

Chapitre 5 : Machines thermiques

Prérequis

- chapitres de thermodynamique

Mots-clés

moteur thermique, récepteur thermique, machines dithermes, cycle de Carnot, rendement, efficacité, théorème de Carnot



PLAN DU COURS

A

Généralités

- A.1** Qu'est-ce qu'une machine thermique ?
- A.2** Écriture des premier et second principes
- A.3** Cas des machines monothermes
- A.4** Cas des machines dithermes

B

Moteurs dithermes

- B.1** Principe de fonctionnement général
- B.2** Rendement maximal

C

Récepteurs dithermes

- C.1** Principe de fonctionnement général
- C.2** Efficacité maximale



LES SAVOIRS ET LES SAVOIR-FAIRE



CAPACITÉS EXIGIBLES

- Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.
- Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme.
- Définir un rendement ou une efficacité et les relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.
- Justifier et utiliser le théorème de Carnot.
- Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles.
- Expliquer le principe de la cogénération. (**Exercice 4**)

A Généralités

A.1 Qu'est-ce qu'une machine thermique ?

1. Qu'appelle-t-on «cycle» ?
2. Qu'est ce qui caractérise un moteur thermique ? un récepteur thermique ?
3. Dans un diagramme de Clapeyron, comment peut-on identifier si il s'agit d'un cycle moteur ou récepteur ?

A.2 Écriture des premier et second principes

4. Dans le cas où la machine est au contact de plusieurs thermostats, comment s'écrivent les premier et second principes ?
5. Qu'est-ce que l'inégalité de Clausius ?

A.3 Cas des machines monothermes

6. Montrer que le moteur monotherme n'existe pas.

A.4 Cas des machines dithermes

7. Pour une machine ditherme, qu'appelle-t-on «source chaude» ? «source froide» ?
8. Dans le cas d'une machine ditherme réversible, quelles sont les quatre transformations qui composent nécessairement le cycle (de Carnot) ?
9. Tracer l'allure de ce cycle pour un gaz parfait en justifiant.

B Moteurs dithermes

B.1 Principe de fonctionnement général

10. Décrire succinctement et qualitativement le fonctionnement d'un moteur en s'inspirant du moteur de Stirling.
11. Préciser les signes des transferts W , Q_C et Q_F algébriquement reçus par le fluide sur un cycle.

B.2 Rendement maximal

12. Définir le rendement η pour un moteur ditherme.
13. Exprimer le rendement en fonction des transferts thermiques.
14. Théorème de Carnot : montrer que le rendement admet un majorant à exprimer en fonction de T_C et T_F , températures des sources chaude et froide.



C Récepteurs dithermes

C.1 Principe de fonctionnement général

15. Décrire succinctement et qualitativement le fonctionnement d'un récepteur (système réfrigérant).
16. Préciser les signes des transferts W , Q_C et Q_F algébriquement reçus par le fluide sur un cycle.
17. Pour un réfrigérateur, un climatiseur ou une pompe à chaleur : préciser ce qui joue le rôle de la source froide et la source chaude. Préciser également l'élément qui reçoit le travail W .

C.2 Efficacité maximale

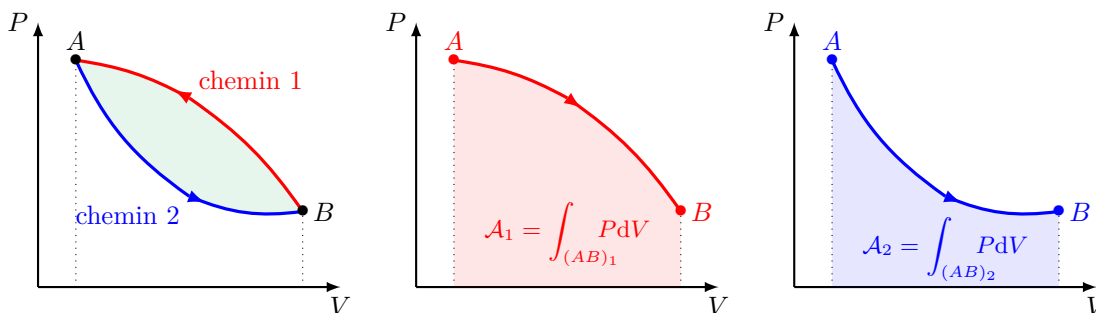
18. Définir l'efficacité e pour une machine frigorifique ou pour une pompe à chaleur.
19. Exprimer l'efficacité en fonction des transferts thermiques.
20. Théorème de Carnot : montrer que l'efficacité admet un majorant à exprimer en fonction de T_C et T_F , températures des sources chaude et froide.

