

Chapitre T3. Machines thermiques

INTRO :

Ce chapitre constitue un bilan sur les notions de thermodynamique introduites dans les précédents chapitres de MPSI et de MP. On approfondit l'étude, commencée en MPSI, des **machines thermiques**.

Une machine thermique est un dispositif destiné à réaliser une conversion d'énergie entre travail et transfert thermique. On distingue les **moteurs** dont le but est de produire un travail mécanique et les **machines réceptrices** destinées à « déplacer » le transfert thermique (réfrigérateur et pompe à chaleur).

On distinguera aussi les machines à pistons des machines à écoulement.

Buts de ce chapitre : Exploiter les énoncés des 1^{er} et 2^e principes de la thermodynamique et les diagrammes thermodynamiques pour approfondir l'étude des machines thermiques.

Prérequis :

MPSI : Machines thermiques & MP : T1 Transformation infinitésimale et changement d'état + T2 Bilans pour un fluide en écoulement stationnaire.

Plan du chapitre :

A) Fonctionnement des machines thermiques (*rappels MPSI*) 2

 1) Différents types de machines 2

 2) Machines dithermes 2

 3) Performances – Rendement et efficacité 3

 4) Deux points de vue complémentaires 3

B) Quelques éléments de machines industrielles à écoulement 4

 1) Détendeur (*cf TDT2&T3*) 4

 2) Compresseur et turbine (*cf ChT2*) 5

 3) Tuyère (*cf TDT2&T3*) 5

 4) Echangeur thermique (*cf TDT2&T3*) 6

 5) Bilan 6

C) Exemples de machines motrices 7

 1) Cas d'une machine à piston : Etude du moteur ditherme réel (Cours-TD) 7

 2) Cas d'une machine à écoulement : Centrale nucléaire à eau pressurisée (*cf CCS MP 2016*) 9

D) Exemples de machines réceptrices 10

 1) Eléments constitutifs de récepteurs thermiques : PAC et réfrigérateur 10

 2) Etude d'une machine frigorifique avec le diagramme des frigoristes (Cours-TD) 11

A) Fonctionnement des machines thermiques (rappels MPSI)

1) Différents types de machines

On appelle **MACHINE THERMIQUE** un dispositif fonctionnant en **cycles** dans lequel un fluide échange de l'énergie par travail W et par transfert(s) thermique(s) Q_i .

Sur un cycle complet, la **variation d'une fonction d'état** (E_{tot}, E_m, U, H, S) est **nulle** *.

* On exploitera notamment ce résultat au § A.4.a pour déterminer le COP maximal d'une machine.

Suivant le signe du travail W reçu par le fluide au cours d'un cycle, on distingue :

- **Moteur thermique si $W < 0$** : sur un cycle complet, le système fournit effectivement du travail au milieu extérieur (*ex : machine à vapeur, moteur à explosion, centrale nucléaire...*)
- **Récepteur thermique si $W > 0$** : sur un cycle complet, le système reçoit effectivement du travail de la part du milieu extérieur (*ex : machine frigorifique, pompe à chaleur...*)

On distingue aussi deux types de structures :

- **Machine à piston** : toutes les transformations ont lieu dans une même chambre dont le volume varie grâce à un piston (*ex : moteur à explosion*).
- **Machine à écoulement** (*ex : réfrigérateur, PAC air-eau, centrale nucléaire à eau pressurisée, cf § C.2 et D*) : un **fluide, dit caloporteur ou frigorigène**, circule dans la machine et traverse successivement différents éléments (*ex : compresseur, échangeur thermique...*, cf § B) dans lesquels il subit des transformations.

