

Machines thermiques

1 Moteur Stirling

Une vidéo du fonctionnement du moteur Stirling est disponible à l'adresse suivante :

<https://www.youtube.com/watch?v=GqlapDKtvzc>.

Le cycle Stirling idéalisé peut être modélisé par une série de quatre transformations successives sur un gaz parfait. La mise en contact du gaz avec un thermostat "chaud" produit un échauffement isochore, puis une détente isotherme. Le gaz est ensuite mis en contact (opération effectuée par le piston de refoulement ou "déplaceur") avec le thermostat froid, ce qui provoque dans un premier temps un refroidissement isochore puis une compression isotherme.

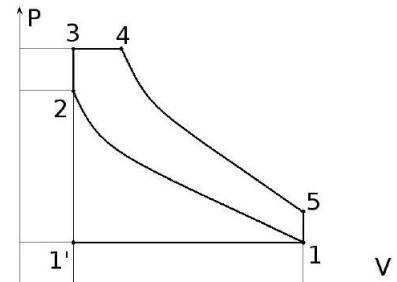
1. Représenter le cycle dans un diagramme de Watt.
2. En supposant chaque transformation effectuée infiniment lentement (équilibre mécanique lors des transformations isothermes), exprimer le transfert thermique avec la source chaude et le travail effectué sur le cycle en fonction uniquement du rapport entre le volume maximal et minimal noté $\alpha \geq 1$, du rapport des températures des thermostats noté $\beta = T_f/T_c$, et de γ le facteur de Laplace.
3. Montrer que le rendement vérifie :

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{(\gamma - 1)\ln(\alpha)} + \frac{1}{1 - \beta}}$$

4. Montrer que si le rapport des volumes α tend vers l'infini, le rendement devient égal à celui de Carnot. A quoi correspond concrètement ce cas limite ?

2 Moteur Diesel

Dans les moteurs Diesel à double combustion, le cycle décrit par le mélange air-carburant est modélisable par celui d'un système fermé représenté en coordonnées de Watt ci-contre. Après la phase d'admission $1' \rightarrow 1$ qui amène le mélange au point 1 du cycle, celui-ci subit une compression adiabatique supposée réversible jusqu'au point 2. Après injection du carburant en 2, la combustion s'effectue d'abord de façon isochore de 2 à 3 puis se poursuit de façon isobare de 3 à 4. La phase de combustion est suivie d'une détente adiabatique à nouveau prise réversible de 4 à 5, puis d'une phase d'échappement isochore $5 \rightarrow 1$ puis isobare $1 \rightarrow 1'$.



Au point 1 du cycle, la pression $p_m = 1,0$ bar et la température $T_m = 293$ K sont minimales. La pression maximale, aux points 3 et 4, est $p_M = 60$ bar et la température maximale, au point 4, vaut $T_M = 2073$ K. Le rapport volumétrique de compression vaut $\beta = V_M/V_m = 17$.

On suppose que le mélange air-carburant se comporte exactement comme l'air, c'est-à-dire comme un gaz parfait diatomique de masse molaire $M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, et de capacités thermiques respectives C_P et C_V , et on note $\gamma = C_P/C_V = 1,4$

- 1 - Exprimer les températures T_2 , T_3 et T_5 en fonction de p_m , p_M , T_m , T_M et β . Calculer les valeurs numériques.
- 2 - Calculer le transfert thermique massique q_c reçu par l'air au cours de la phase de combustion $2 \rightarrow 4$.
- 3 - Calculer le transfert thermique massique q_f échangé avec le milieu extérieur entre les points 5 et 1.
- 4 - En déduire le travail massique w échangé au cours d'un cycle.
- 5 - Définir et calculer le rendement de ce moteur. Commenter la valeur trouvée.