DOCUMENTS DE COURS

Document 1 Sens de rotation du cycle et caractère moteur ou récepteur

On considère des transformations pour lesquelles $P \simeq P_{ext}$ (transformations quasistatiques). Dans ce cas, le travail des forces extérieures de pression peut s'écrire : $W \simeq - \int PdV$.

► Cycle tournant dans le sens anti-horaire



Dans ce cas :

$$\begin{aligned} W_{cycle} &= W_{(BA)_1} + W_{(AB)_2} = - \int_{(BA)_1} PdV - \int_{(AB)_2} PdV \\ &= \int_{(AB)_1} PdV - \int_{(AB)_2} PdV \\ &= \mathcal{A}_1 - \mathcal{A}_2 \end{aligned}$$

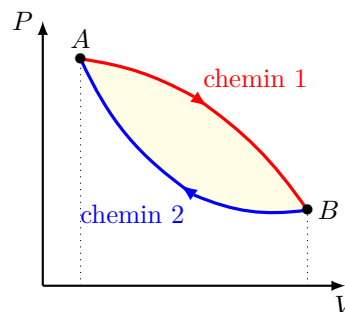
Puisque $\mathcal{A}_1 > \mathcal{A}_2 > 0$, alors $W_{cycle} > 0$.

► Cycle tournant dans le sens horaire

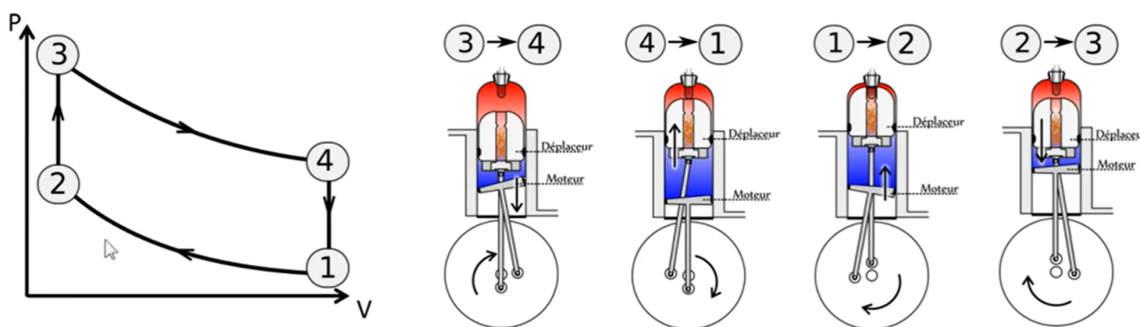
Désormais :

$$\begin{aligned} W_{cycle} &= W_{(BA)_2} + W_{(AB)_1} = - \int_{(BA)_2} PdV - \int_{(AB)_1} PdV \\ &= \int_{(AB)_2} PdV - \int_{(AB)_1} PdV \\ &= \mathcal{A}_2 - \mathcal{A}_1 \end{aligned}$$

Ainsi $W_{cycle} < 0$.

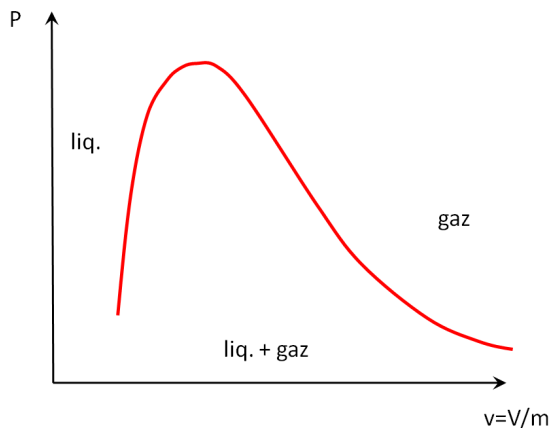
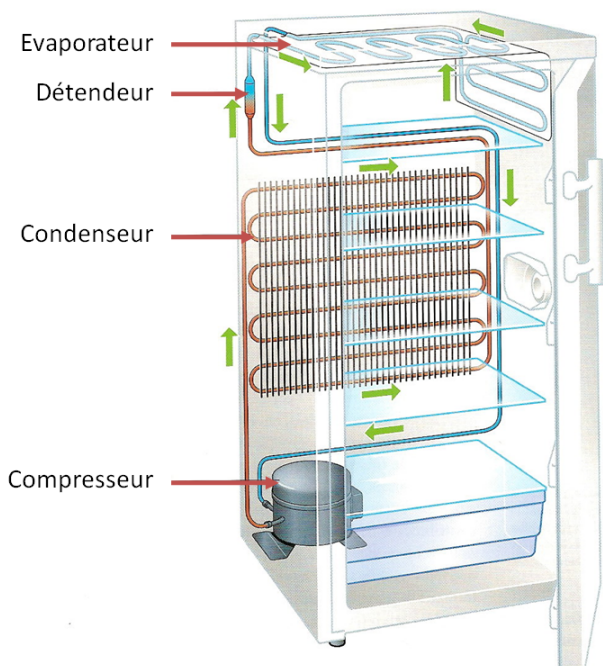