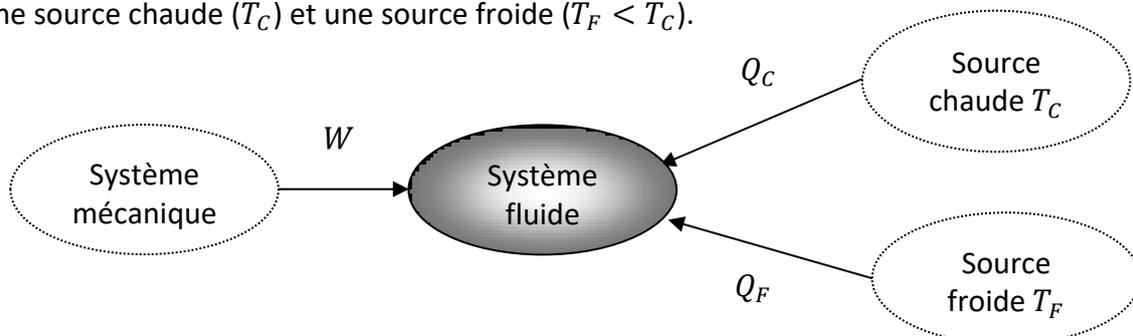
2) Machines dithermes

Version historique du 2^e principe énoncé par Lord Kelvin :

« **Pour qu'un système décrivant un cycle fournisse du travail, il doit nécessairement être en contact avec au moins deux sources de chaleur.** » Autrement dit, il n'existe pas de moteur monotherme.

➡ Exercice classique : Montrer que cet énoncé est une conséquence du 2^e principe de la thermodynamique.

Une machine est dite **DITHERME** si elle n'échange de chaleur qu'avec deux sources de chaleur au cours du cycle : une source chaude (T_C) et une source froide ($T_F < T_C$).



Les signes des **énergies reçues** par le fluide W , Q_C et Q_F dépendent de la fonction de la machine (moteur / récepteur), cf § A.3.

Pour une machine thermique à écoulement, les énergies W , Q_C et Q_F sont reçues par le fluide lors de son passage successif dans les différents éléments de la machine, on les évalue avec le 1^{er} principe pour un système en écoulement (cf § B).

3) Performances – Rendement et efficacité

Pour les **moteurs** thermiques, on parle de **rendement** : $r = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}}$ ($0 < r \leq 1$)

Pour les **récepteurs** thermiques, on parle **d'efficacité** : $e = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}}$ ($0 < e$)

De façon générale, on parle de **coefficient de performance** d'une installation industrielle, noté **COP** :

$$COP = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}}$$

	Moteur	Réfrigérateur	Pompe à chaleur
Signe de W			
Signe de Q_C			
Signe de Q_F			
Expression du COP			
Expression du COP max (cf § A.4)	$1 - \frac{T_F}{T_C}$	$\frac{T_F}{T_C - T_F}$	$\frac{T_C}{T_C - T_F}$
ODG COP (r ou e) réel			

4) Deux points de vue complémentaires

a) Approche « système fermé » (rappels MPSI)

Il s'agit d'appliquer les 1^{er} et 2^e principes de la thermodynamique au **système fermé constitué de la totalité du fluide** contenu dans le circuit, au cours d'une **transformation correspondant à un cycle complet**.

1^{er} principe : $0 = \Delta E_{tot} = Q + W$ soit :

$$W = -(Q_C + Q_F)$$

2^e principe : $0 = \Delta S = S_{éch} + S_{créée} \Leftrightarrow S_{éch} = -S_{créée}$ avec $S_{créée} \geq 0$ et $S_{éch} = \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F}$

d'où **l'inégalité de Clausius** :

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$$

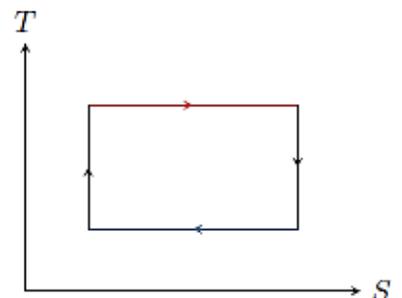
On déduit de cette approche :

- l'expression du rendement ou de l'efficacité en fonction des seuls transferts thermiques ;
- **r ou e maximal(e)** obtenu(e) pour un cycle (théorique) **réversible**, appelé **cycle de Carnot**.

Le cycle Carnot est totalement réversible. Il est analogue pour tous les types de machines, seuls changent les échanges d'énergie auxquels on s'intéresse.

Conséquences :

- les étapes au contact des sources sont des **isothermes** à la température des sources ;
- les étapes intermédiaires sont nécessairement des **adiabatiques**, ce sont donc des **isentropiques**.



