

# TD : Machine Thermiques

## 1 Applications directes du cours

### App1 : Cycle monotherme

Un cycle est monotherme si le système n'échange de l'énergie thermique qu'avec un seul thermostat. En utilisant les principes de la thermodynamique, montrer qu'il n'existe pas de cycle monotherme moteur.

### App2 : Travail reçu

Démontrer que l'on peut identifier l'aire du cycle au travail reçu par le système durant un cycle. On exprimera l'aire sous la courbe en fonction du travail des forces de pression sur chacune des transformations puis on les sommera pour identifier l'aire du cycle au travail reçu durant un cycle.

### App3 : Moteur ditherme réversible

Un moteur ditherme réversible fonctionne entre deux thermostats, sources chaude et froide, de températures respectives  $T_c = 740\text{ K}$  et  $T_f = 300\text{ K}$ .

1. Calculer l'efficacité de ce moteur.
2. Le moteur étudié fournit un travail de  $1600\text{ J/s}$ . Quelle est la puissance thermique prélevée à la source chaude ?

### App4 : Température des deux sources

1. Une pompe à chaleur réversible fonctionne entre l'atmosphère extérieure et un local d'habitation. Elle maintient la température du local à  $20^\circ\text{C}$ . La température extérieure est de  $12^\circ\text{C}$ . Calculer son efficacité.
2. Quelle serait l'efficacité de cette pompe à chaleur si on voulait seulement atteindre la température de  $18^\circ\text{C}$  dans le local ?

## 2 Exercices

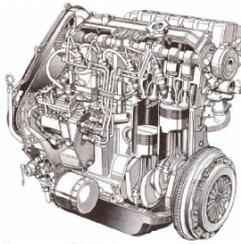
### EX1 : Couplage moteur-climatiseur

On souhaite réguler la température d'un bungalow (c'est-à-dire la maintenir constante) à  $T_2 = 293\text{ K}$  en utilisant le site où on se trouve : air extérieur chaud à  $T_1 = 310\text{ K}$  (c'est les tropiques!) et eau froide d'un lac  $T_3 = 285\text{ K}$ . On utilise à cet effet un moteur ditherme supposé réversible fonctionnant entre l'air et le lac, fournissant l'énergie nécessaire à une pompe à chaleur réversible fonctionnant entre le bungalow et le lac.

En notant  $Q_1$  le transfert thermique reçu par le moteur de la part de l'air extérieur, et  $Q_2$  le transfert thermique cédé par le bungalow, déterminer l'efficacité thermique du dispositif  $e = \frac{Q_2}{Q_1}$ .

Indications : On cherchera à exprimer  $Q_1(W, T_1, T_2, T_3)$  en étudiant le moteur puis  $Q_2(W, T_1, T_2, T_3)$  en étudiant le climatiseur.

### EX2 : Moteur Diesel



Ce moteur, inventé par Rudolf Diesel en 1893, est un moteur à quatre temps :

- 1<sup>er</sup> temps : admission  
Cette phase est semblable à celle du moteur à essence, mais seul de l'air est aspiré.
- 2<sup>ème</sup> temps : compression  
Cette phase est identique à celle du moteur à essence, les soupapes sont fermées.
- 3<sup>ème</sup> temps : combustion-détente  
Le combustible (en général du gazole, moins raffiné que l'essence) est injecté sous pression en haut du cylindre. À la température élevée de l'air comprimé, l'inflammation se produit spontanément (absence de bougie). La combustion progressive produit des gaz qui repoussent le piston ; quand la combustion s'arrête, les gaz se détendent. Ce temps constitue la phase motrice.
- 4<sup>ème</sup> temps : échappement  
Cette phase est identique à celle du moteur à essence.

On adopte le modèle du moteur Diesel suivant : une même quantité d'un gaz supposé parfait de coefficient de Laplace constant  $\gamma = 1,4$  décrit un cycle d'Otto ABCD :

- La compression AB est adiabatique réversible.
- L'évolution BC modélise la phase de combustion, provoquée par l'inflammation spontanée du mélange, par une évolution isobare au cours de laquelle le gaz reçoit un transfert thermique  $Q_c$  en provenance d'une source chaude fictive de température  $T_c$ .
- La détente CD est adiabatique réversible.
- L'ouverture de la soupape DA est modélisée par une évolution isochore au contact de l'atmosphère (source froide de température  $T_A$ ).