Document 2 Moteur de Stirling

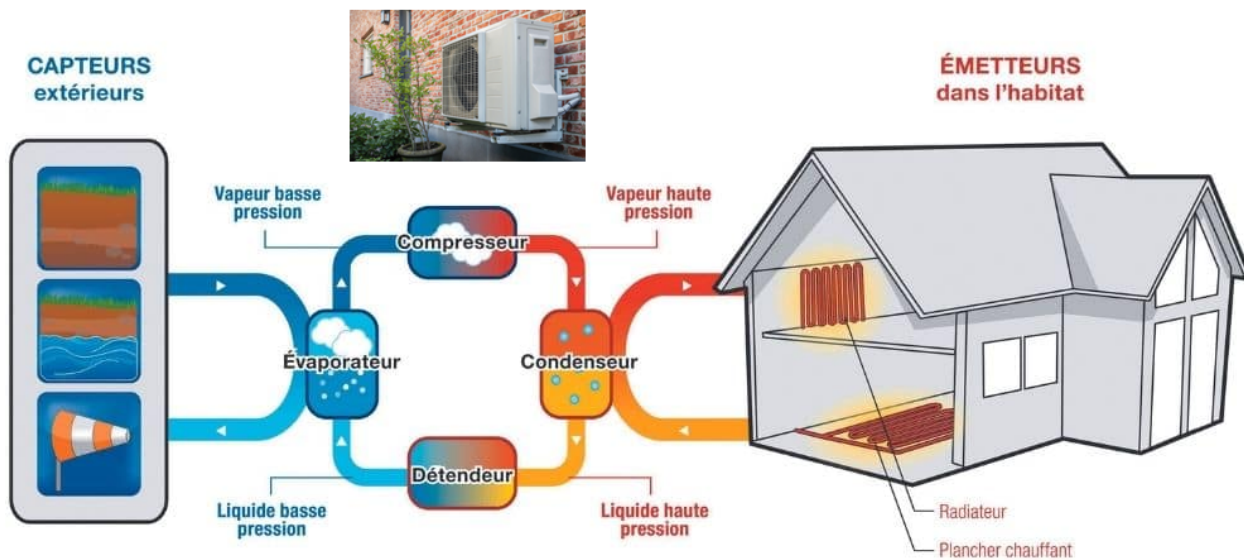


Document 3 Les systèmes réfrigérants

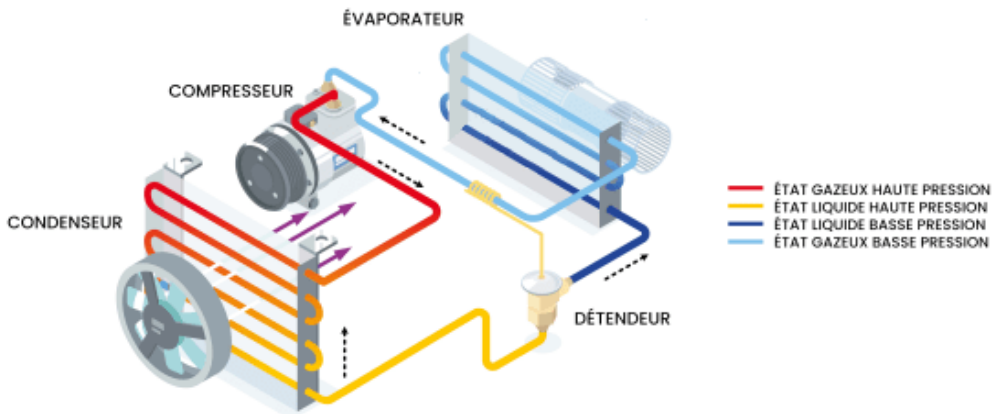
► Réfrigérateur



► Pompe à chaleur



► Climatiseur



EXERCICES

DIFFICULTÉ DE L'EXERCICE (ANALYSE, «TECHNICITÉ», ...)