Le rendement ou de l'efficacité de Carnot s'exprime en fonction des températures des sources chaude et froide, cf *tableau § A.3*.

➔ **Démonstration à connaître** : Etablir les expressions des r ou e de Carnot.

b) Approche « système ouvert »

Il s'agit d'appliquer le 1^{er} (et le 2^e) principe(s) de la thermodynamique au **système en écoulement dans un des éléments de la machine thermique** pour l'**évolution subie dans cet élément**.

Par cette approche, on obtient (cf § B) :

- la **variation d'enthalpie massique ou d'énergie cinétique massique** du fluide entre l'entrée et la sortie de cet élément ;
- le **travail massique ou la chaleur massique** (ou la **puissance mécanique ou thermique**) reçu(e) par le fluide lors de son passage dans cet élément.

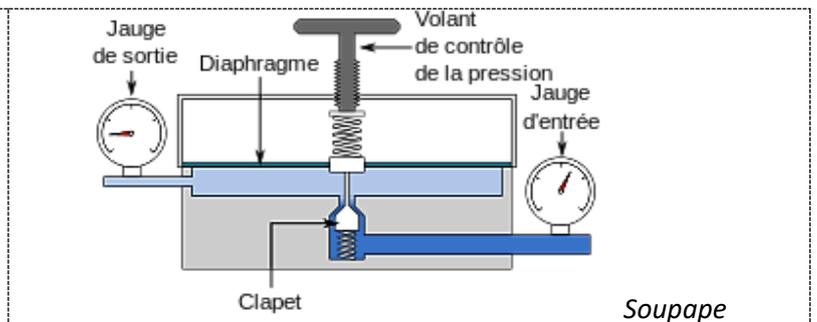
B) Quelques éléments de machines industrielles à écoulement

On décrit ici le fonctionnement d'éléments d'installations industrielles et on applique le 1^{er} principe pour un fluide en écoulement en tenant compte d'éventuelles simplifications. Ces simplifications proviennent d'hypothèses couramment employées repérées par *.

1) Détendeur (cf TDT2&T3)

DETENDEUR : organe, **sans partie mobile**, visant à **abaisser la pression** d'un fluide en forçant son passage à travers un bouchon poreux, un tube capillaire, ou encore une soupape ajustable.

La transformation subie par le fluide au sein du détendeur est appelée **détente** ou **laminage**.



Bilan d'énergie pour un fluide en écoulement **stationnaire** dans un détendeur **calorifugé*** où on peut négliger les variations d'énergies cinétique et potentielle massiques* :

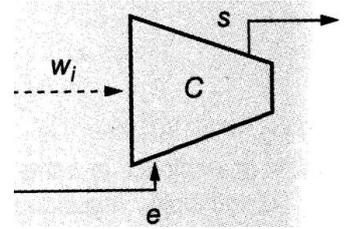
$$\Delta h = 0$$

On parle de détente / laminage isenthalpique nommée **détente de Joule-Thomson**.

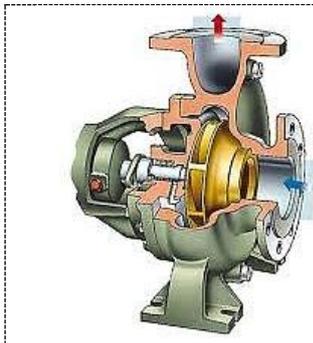
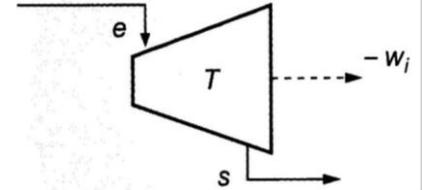
2) Compresseur et turbine (cf ChT2)

♦ **COMPRESSEUR** : dispositif visant à **augmenter la pression** d'un gaz par un procédé **mécanique** : via un arbre entraînant en rotation une roue à aubes ou via un piston. Le **fluide reçoit effectivement du travail de la part du compresseur**.

Pour un liquide, on parle de **pompe**.



