ce fluide diphasé permet de réchauffer l'eau liquide sortant de la pompe principale (état 6,  $T_6 = 140^\circ\text{C} > T_2$ ,  $P_6 = P_2$ ). On note  $D_m$  le débit massique traversant le générateur de vapeur, et  $\alpha D_m$  le débit massique de fluide soutiré. On suppose que les deux fluides quittent le réchauffeur à la même température  $T_6$ , et que le fluide soutiré en sort à l'état de liquide saturant.

- 5 - Montrer que  $T_5 = T_6 = T_7$ . En déduire la position des points 5, 6 et 7 sur le diagramme des frigoristes en justifiant, et représenter en bleu les transformations subies dans le circuit de soutirage. Déterminer le titre en vapeur de la vapeur soutirée.
- 6 - En procédant à deux bilans thermodynamiques, montrer que

$$h_6 = (1 - \alpha)h_2 + \alpha h_5$$

En déduire la valeur de  $\alpha$  pour le cycle étudié.

L'élément d'installation est sans pièce mobile, donc  $\delta W_i = 0$ , et réversible, donc  $\delta S_{\text{cr}} = 0$ . 7 - Montrer que la puissance indiquée fournie par la turbine est donnée par

$$\mathcal{P}_{\text{turb}} = D_m [(1 - \alpha)h_4 + \alpha h_5 - h_3] .$$

- 8 - En déduire l'expression du rendement thermodynamique  $\eta$  du cycle à un soutirage en fonction de  $\alpha$  et des enthalpies massiques aux différents points du cycles. Calculer sa valeur numérique et comparer à  $\eta_0$ .

## C - Installation à soutirage avec réintroduction du liquide en amont

On étudie une installation voisine de la précédente, à ceci près que le fluide soutiré est réintroduit dans le circuit principal en amont du réchauffeur par l'intermédiaire d'un détenteur statique, voir figure 3. Le débit massique traversant le générateur de vapeur est toujours noté  $D_m$ , et le débit massique de fluide soutiré alimentant le réchauffeur est désormais noté  $\beta D_m$ .

- 9 - Placer le point 8 sur le diagramme des frigoristes en justifiant la réponse. Représenter en vert les transformations subies dans le nouveau circuit de soutirage.
- 10 - Montrer que  $h_6 = (1 - \beta)h_2 + \beta h_5$ .
- 11 - Comparer le débit de vapeur à soutirer pour obtenir la même enthalpie massique  $h_6$  avec réintroduction de liquide en aval ou en amont du réchauffeur.



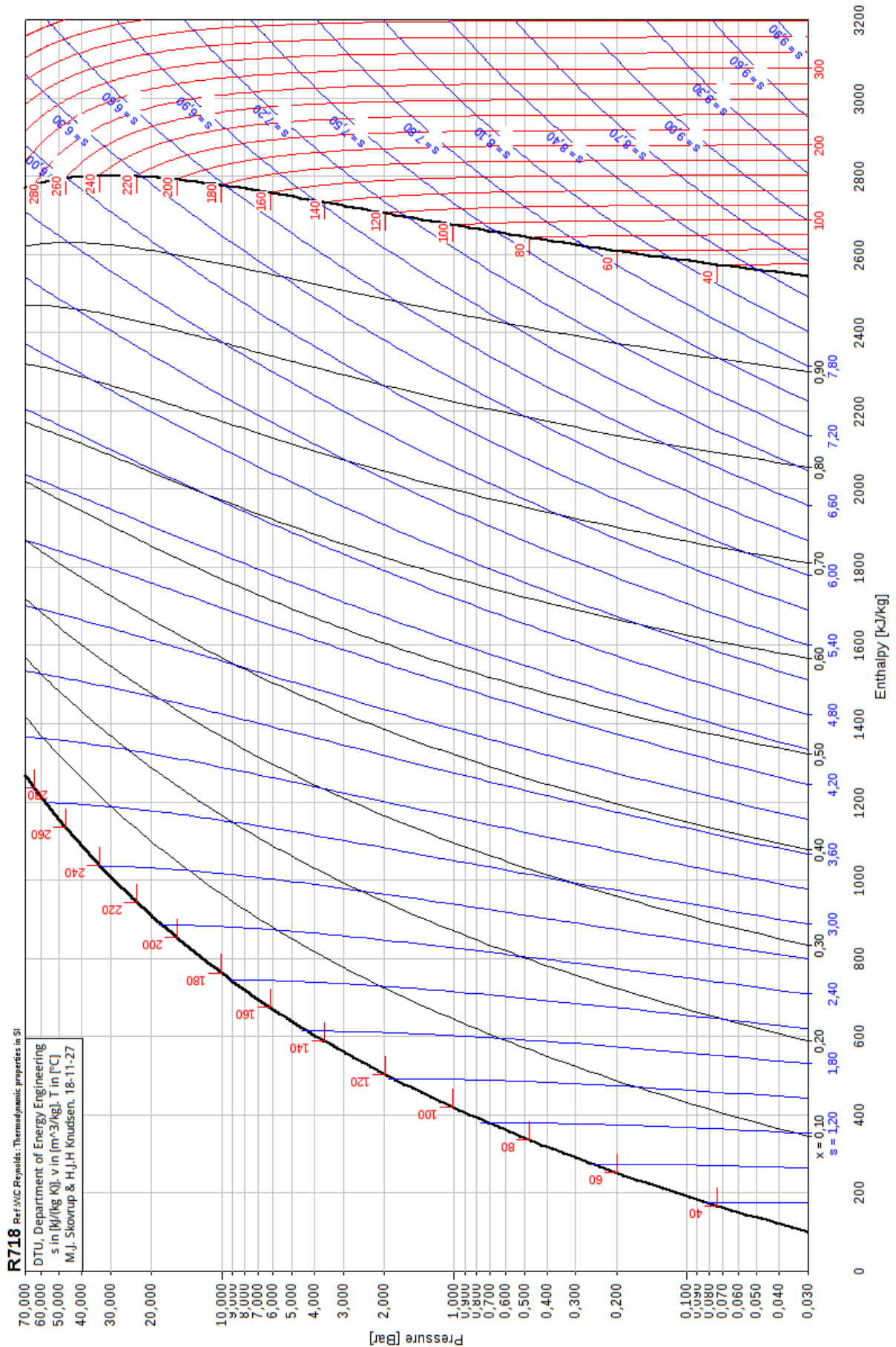


Figure 4 – Diagramme enthalpique de l'eau.