3 Cycle de Beau de Rochas

On se propose d'étudier une partie du cycle thermodynamique de Beau de Rochas qui est un modèle permettant d'étudier les moteurs à essence. Le système étudié physiquement est le mélange {air+essence} contenu dans un piston. Nous supposons que ce mélange se comporte comme n moles de gaz parfait, de température et pression initiale, $T_1 = 300$ K et $p_1 = 1$ bar. Le coefficient γ , rapport entre la capacités thermique à pression et à volume constant du mélange, est égal à 1,33. On posera $r = V_1/V_2$. Les quatre transformations, formant un cycle, se déroulent comme suit :

- 1 \rightarrow 2 Le gaz subit une compression polytropique d'ordre γ . Le volume V_1 est divisé par 10 au cours de cette transformation (concrètement, cette étape représente la compression du mélange par le piston).
- 2 \rightarrow 3 Le gaz subit un échauffement isochore. La température du mélange monte à $T_3 = 2,0 \cdot 10^3$ K (concrètement, une étincelle provoque l'explosion du mélange dans un volume minimal).
- 3 \rightarrow 4 Le gaz subit une détente polytropique d'ordre γ (concrètement, cette étape représente le temps moteur, le gaz chaud repoussant le piston).
- 4 \rightarrow 1 Le gaz subit un refroidissement isochore (concrètement, la soupape d'échappement ramène les gaz à pression atmosphérique).

11. Reporter dans un tableau l'expression des variables d'états T_i, p_i, V_i pour chaque étape $i = \{1, 2, 3, 4\}$ en fonction des seules variables $r, T_1, p_1, V_1, \gamma, n, T_3$.
12. Représenter de manière schématique les 4 transformations sur un diagramme de Watt (-1 point si les axes ne sont pas légendés).
13. Le volume $V_1 - V_2$ correspond à la cylindrée unitaire, elle vaut dans notre cas 0,54 L. En déduire la valeur de V_1, V_2 et n .
14. Utilisez les résultats précédents pour déterminer pour chaque étape les valeurs de T_i, p_i, V_i . Pour les calculs, un chiffre significatif suffit et à titre d'indication :
 $10^{0,33} = 2,14$; $10^{1,33} = 21,4$; $0,1^{1,33} = 0,0468$; $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Étudions les transferts thermiques et mécaniques reçus par le gaz au cours de ces transformations.

15. Comment justifier de manière simple que le cycle est moteur ?
16. Les transformations 2 \rightarrow 3 et 4 \rightarrow 1 étant isochores, que vérifie les transferts d'énergie reçus par le système $W_{2 \rightarrow 3}$ et $W_{4 \rightarrow 1}$ sous la forme du travail des forces de pressions ?
17. Les transformations 1 \rightarrow 2 et 3 \rightarrow 4 étant adiabatiques, que vérifient les transferts thermiques reçus par le système $Q_{1 \rightarrow 2}$ et $Q_{3 \rightarrow 4}$?
18. Comment s'exprime la capacité thermique à volume constant d'un gaz parfait en fonction de n, R et γ ?
19. Utiliser la loi de Joule pour exprimer la variation d'énergie interne (notée $\Delta_{1 \rightarrow 2}U$, $\Delta_{2 \rightarrow 3}U$, etc.) de chaque transformation en fonction des seules variables $r, T_1, p_1, V_1, \gamma, n, T_3$.
20. Reporter dans un tableau l'expression des grandeurs W , Q et ΔU pour chaque transformation en fonction des seules variables $r, T_1, p_1, V_1, \gamma, n, T_3$.
21. Calculer le travail total reçu au cours du cycle. Commentez le signe.
22. Calculer le transfert thermique reçu au cours de l'étape 2 \rightarrow 3.
23. Le rendement noté η du moteur thermique vérifie :

$$\eta = \frac{\text{grandeur utile}}{\text{grandeur qui coûte}} = \frac{-W}{Q_{2 \rightarrow 3}}$$

Après avoir donné une expression en fonction des seules variables $r, T_1, p_1, V_1, \gamma, n, T_3$, calculer ce rendement.

24. Le moteur est constitué de 4 cylindres comme celui étudié et tourne à 3000 tours/min. Calculer la puissance développée par le moteur.
25. (Bonus) Quel est l'impact d'une augmentation de la cylindrée sur le rendement et sur la puissance développée par le moteur ? On pourra étudier les expressions littérales du rendement et de la puissance.

4 Climatisation d'une voiture

D'après écrit ATS 2012 - Correction sur le site d'Étienne Thibierge

La quasi-totalité des véhicules neufs sont aujourd'hui équipés d'une climatisation. Pour refroidir l'air intérieur du véhicule, un fluide frigorigène, l'hydrofluorocarbure HFC désigné par le code R134a, effectue en continu des transferts énergétiques entre l'intérieur, l'extérieur du véhicule et le compresseur, voir figure 1 .