♦ **TURBINE** : dispositif tournant visant à **recupérer un travail mécanique** : le **fluide fournit effectivement du travail**. Par son principe, **une turbine fonctionne à l'inverse d'un compresseur** : l'énergie de l'écoulement est utilisée pour mettre en rotation une roue à aubes solidaire d'un arbre mécanique. Par ailleurs, $P_s < P_e$.



Compresseur



Turbine d'une centrale à gaz.

Bilan d'énergie pour un gaz en écoulement stationnaire dans un compresseur ou une turbine calorifugé(e)* où on peut négliger les variations d'énergies cinétique et potentielle massiques*, on a :

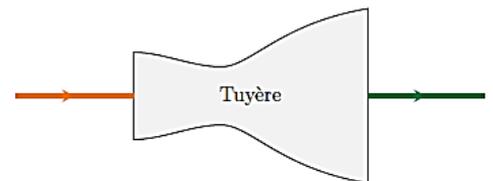
$$\Delta h = w_u$$

avec $w_u > 0$ pour un compresseur et $w_u < 0$ pour une turbine.

3) Tuyère (cf TDT2&T3)

TUYERE : conduite de section variable, **sans partie mobile**, visant à **augmenter la vitesse en sortie d'un fluide en écoulement**.

Rq : Le dispositif inverse est nommé **diffuseur**.



Tuyère d'éjection du moteur Vulcain qui équipe la fusée Ariane.

La tuyère transforme l'énergie thermique des gaz chauds, produits par le moteur, en énergie cinétique pour propulser la fusée.

Bilan d'énergie pour un fluide en écoulement stationnaire dans une tuyère calorifugée* où on peut négliger la variation d'énergie potentielle massique* :

$$\Delta h + \Delta e_c = 0$$

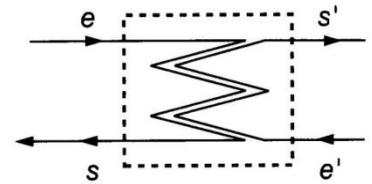
Si on peut négliger l'énergie cinétique en entrée*, la vitesse de sortie du gaz s'écrit : $c_s = \sqrt{2(h_e - h_s)}$

Si on modélise le gaz par un gaz parfait : $c_s = \sqrt{2c_p(T_e - T_s)}$

4) Echangeur thermique (cf TDT2&T3)

ECHANGEUR THERMIQUE : dispositif, sans partie mobile, assurant un transfert thermique entre deux fluides sans les mélanger.

Dans un **échangeur simple flux**, un seul écoulement est forcé, l'autre étant assuré par convection naturelle alors que dans un **échangeur double flux**, les deux fluides sont en écoulement forcé.



Bilan d'énergie pour un fluide en écoulement stationnaire dans un échangeur simple flux où on peut négliger les variations d'énergies cinétique et potentielle massiques* du fluide.

Le fluide extérieur est modélisé par un thermostat*.

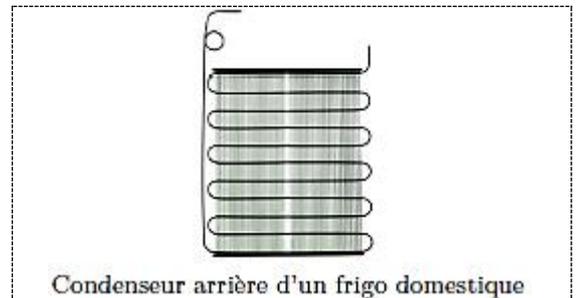
$$\Delta h = q$$

NB :

Les échangeurs sont souvent désignés en fonction de leur finalité :

Condenseur = échangeur thermique visant à liquéfier une vapeur ;

Evaporateur = échangeur thermique visant à vaporiser un liquide.



5) Bilan

Dispositif	Rôle	w_u	q	Bilan d'énergie
Détendeur	$\Delta P < 0$	0	0	$\Delta h = 0$
Turbine	Récupérer un travail mécanique	< 0	0	$\Delta h = w_u$
Compresseur	$\Delta P > 0$	> 0		
Tuyère	$\Delta c > 0$	0	0	$\Delta h + \Delta e_c = 0$
Echangeur thermique simple flux	Assurer un transfert thermique avec un fluide extérieur (thermostat)	0	$\neq 0$	$\Delta h = q$

NB : Rappel : Δ correspond à la différence « grandeur en sortie - grandeur à l'entrée » du dispositif étudié.
Rq : Pour des raisons de complexité technologique, on préfère séparer les tâches : les échanges thermiques et mécaniques sont réalisés dans des éléments distincts.