DURÉE DE L'EXERCICE

COMPÉTENCES TRAVAILLÉES

	Exercices			
	1	2	3	4
Donner le sens des échanges énergétiques	•	•	•	•
Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme	•		•	•
Définir un rendement ou une efficacité et les relier aux énergies échangées au cours d'un cycle	•	•	•	•
Utiliser le théorème de Carnot	•	•	•	•
Expliquer le principe de la cogénération				•

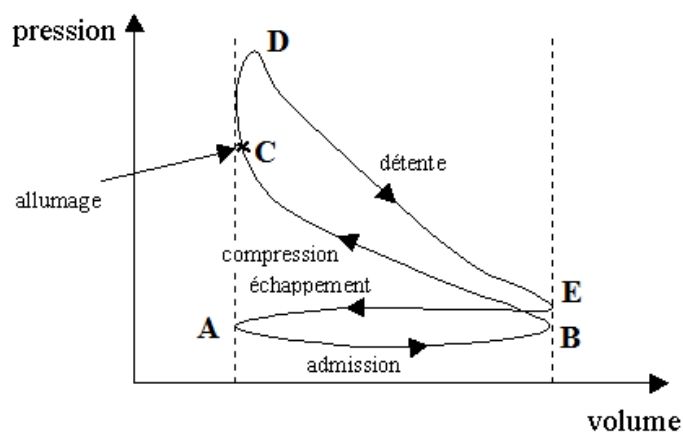
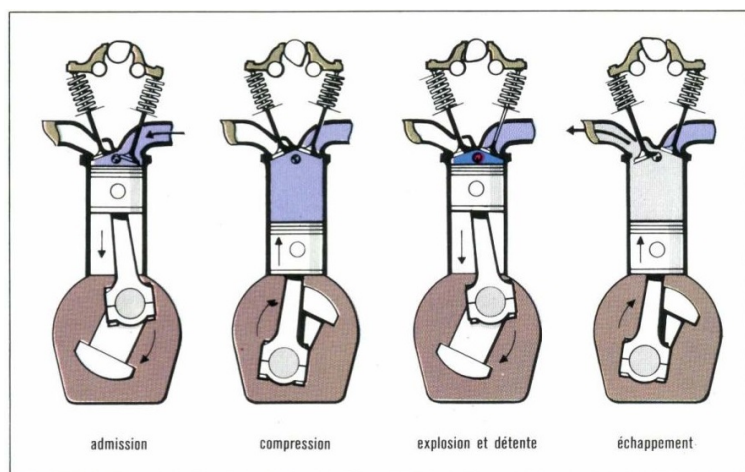
Exercice 1

Cycle de Beau de Rochas



On s'intéresse au principe d'un moteur à essence, qui est un moteur à quatre temps.

De l'air est contenu dans un cylindre, muni d'un piston relié mécaniquement à un système de bielle-vilebrequin permettant de mettre en rotation l'axe moteur grâce aux allers-retours du piston.



Deux soupapes (d'admission et d'échappement) permettent de faire rentrer ou sortir un mélange air+essence. À l'aide d'une bougie, ce mélange peut exploser et repousser ainsi le piston vers le bas. Ainsi, le piston cède du travail mécanique à l'arbre de rotation lié aux roues du véhicule.

Les quatre temps de ce processus sont les suivants :

- 1. Admission** (AB) du mélange air+essence par la soupape d'admission à la fin de cette phase; le volume du cylindre atteint sa valeur maximale V_{max} . L'inertie mécanique du mouvement de rotation du cycle précédent contribue à aspirer ce mélange.
- 2. Compression** (BC) par inertie mécanique du mouvement de rotation; le volume atteint sa valeur minimale V_{min} à la fin de cette phase.
- 3. Explosion** : combustion (CD) suivi de la détente (DE). L'étincelle produite par la bougie provoque l'explosion du mélange. Au début, le volume varie peu alors que la pression augmente notablement (chemin CD). Puis, les gaz résultant de la combustion se détendent (chemin DE).
- 4. Échappement** (EA) grâce à l'ouverture de la soupape d'échappement. Les gaz sont refoulés hors du cylindre par la remontée du cylindre entraîné par l'inertie mécanique du mouvement de rotation de la bielle.