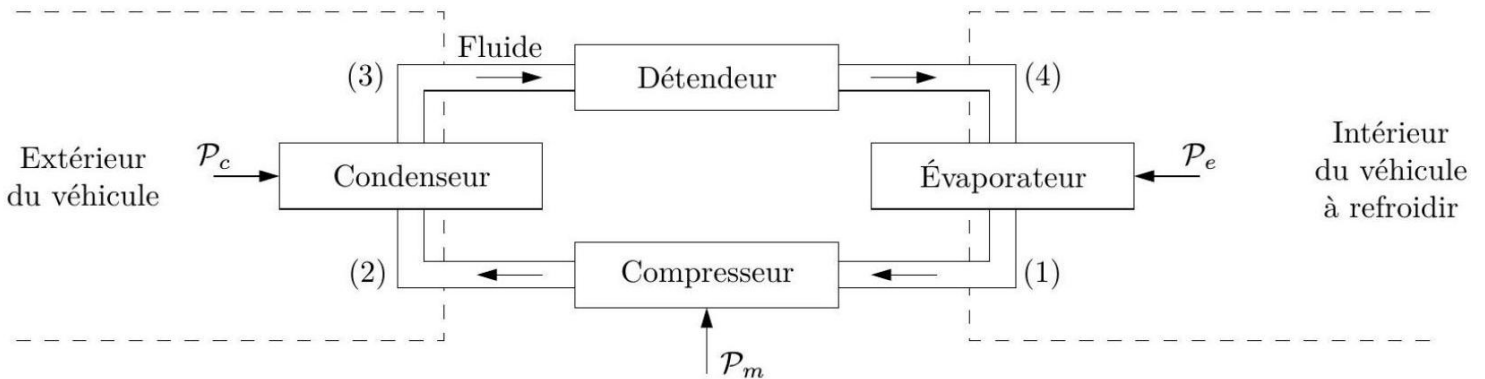


FIGURE 1 – Structure d'un climatiseur de voiture.

1. Les chlorofluorocarbures ou CFC, comme le fréon, sont des fluides frigorigènes qui ont été très longtemps utilisés. Pourquoi ces fluides ont-ils été abandonnés ?

Sur le diagramme des frigoristes (P, h) figure 2 de l'hydrofluorocarbure HFC, de masse molaire $M = 32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, sont représentés :

- ☞ La courbe de saturation de l'équilibre liquide-vapeur de l'hydrofluorocarbure HFC (en trait fort) ;
- ☞ Les isothermes pour des températures comprises entre -40°C et 160°C par pas de 10°C ;
- ☞ Les isentropes pour des entropies massiques comprises entre $1,70 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $2,25 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ par pas de $0,05 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ☞ Les isotitres en vapeur sous la courbe de saturation pour des titres massiques en vapeur x_V variant de 0 à 1 par pas de 0,1 .

La pression est en bar et l'enthalpie massique en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Lors de l'exploitation du diagramme, les résultats seront donnés avec les incertitudes suivantes : $\Delta h = \pm 5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\Delta s = \pm 50 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\Delta x = \pm 0,05$, $\Delta T = \pm 5^\circ\text{C}$, $\Delta p = \pm 5\%$

2. Indiquer sur le diagramme les domaines liquide, vapeur et équilibre liquide-vapeur du fluide.
3. Dans quel domaine du diagramme le fluide à l'état gazeux peut-il être considéré comme un gaz parfait ?

On étudie dans la suite l'évolution du fluide au cours d'un cycle en régime permanent. Le débit massique vaut $D_m = 0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. On rappelle l'expression du premier principe appliqué à un système ouvert (par exemple le compresseur) en régime permanent,

$$D_m (h_s - h_e) = \mathcal{P}_w + \mathcal{P}_q$$

avec :

- ☞ D_m est le débit massique de fluide au travers du système ouvert,
- ☞ \mathcal{P}_w est la puissance mécanique algébriquement reçue de l'extérieur par le fluide en mouvement au niveau des parties mobiles du système ouvert,
- ☞ \mathcal{P}_q est la puissance thermique algébriquement reçue de l'extérieur par le fluide en mouvement à travers la paroi entourant le système ouvert,
- ☞ h_s et h_e sont les enthalpies massiques respectivement en entrée et en sortie du système ouvert.