	A	B	C	D
$p$ en bar	1,00			
$T$ en K	323	954		
$V$ en L	2,40		0,24	

1. Compléter le tableau et tracer l'allure du cycle dans un diagramme de Watt.
2. Calculer les travaux et les transferts thermiques reçus par le gaz au cours de chacune des évolutions.
3. Définir et calculer le rendement. Le comparer au rendement de Carnot.

### EX3 : Dispositif thermodynamique avantageux

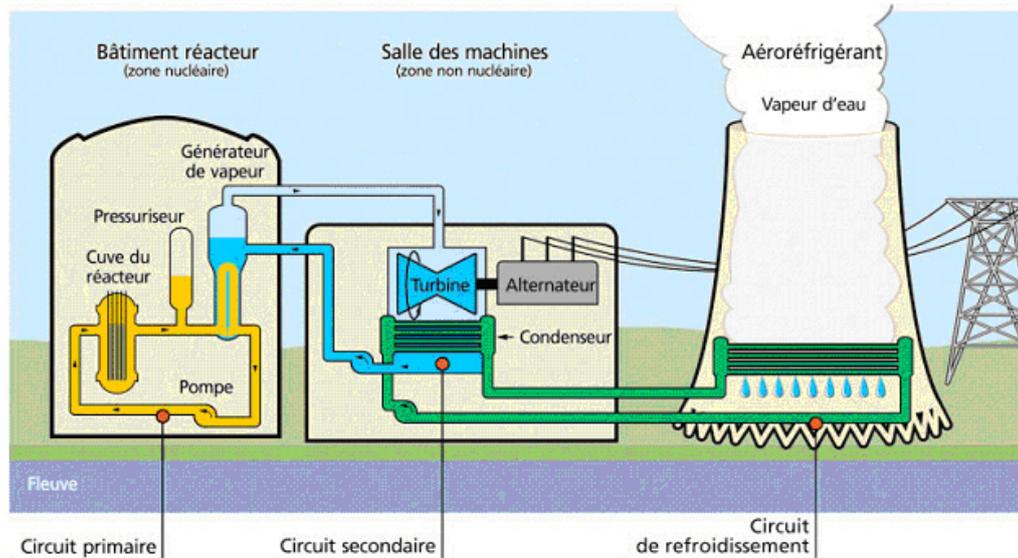
Un dispositif thermodynamiquement avantageux La température extérieure étant  $T_1 = -23^\circ\text{C}$ , on veut maintenir dans une serre une température constante de  $T_2 = 26^\circ\text{C}$ . Par un système de chauffage central ordinaire, on brûle une masse  $m$  de charbon par jour, ce qui fournit la quantité de chaleur  $q$  nécessaire pour compenser les déperditions journalières. Les gaz brûlés sont encore, en sortant de la cheminée, à plus de  $300^\circ\text{C}$ .

Un ingénieur vient proposer un dispositif thermodynamiquement plus avantageux, où sont toujours extraits  $q$  Joules de gaz chauds pour  $m$  kg de charbons brûlés, mais sur un temps plus long. La combustion du charbon assure d'abord l'entretien de la vapeur d'eau dans une chaudière à  $T_3 = 227^\circ\text{C}$ . Deux machines de Carnot sont ensuite placées entre les températures  $T_1$  et  $T_2$  et entre les températures  $T_2$  et  $T_3$ . En régime permanent, les températures sont constantes.

1. Dessiner l'organigramme du dispositif proposé et préciser la nature motrice ou réceptrice des machines de Carnot.
2. Expliciter, en fonction de  $q$ , les quantités d'énergie échangées par les deux machines pour une masse  $m$  de charbons brûlés.
3. En déduire la quantité d'énergie reçue par la serre pour une masse  $m$  de charbons brûlés.
4. Donner la durée  $\Delta t$  durant laquelle le chauffage est assuré par ce dispositif pour une masse  $m$  de charbons brûlés. Commenter.

### EX4 : Circuit secondaire d'une centrale nucléaire REP

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.



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 :

- 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  $5000 \text{ m}^2$  (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.

**Partie A : 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.

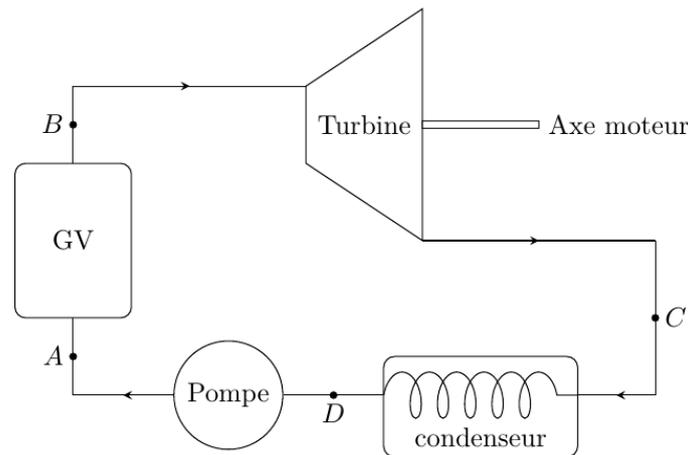


Figure 4 – Cycle de Rankine.