C) Exemples de machines motrices

1) Cas d'une machine à piston : Etude du moteur ditherme réel (Cours-TD)

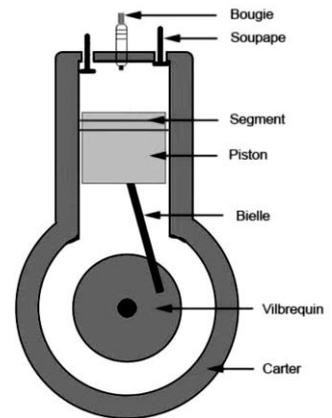
a) Description du moteur étudié : moteur à explosion

Le moteur à explosion à 4 temps est un moteur à combustion interne (i.e. que le **transfert thermique provient d'un combustible qui brûle** au sein du moteur).

Cf www.youtube.com/watch?v=b2_6GI2Z_uM

Le moteur contient un ou plusieurs cylindres. Chaque cylindre contient :

- un piston mobile lié à un système qui transforme un mouvement de translation (aller-retour du piston) en un mouvement de rotation ;
- deux soupapes : l'une d'admission (a) (du mélange {air-carburant}) et l'une d'échappement (e) (du mélange après un cycle).



Les quatre temps du moteur sont :

1^{er} temps (I) « admission » : Partant du point mort haut (le cylindre a son volume minimal), le piston descend progressivement en aspirant le mélange {air-carburant} par la soupape d'admission (a). Pendant ce temps, la soupape d'échappement (e) reste fermée. Lorsque le piston arrive en bas de course (point mort bas : le cylindre a son volume maximal) la soupape (a) se ferme.

Les soupapes (a) et (e) resteront fermées pendant les deux temps suivants.

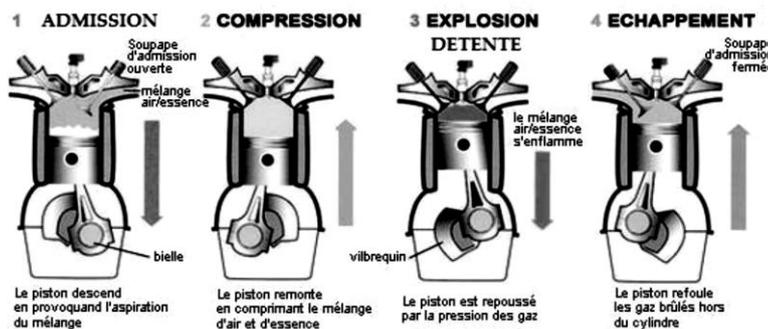
2^e temps (II) « compression » : Le piston remonte en comprimant le mélange jusqu'à ce que le volume du cylindre soit minimal.

3^e temps (III) « explosion-détente » : Ce temps constitue la phase proprement motrice.

(III₁) combustion : Lorsqu'une étincelle électrique (produite par la bougie) provoque l'explosion du mélange : le volume varie peu alors que la pression atteint son maximum.

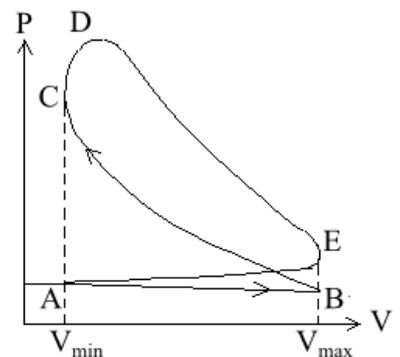
(III₂) détente : Les gaz d'échappement (produits de la combustion) se détendent par l'abaissement du piston jusqu'au point mort bas : le volume atteint est V_{max} .

4^e temps (IV) « échappement » : La soupape (e) s'ouvre alors, et le piston, en remontant, chasse les gaz brûlés dans l'atmosphère extérieure. Puis le cycle peut recommencer.