La puissance thermique \mathcal{P}_e reçue par le fluide dans l'évaporateur permet la vaporisation isobare complète du fluide venant de (4) et conduit au point (1) de la vapeur à température $T_1 = 5^\circ\text{C}$ et pression $P_1 = 3 \text{ bar}$. Aucune puissance mécanique n'est fournie au fluide dans l'évaporateur.

4. Placer le point (1) sur le diagramme figure 2. Relever la valeur de l'enthalpie massique h_1 et de l'entropie massique s_1 du fluide au point (1).

Le compresseur aspire la vapeur (1) et la comprime de façon adiabatique et isentropique avec un taux de compression $r = P_2/P_1 = 6$

5. Déterminer P_2 . Placer le point (2) sur le diagramme. Relever la valeur de la température T_2 et celle de l'enthalpie massique h_2 en sortie du compresseur.

6. Déterminer la valeur de la puissance mécanique \mathcal{P}_m reçue par le fluide lors de son passage dans le compresseur. Commenter le signe de \mathcal{P}_m .

Le fluide sortant du compresseur entre dans le condenseur dans lequel il est refroidi de manière isobare jusqu'à la température $T_3 = 60^\circ\text{C}$.

7. Placer le point (3) sur le diagramme. Relever la valeur de l'enthalpie massique h_3 en sortie du condenseur.

Le fluide sortant du condenseur est détendu dans le détendeur supposé adiabatique jusqu'à la pression de l'évaporateur P_1 , ce qui constitue l'état (4). Un détendeur ne contient pas de parties mobiles, si bien que le fluide n'y reçoit aucun travail mécanique.

8. Montrer que la transformation dans le détendeur est isenthalpique.

9. Placer le point (4) sur le diagramme et tracer le cycle complet. Relever la valeur de la température T_4 et le titre en vapeur x_4 en sortie du détendeur.

10. En déduire la puissance thermique \mathcal{P}_e échangée par le fluide lors de son passage à travers l'évaporateur entre (4) et (1). L'air intérieur du véhicule est-il refroidi ?

11. Définir l'efficacité e , ou coefficient de performance, du climatiseur. Calculer sa valeur.

12. Comparer cette valeur à celle d'un climatiseur de Carnot fonctionnant entre la température de l'évaporateur et la température de liquéfaction du fluide sous la pression P_2 . Commenter le résultat obtenu.