Puis le cycle redémarre avec une nouvelle admission, etc.

Ainsi, sur un cycle, deux tours complets de l'arbre de rotation sont effectués.

En pratique, afin de « lisser » le comportement du moteur, le moteur comporte quatre cylindres identiques chacun étant sur un temps différent, de sorte à ce qu'il y ait toujours un temps moteur.

► Modélisation du cycle

Afin de simplifier l'étude du cycle, nous ferons les hypothèses suivantes :

- on considère qu'après le point E , le cycle repasse par B avant de terminer en A ;
- les étapes CD et EB sont suffisamment rapides pour que les variations de volume soient faibles, elles seront donc considérées isochores ;
- de A vers B et de B vers la A , la transformation est supposée isobare ;
- le mélange air+essence ainsi que les gaz présents à la fin du cycle se comportent comme un gaz parfait de quantité de matière constante ;
- tout se passe comme si l'énergie thermique dégagée par la combustion était due au contact avec une source chaude (étape CD) ;
- les étapes BC et DE sont supposées adiabatiques ;
- ainsi, bien que le système soit ouvert (échange permanent de matière avec l'extérieur), les étapes AB et BA se "compensent" et tout se passe comme si on étudiait un système fermé parcourant le cycle $BCDEB$.

1. Tracer l'allure de ce cycle modèle, appelé cycle de Beau de Rochas, dans un diagramme (P, V) .

► Rendement

On souhaite évaluer le rendement du cycle de Beau de Rochas. Pour cela, on suppose que les adiabatiques sont réversibles et les isochores sont mécaniquement réversibles. Le fluide est un gaz parfait, de coefficient $\gamma = 1,4$. La quantité de matière dans le cylindre est notée n .

2. Identifier les phases de contact avec les sources chaude et froide. Pourquoi ces phases ne sont-elles pas réversibles ?
3. Évaluer les transferts thermiques avec la source chaude et la source froide, Q_C et Q_F , en fonction des températures atteintes aux points B, C, D, E .
4. En déduire l'expression du rendement η en fonction des températures.
5. Exprimer le rendement en fonction uniquement du rapport de compression $\alpha = V_{max}/V_{min}$ et γ .
6. À votre avis, quel problème technique empêche de se rapprocher autant qu'on le désire d'un rendement de 100% ?
7. Calculer η pour $\alpha = 7$. On notera que les frottements mécaniques, les transferts thermiques au niveau des parois ramènent en pratique ce rendement à environ $\eta_{réel} \simeq 0,35$.
Comparer au rendement maximal de Carnot, en assimilant les températures extrêmes atteintes, 800 °C et 20 °C , aux températures des sources thermiques modèles.

Exercice 2

Chauffage d'une serre



En hiver, la température d'une serre doit être maintenue à la valeur constante $T_1 = 293\text{ K}$. On utilise pour cela une chaudière se comportant comme un thermostat à la température $T_3 = 600\text{ K}$ capable de fournir un transfert thermique $Q_3 > 0$. L'air extérieur est à la température $T_2 = 283\text{ K}$.

On décide de ne pas utiliser directement la chaudière pour chauffer la serre mais d'adopter le dispositif suivant : la chaudière fournit le transfert thermique Q_3 à l'agent thermique d'un moteur réversible fonctionnant entre la chaudière à T_3 et l'air extérieur à T_2 .

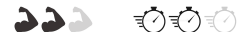
Le travail récupéré est utilisé pour actionner une pompe à chaleur réversible fonctionnant entre l'air extérieur à T_2 et l'intérieur de la serre à T_1 . On note Q_1 le transfert thermique de l'intérieur de la serre vers l'agent thermique de la pompe.

1. Reporter sur un schéma de principe les différents échanges énergétiques mis en jeu lors du chauffage.
2. Exprimer le travail reçu par le moteur en fonction de Q_3, T_2 , et T_3 .
3. Exprimer le transfert thermique Q_1 de l'intérieur de la serre vers l'agent thermique de la pompe en fonction de W, T_1 et T_2 .
4. Définir puis exprimer l'efficacité de l'ensemble du dispositif de chauffage en fonction de T_1, T_2 et T_3 .