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, 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.
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  $T_{A'} \approx T_D$ .
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  $P_{th} = 2785$  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?

**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  $\triangleright$  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) ;

$\triangleright$  de B à C' : détente adiabatique réversible dans la turbine haute pression, de la pression  $P_2$  à la pression  $P_3 = 10$  bar ;

$\triangleright$  de C' à B' : échauffement isobare à la pression  $P_3$ , dans le surchauffeur, jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point B') ;

$\triangleright$  de B' à C'' : détente adiabatique réversible dans la turbine basse pression, de la pression  $P_3$  à la pression  $P_1 = 43$  mbar ;

$\triangleright$  de C'' à D : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;

$\triangleright$  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.

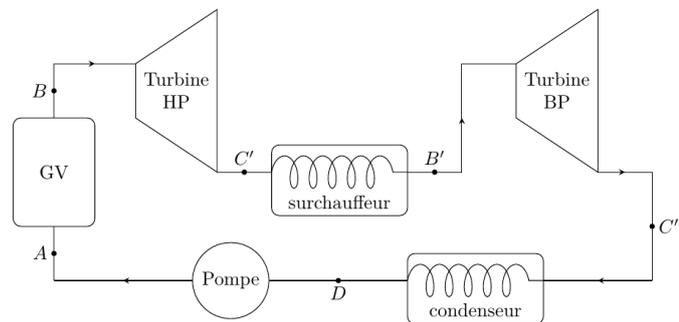


Figure 5 – Cycle de Rankine à détente étagée.

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

#### Extrait de table thermodynamique relatif à l'eau

$\theta$ (°C)	$P_{\text{sat}}$ (bar)	$v_L$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$h_L$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$s_L$ ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$v_V$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$h_V$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$s_V$ ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
30	0,043	1,0047	125,22	0,4348	32,892	2555,92	8,4530
180	10	1,1276	763,18	2,1395	0,119 404	2777,84	6,5854
270	55	1,3053	1190,10	2,9853	0,035 05	2788,46	5,9226

L'indice L indique les propriétés du liquide saturant pur et V celles de la vapeur saturante sèche.

$\theta$  température ;  $v$  volume massique ;  
 $P_{\text{sat}}$  pression de vapeur saturante ;  $h$  enthalpie massique ;  
 $s$  entropie massique.

Capacité thermique massique isobare de l'eau liquide :  $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