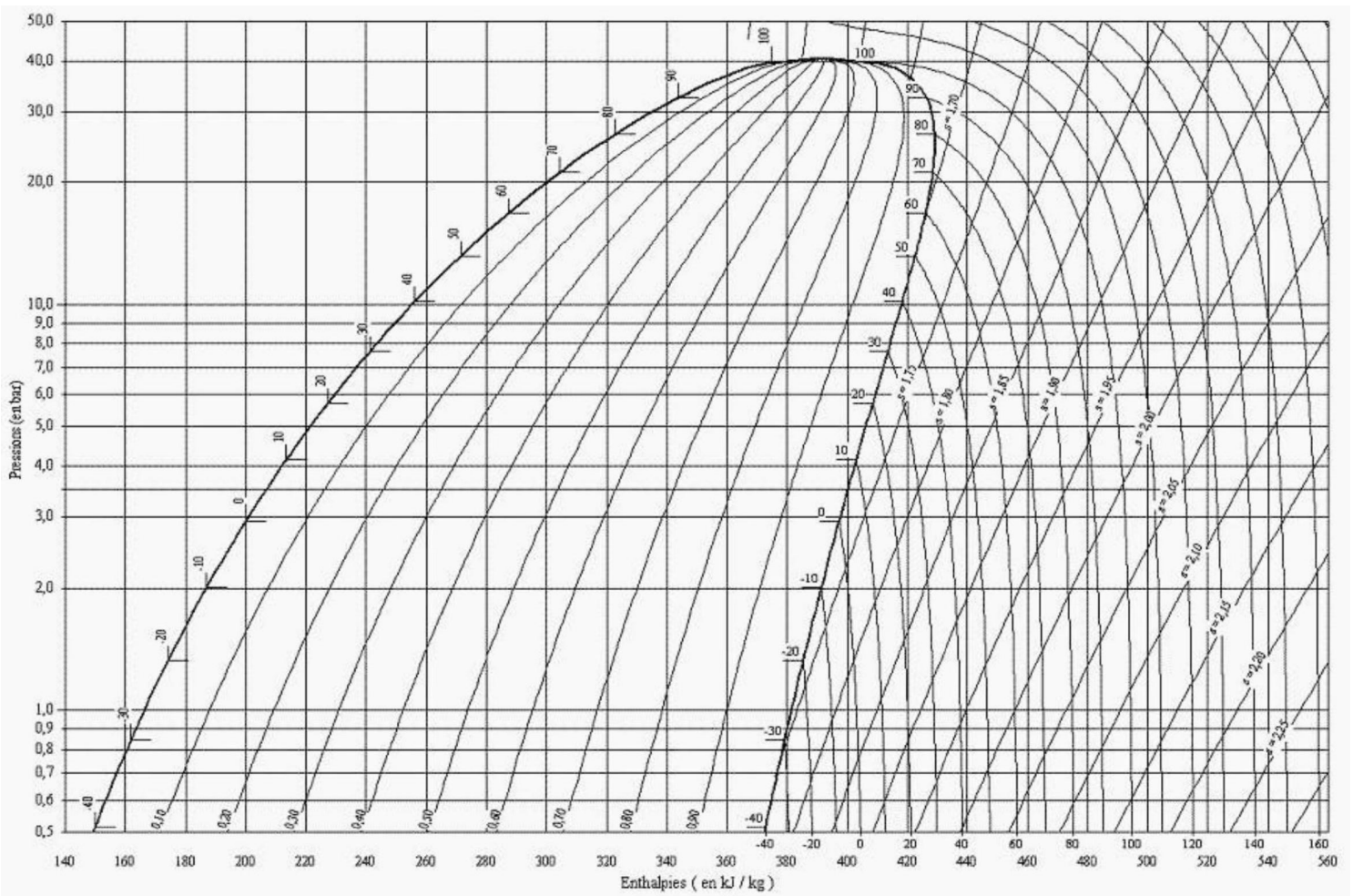


FIGURE 2 – Diagramme des frigorigènes du R134a.

5 Circuit secondaire d'une centrale nucléaire REP

Cet exercice est extrait d'un sujet de Centrale, mais filière MP, où la thermodynamique est moins présente qu'en filière *PT*. Les questions sont tout à fait susceptibles d'être posées en épreuve *B* de la banque *PT*, où le cycle de Rankine est d'ailleurs déjà tombé. La France compte 19 centrales nucléaires en exploitation, dans lesquelles tous les réacteurs (58 au total) sont des réacteurs à eau pressurisée REP. Actuellement, ces installations fournissent près de 80% de l'électricité produite en France. Chaque centrale est soumise à un référentiel de normes de sûreté et de sécurité évoluant en fonction des enseignements des incidents passés nationaux ou internationaux.