Exercice 3

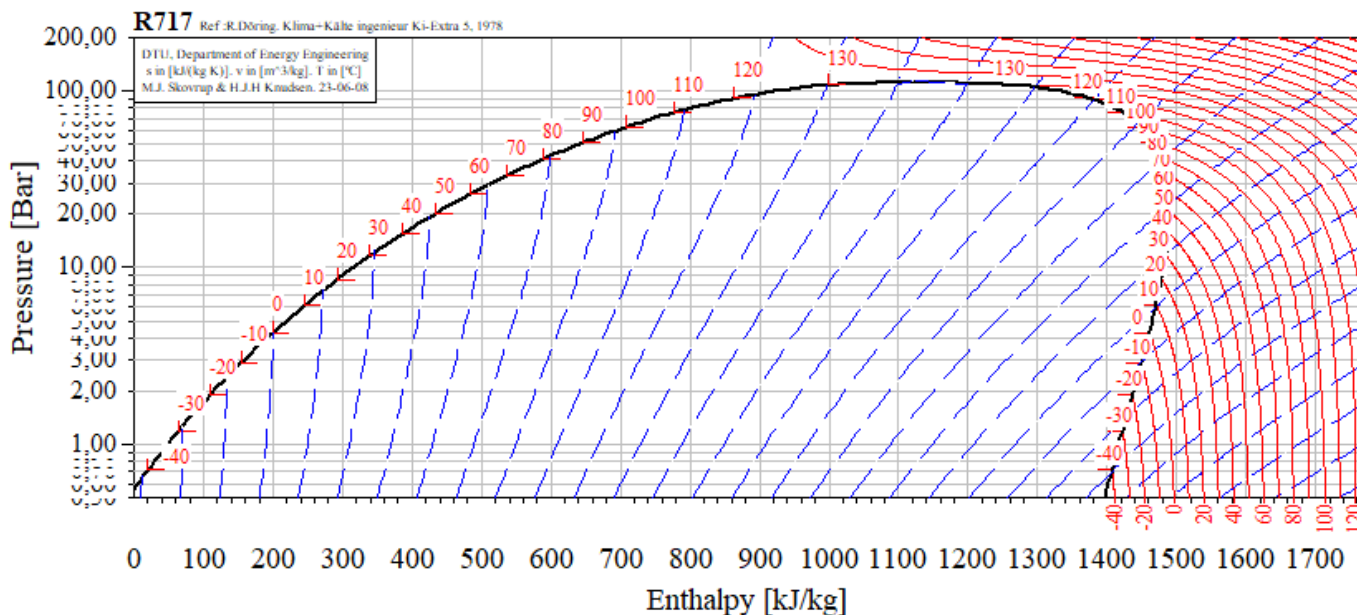
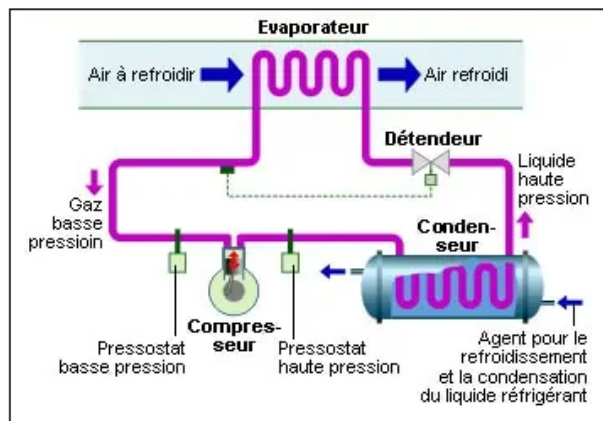
Réfrigérateur à ammoniac (un avant-goût de ce qui sera fait en 2ème année...)



Un réfrigérateur fait subir à une masse m d'ammoniac NH_3 (alias R717 pour les frigoristes) un cycle ditherme ABCDA. La source chaude est de température $T_1 = 30^\circ\text{C}$ (air ambiant) et la source froide est de température $T_2 = -10^\circ\text{C}$ (chambre froide).

Voici la description du cycle :

- ❑ en A : le fluide est à l'état liquide à T_1 à la pression saturante correspondante notée P_1 ;
- ❑ A → B : le fluide passe dans le **détendeur** et subit une détente adiabatique l'amenant à un mélange diphasé de température T_2 ;
- ❑ B → C : le fluide est mis en contact avec la source froide par le biais de l'**évaporateur** et subit une vaporisation complète à pression constante P_2 ;
- ❑ C → D : la vapeur passe dans le **compresseur** la ramenant ainsi à la pression P_1 de manière adiabatique et réversible ;
- ❑ D → A : la vapeur passe dans le **condenseur** où elle est refroidie à pression constante puis subit une liquéfaction complète (retour à l'état A).