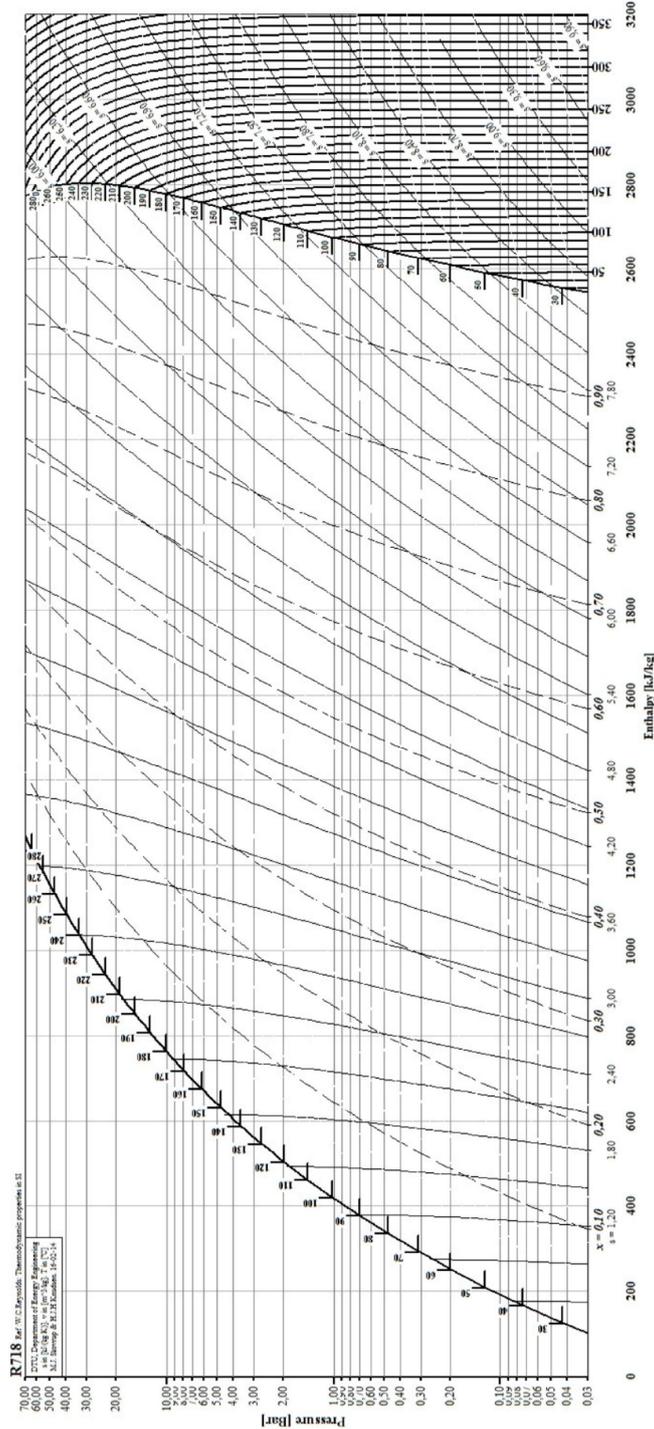


Figure 6 – Diagramme enthalpique de l'eau. Les températures sont exprimées en degrés Celsius.

### 3 Problème

**Pb1 : Bateau Pop-pop**

Reprendre les explications données dans le cours sur le bateau pop-pop et les justifier. Donner une condition nécessaire pour que le bateau avance.

**Pb2 : Un congélateur**

Une machine frigorifique fonctionne réversiblement entre deux sources à 0°C et 20° C. La source

chaude représente l'atmosphère et la source froide une salle parfaitement calorifugée dans laquelle est stockée de la glace qui est maintenue à  $0^{\circ}\text{C}$  grâce à la machine frigorifique.

Calculer le prix de revient de 1 tonne de glace sachant que l'eau est introduite dans la salle frigorifique à la température de  $20^{\circ}\text{C}$ .

*Données* :  $c_l = 4.18 \text{ kJ/kg/K}$  ;  $l_{fus} = 330 \text{ kJ/kg}$  ; prix du kW.h = 0.13 euros.

**Pb3 :** Cycle réversible

Un fluide décrit le cycle réversible décrit ci-dessous dans le sens (1,2,3,4,1) ou dans le sens (1,4,3,2,1).

Les transformations  $1 \rightarrow 2$  et  $3 \rightarrow 4$  sont des isochores.

Les transformations  $2 \rightarrow 3$  et  $4 \rightarrow 1$  sont des isothermes.

Les pression, volume, température sont notés respectivement  $p, V, T$ . Toute grandeur affectée d'un indice  $i_2 \in \{1, 2, 3, 4\}$  se rapportera respectivement aux points 1,2,3,4 du diagramme.

1. Représenter le cycle dans un diagramme de Watt.
2. Donner la signification de l'aire intérieure du cycle. Dans quel sens sera parcouru le cycle s'il est moteur ?
3. On note  $Q_{ij}$  et  $W_{ij}$  les chaleur et travail échangés par le fluide lors d'une transformation  $i \rightarrow j$ . Le fluide se comportant comme un gaz parfait, comparer :  $Q_{23}$  et  $W_{23}$  ;  $Q_{41}$  et  $W_{41}$  ;  $W_{12}$  et  $W_{34}$  ;  $Q_{12}$  et  $Q_{34}$
4. On étudie le cycle dans le sens moteur. En raison de la technologie du moteur, la seule chaleur réellement dépensée est celle qu'on fournit au fluide sur l'isotherme  $T_2$ . Écrire le rendement du moteur en fonction des  $Q_{ij}$ .
5. Le coefficient isentropique du gaz parfait est  $\gamma = \frac{7}{5}$ , De plus,  $V_4 = 2V_1$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$ ,  $T_2 = 400 \text{ K}$  et  $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ . Le cycle est parcouru par une mole de gaz parfait. Calculer  $Q_{12}$ ,  $Q_{23}$  et  $Q_{41}$ .
6. Exprimer le rendement en fonction de  $T_1$  et  $T_2$  et le calculer numériquement.