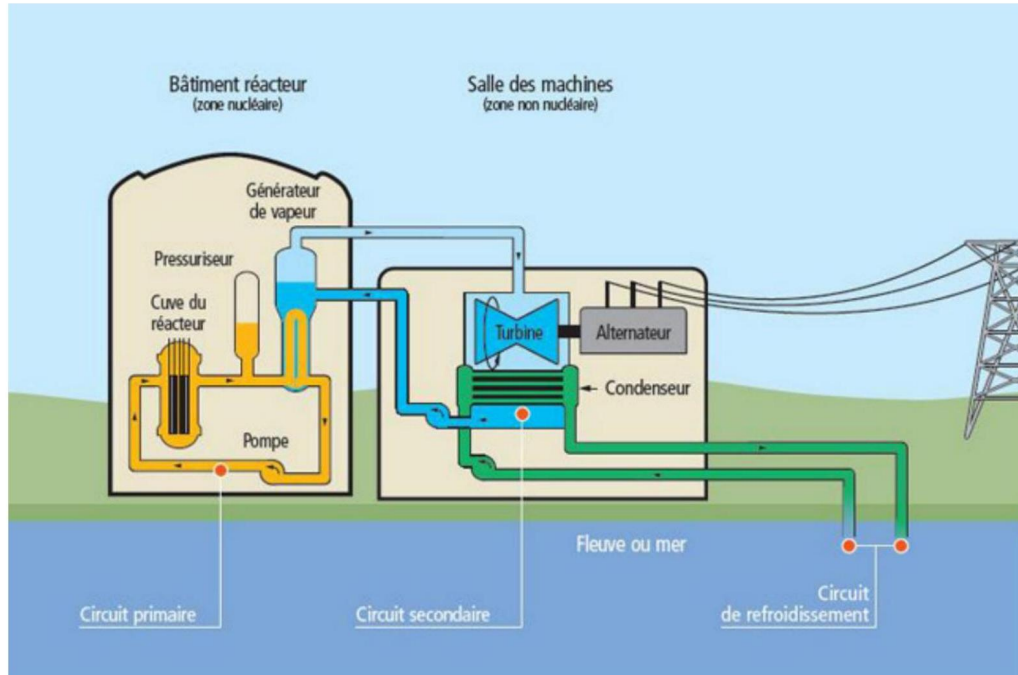


FIGURE 3 – Schéma global d'une centrale nucléaire.

Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité, qui utilise comme chaudière un réacteur nucléaire pour produire de la chaleur. Une centrale nucléaire REP est constituée de deux grandes zones, voir figure 3 :

▷ une zone non nucléaire (salle des machines). Dans cette partie, semblable à celle utilisée dans les centrales thermiques classiques, s'écoule de l'eau dans un circuit secondaire. Cette eau est évaporée dans le Générateur de Vapeur (GV) par absorption de la chaleur produite dans la zone nucléaire, puis elle entraîne une turbine (T) couplée à un alternateur produisant de l'électricité, ensuite elle est condensée au contact d'un refroidisseur (rivière, mer ou atmosphère via une tour aéroréfrigérante) et enfin, elle est comprimée avant d'être renvoyée vers le générateur de vapeur ;

▷ une zone nucléaire (dans le bâtiment réacteur), où ont lieu les réactions nucléaires de fission, qui produisent de l'énergie thermique et chauffent ainsi l'eau sous pression circulant dans le circuit primaire. Le transfert d'énergie thermique entre le circuit primaire et le circuit secondaire se fait dans le générateur de vapeur, où la surface d'échange entre les deux fluides peut atteindre près de 5000 m^2 (réseau de tubulures).

Considérons une centrale nucléaire REP produisant une puissance électrique $P_e = 900 \text{ MW}$. 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 page 7 donne diverses données thermodynamiques relatives à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau.

5.1 Cycle de Rankine

L'eau du circuit secondaire subit les transformations suivantes, représentées figure 4 :

- ▷ 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 *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 $P_1 = 43 \text{ mbar}$;
- ▷ 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.

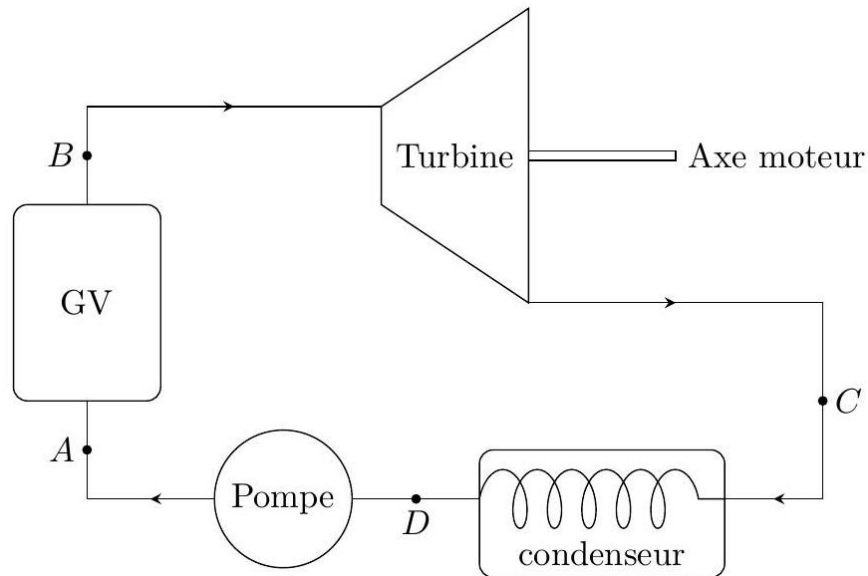


FIGURE 4 – Cycle de Rankine

1. 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_{cr} , 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 .
2. D'après l'extrait de table thermodynamique donné ci-dessous, 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.