Il sera démontré en 2ème année (1er principe pour un système ouvert en régime stationnaire) que la variation d'enthalpie massique entre deux états de l'écoulement vérifie $\Delta h = w_u + q$ où, pour une petite quantité de masse δm dans l'écoulement fluide étudié, $w_u \delta m$ représente le travail reçu utile (autre que le travail des forces de pression du fluide amont et du fluide aval) et $q \delta m$ représente le transfert thermique.

1. Représenter les différentes transformations sur le diagramme (P, h) (lignes continues = isothermes ; lignes pointillées = isentropiques). En déduire graphiquement P_1 , P_2 et T_D .
2. Représenter qualitativement le cycle dans le diagramme de Clapeyron (P, v) .
3. Le coefficient γ de l'ammoniac vaut 1,30. Si on suppose que la vapeur d'ammoniac se comporte comme un gaz parfait, quelle température T_D pourrait-on obtenir par le calcul ?
4. Déterminer la fraction massique $x_{\ell, B}$ de liquide à l'état B.
5. Quels sont les transferts thermiques massiques q_F et q_C échangés avec la source froide et la source chaude ?
6. Calculer le travail massique w_{CD} fourni au fluide lors de la compression.
7. Calculer l'efficacité de la machine et la comparer à l'efficacité de Carnot. Commenter.
8. On souhaite que l'extraction du transfert thermique q_F se fasse à une puissance $\mathcal{P}_F = 1,0 \text{ kW}$. Le compresseur est alimenté électriquement par une puissance électrique \mathcal{P}_{elec} et dont le rendement est $\eta = 90\%$. On note $D_m = \delta m/dt$ le débit massique d'ammoniac uniforme et stationnaire dans l'écoulement. Faire un schéma de principe représentant les quantités d'énergie échangées pendant dt et estimer la valeur de \mathcal{P}_{elec} nécessaire. Quel est le débit massique d'ammoniac D_m nécessaire ?