Le diagramme de Watt ci-contre représente la pression en fonction du volume du cylindre :

Sur ces quatre temps, deux sont moteurs (admission et explosion - détente) et deux sont récepteurs (compression et échappement). Pour avoir un système constamment moteur, on couple quatre cylindres.



En toute rigueur, on ne peut pas parler ici d'un cycle décrit par un système gazeux fermé (du fait de la combustion et des étapes d'admission et d'échappement). Néanmoins, **moyennant quelques approximations, nous allons pouvoir raisonner sur un système fermé.**

b) Modélisation : cycle de Beau de Rochas (cf CCINP MP 2021)

Le cycle décrit dans le § précédent n'est pas directement exploitable d'un point de vue théorique, **on le modélise donc par le cycle théorique de Beau de Rochas.**

Modélisation des transformations

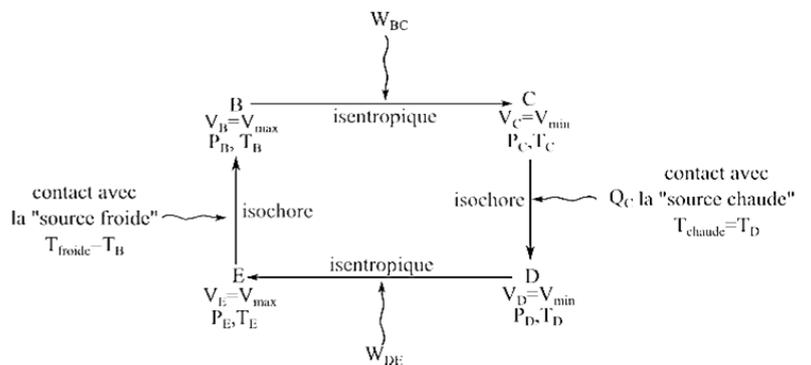
- (I) et (IV) évolutions **isothermes** et **isobares**.
- (II) compression **adiabatique réversible** (*compression suffisamment rapide et on néglige les frottements*).
- (III₁) compression **isochore** (*Brusque augmentation de pression*).
- (III₂) détente **adiabatique réversible** (*détente suffisamment rapide et on néglige les frottements*).
- juste avant l'échappement, le gaz se refroidit instantanément jusqu'à la température initiale et le piston n'a pas le temps de se déplacer : détente **isochore**.

Approximations pour considérer un système fermé :

- Les fluides initial {air + carburant} et final {air + gaz de combustion} sont assimilés à un **même gaz parfait de quantité de matière n constante et tel que $\gamma = 1,4$** . Cela est en pratique quasiment vérifié car l'air est en large excès dans le mélange et contient 80 % de diazote (N_2) qui ne réagit pas.
- On considère donc que le fluide ne subit aucune évolution chimique, et que **l'énergie thermique** issue de la combustion lui est **fournie lors de l'isochore (III₁) par une source chaude fictive extérieure**.
- Avec les approximations faites sur les étapes d'admission et d'échappement, on constate que ces étapes se compensent et on peut ainsi raisonner sur un **système fermé**.

On aboutit alors au **cycle de Beau de Rochas** constitué de **deux isochores** pendant lesquelles ont lieu les transferts thermiques et de **deux adiabatiques réversibles**.

Il s'agit bien d'un moteur ditherme dont la source chaude est fictive et dont la source froide est l'atmosphère.



⇒ **Représentation graphique** : Tracer le cycle de Beau de Rochas dans un diagramme de Watt $P = f(V)$.