Extrait de table thermodynamique relatif à l'eau

| θ (°C) | P_{sat} (bar) | v_L ($m^3 \cdot kg^{-1}$) | h_L ($kJ \cdot kg^{-1}$) | s_L ($J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$) | v_V ($m^3 \cdot kg^{-1}$) | h_V ($kJ \cdot kg^{-1}$) | s_V ($J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$) |
|------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------|---|
| 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 |

L'indice L indique les propriétés du liquide saturant pur et V celles de la vapeur saturante sèche. θ température, v volume massique, P_{sat} pression de vapeur saturante, h enthalpie massique, s entropie massique. Capacité thermique massique isobare de l'eau liquide : $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

3. En fin d'énoncé figure le diagramme enthalpique (P, h) de l'eau. Placer, avec soin et à l'échelle, les points A', B, C, D du cycle. On explicitera la méthode.

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

$$h_s - h_e = w_u + q$$

où $h_s - h_e$ est la différence d'enthalpie massique entre la sortie et l'entrée du compartiment.

4. Exprimer le travail massique w_{BC} reçu par l'eau dans la turbine. Donner sa valeur numérique, en s'aidant du diagramme enthalpique.
5. 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 : on considérera $T_A \simeq T_D$
6. 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.
7. Calculer alors le rendement de Rankine de l'installation. Comparer au rendement de Carnot et commenter.
8. Sachant qu'un réacteur REP fournit à l'eau du circuit secondaire, via le générateur de vapeur, une puissance thermique $P_{th} = 2785 \text{ MW}$, que vaut le rendement thermodynamique réel de l'installation? Comparer au rendement de Rankine et commenter.
9. 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?

5.2 Cycle de Rankine avec détente étagée

Le cycle réel est plus compliqué que celui étudié précédemment, voir figure 5. 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 modélisées par

- ▷ 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 (point B)
- ▷ de B à C' : détente adiabatique réversible dans la turbine haute pression, de la pression P_2 à la pression $P_3 = 10$ 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 $P_1 = 43$ 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.

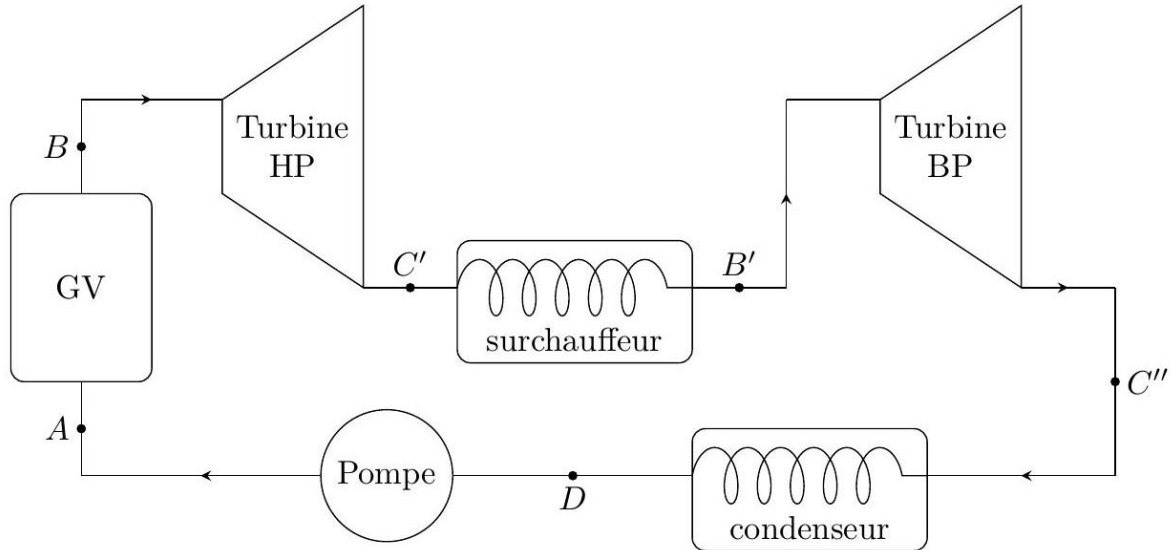


FIGURE 5 – Cycle de Rankine à détente étagée.