Exercice 4

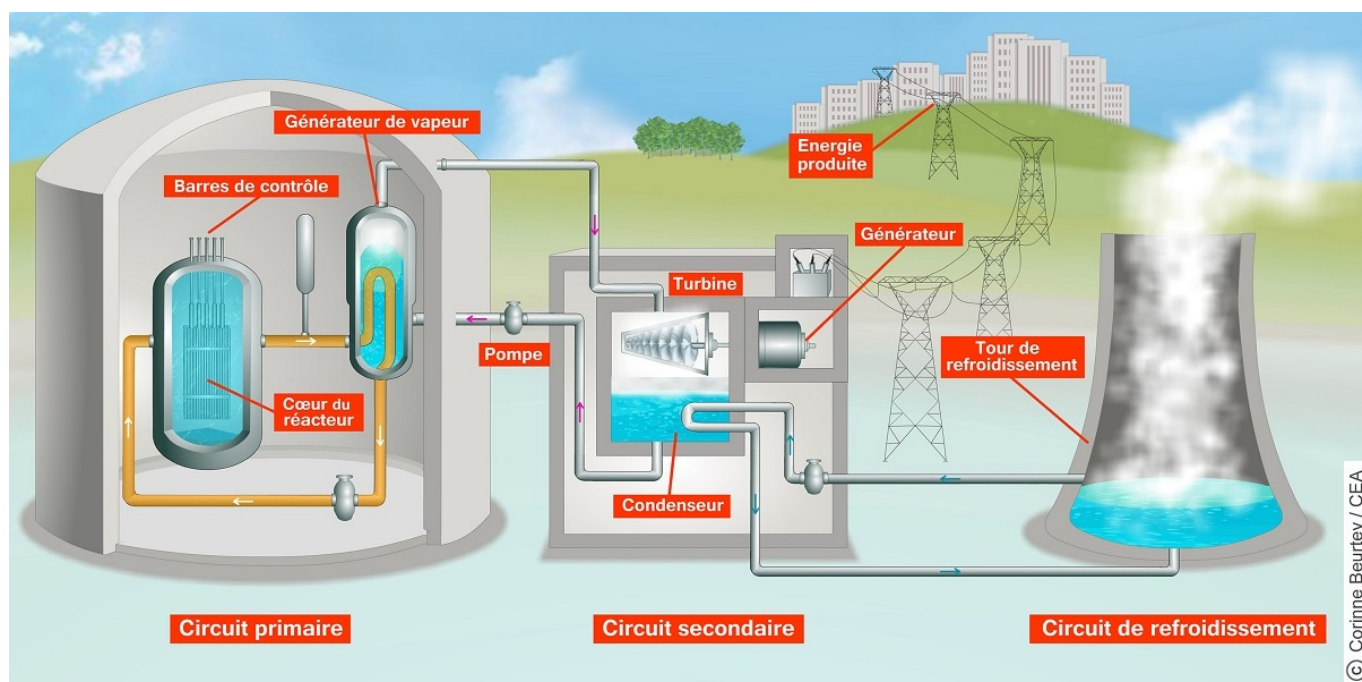
Centrale nucléaire et cogénération



D'après www.connaissancedesenergies.org :

Une installation classique de production d'électricité (à partir d'un moteur thermique ou d'une turbine) obtient un rendement électrique d'environ 35%, tandis que le reste de l'énergie (65%) est perdu sous forme de chaleur inutilisée. Dans un système en cogénération, 30 à 35% de l'énergie primaire est transformée en électricité grâce à un alternateur, tandis que 65% se retrouve sous forme de chaleur, dont 50 à 55% est récupérée pour chauffer un circuit d'eau au travers d'un échangeur. Cette eau peut être utilisée pour le chauffage des bâtiments, de l'eau chaude sanitaire, ou pour des procédés industriels. L'électricité produite sera quant à elle consommée sur place ou revendue sur le réseau électrique public. La cogénération valorise ainsi la chaleur dégagée afin d'atteindre un rendement énergétique global pouvant atteindre 85%. La cogénération permet ainsi d'optimiser la consommation du combustible initial et de réduire les rejets de gaz à effet de serre. Toutefois, les installations de cogénération doivent produire au plus près des lieux de consommation car la chaleur se transporte mal. La cogénération peut être utilisée à grande échelle (installations industrielles, centrales électrothermiques...), ainsi qu'à petite échelle : dans le résidentiel, la micro-cogénération peut produire une base de chaleur et d'électricité.

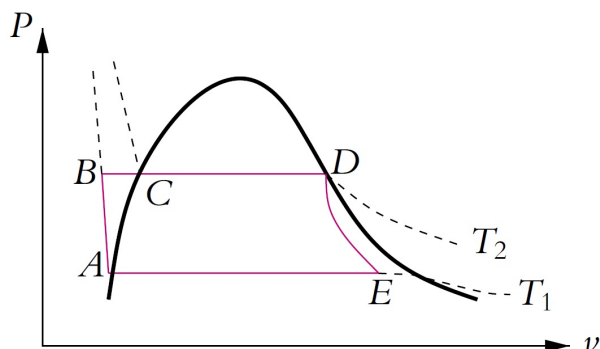
Ci-dessous, le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire



La température de la source chaude (eau du circuit primaire) est de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ alors que la température de la source froide (eau sanitaire à réchauffer plutôt que l'eau du fleuve ou de la rivière si on veut faire de la cogénération !) est de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1. Typiquement, l'eau dans le circuit secondaire suit le cycle de Rankine ci-contre.

- À quoi reconnaît-on qu'il s'agit bien d'un cycle moteur ?
- Identifier sur le schéma de principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire les états A, B, C, D.
- Au cours du cycle, sur quelles étapes le transfert thermique avec la source chaude, le transfert thermique avec la source froide et le travail utile fourni à l'alternateur interviennent-ils ?



- Calculer le rendement η de la centrale sachant qu'il est égal à 70% du rendement de Carnot.
- La puissance électrique fournie par l'alternateur est $\mathcal{P}_{elec} = 1,1\text{ GW}$. L'alternateur a un rendement η_a de 90%. Quelle est la puissance cédée \mathcal{P}_C par la source chaude ? Quelle est la puissance \mathcal{P}_F fournie à la source froide ? (On pourra s'aider d'un schéma symbolisant les échanges énergétiques entre la source chaude, le circuit secondaire, la source froide et l'alternateur.)
- Le débit volumique D_v de l'eau sanitaire est de $30\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Sa capacité thermique massique est $c_e = 4,2\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Calculer la variation de température d'un volume V d'eau sanitaire ayant été en contact thermique avec le condenseur pendant une durée Δt . Commenter.