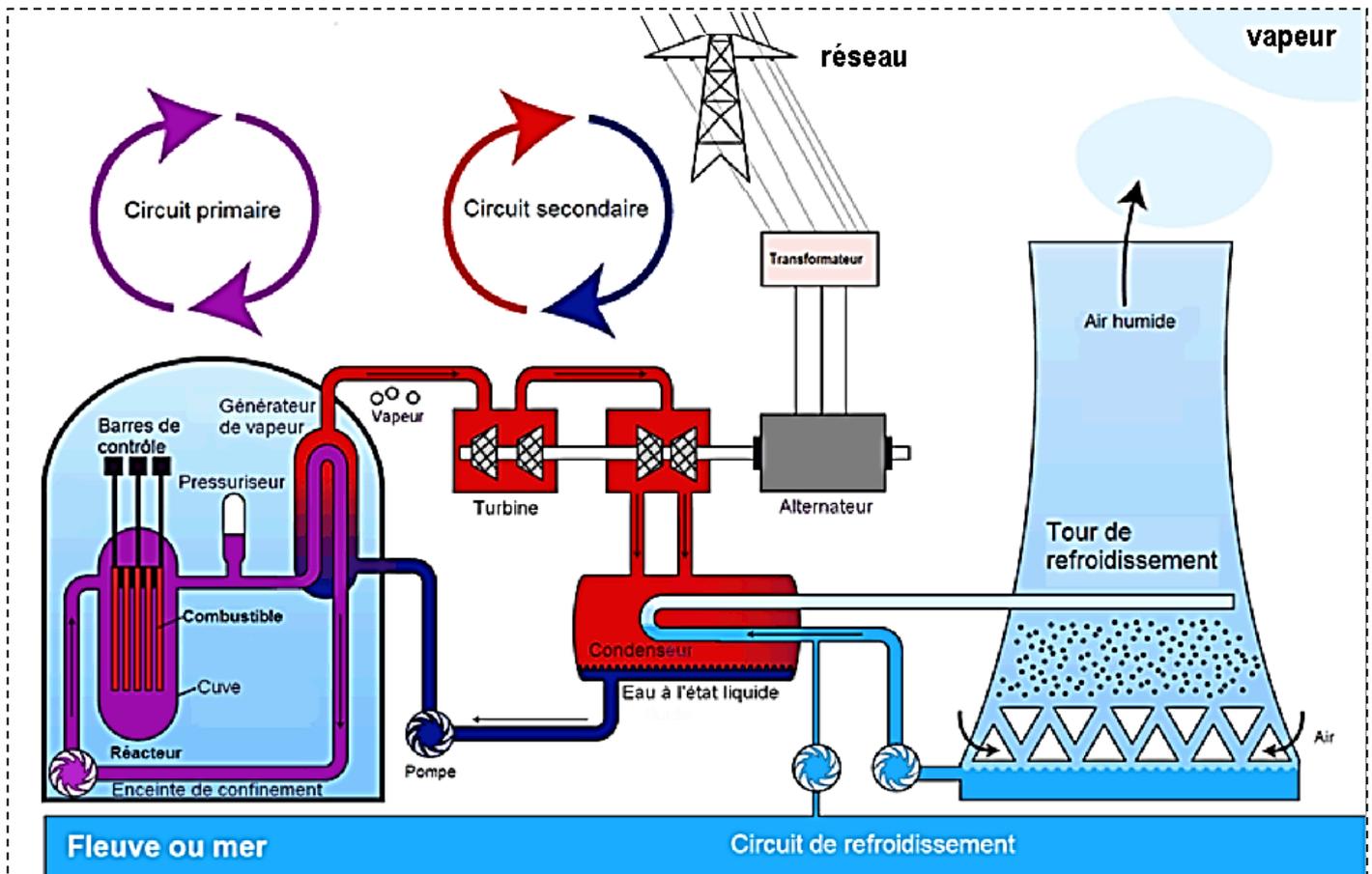
c) Exercice classique : Rendement du moteur

Le rendement du moteur est défini par : $r = \frac{-W_{cycle}}{Q_{CD}}$ et on note le taux de compression $a = \frac{V_{max}}{V_{min}}$.

- i) Donner l'expression du rendement en fonction des échanges thermiques au cours des différentes phases.
- ii) Exprimer ces échanges thermiques en fonction des températures aux points B, C, D, E et de la capacité thermique C_V du système. En déduire l'expression du rendement en fonction des températures.
- iii) Exprimer les rapports $\frac{T_E}{T_D}$ et $\frac{T_B}{T_C}$ en fonction de γ et du taux de compression a . En déduire l'expression du rendement en fonction de γ et de a . Comment évolue r avec a ? AN pour $a = 9$.
- iv) Calculer le rendement du moteur s'il fonctionnait selon un cycle de Carnot entre $T_{chaude} = 1220 K$ et $T_{froide} = 293 K$. Le cycle de Beau de Rochas est-il réversible ?