10. Placer les nouveaux points C' , B' , C'' sur le diagramme enthalpique figure 6.
11. 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 ?
12. À l'aide du diagramme enthalpique, déterminer le nouveau rendement du cycle. Commenter.

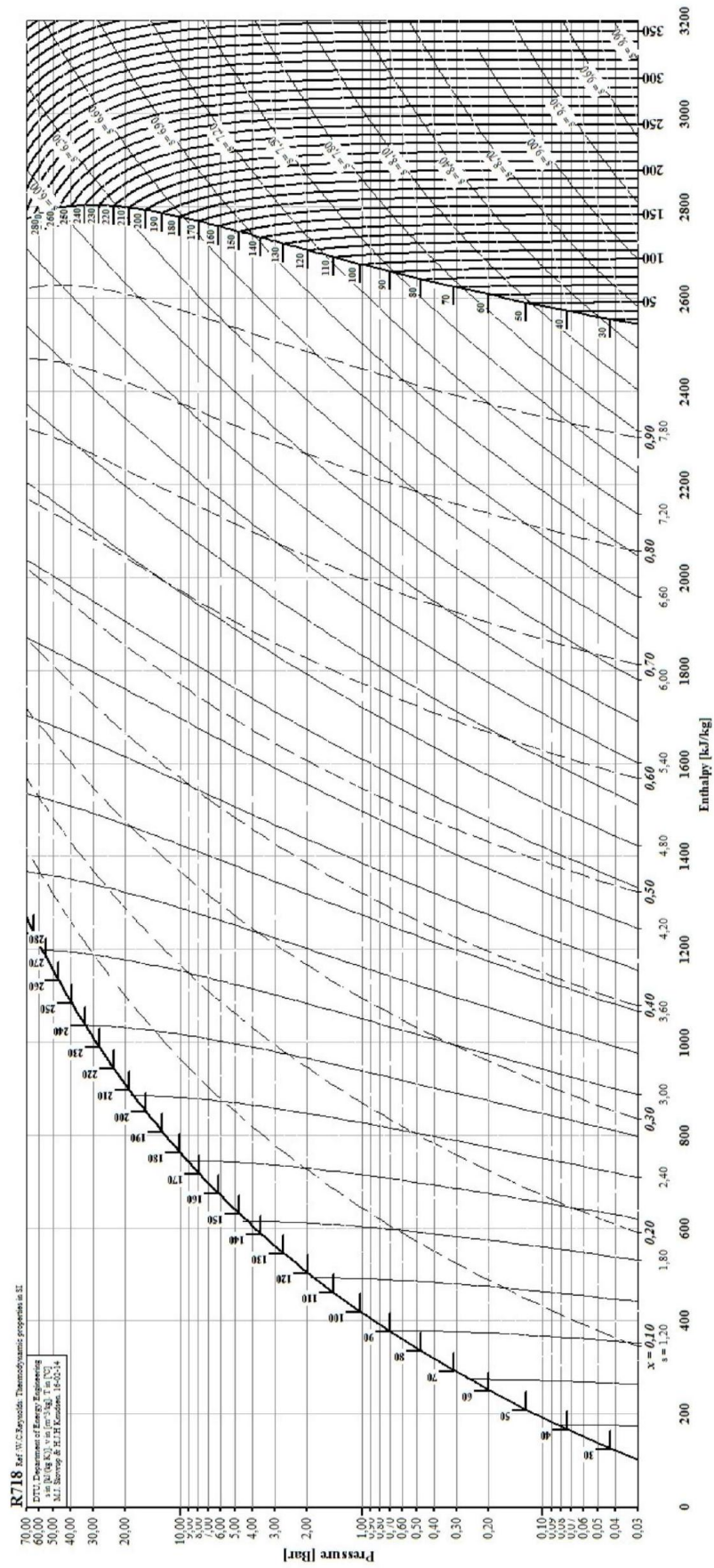


FIGURE 6 – Diagramme enthalpique de l'eau. Les températures sont exprimées en degrés Celsius.