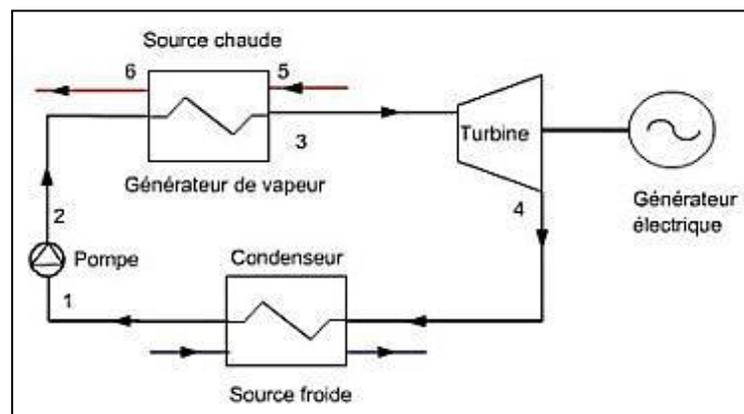
Rq : pour un moteur à explosion réel de taux de compression $a = 9$, $r_{réel} \approx 0,35$.

2) Cas d'une machine à écoulement : Centrale nucléaire à eau pressurisée (cf CCS MP 2016)



Le cycle subi par l'eau du circuit secondaire est nommé **cycle de Rankine**. Une telle installation comprend quatre éléments :

- ♦ une **pompe** ;
- ♦ un **générateur de vapeur** (évaporateur → échangeur thermique) ;
- ♦ une **turbine** ;
- ♦ un **condenseur** (→ échangeur thermique).



Fluide frigorigène en contact avec ...	Moteur
source chaude (SC) au niveau du générateur de vapeur	SC =
source froide (SF) au niveau du condenseur	SF =

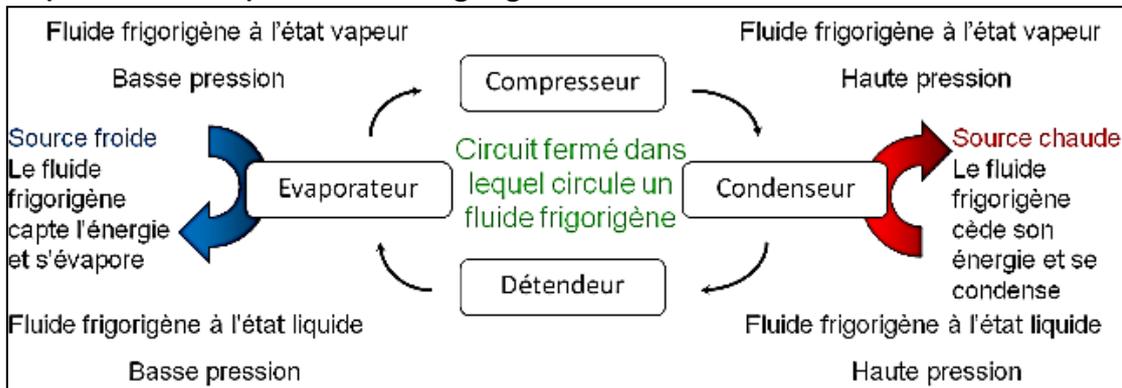
D) Exemples de machines réceptrices

1) Eléments constitutifs de récepteurs thermiques : PAC et réfrigérateur

Une pompe à chaleur (= PAC) est, comme un réfrigérateur, une machine thermodynamique constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide frigorigène.

Ce circuit est composé de quatre éléments principaux : un **compresseur**, un **détendeur** et deux **échangeurs thermiques** (le condenseur et l'évaporateur).

Le but d'un récepteur thermodynamique est de transférer l'énergie d'un milieu froid (source froide) à un milieu chaud (source chaude) via le fluide frigorigène.



Lors de ces étapes, le fluide frigorigène se trouve dans différents états (P, T, phases l/g).

Fluide frigorigène en contact avec ...	Réfrigérateur	Pompe à chaleur air-eau
source chaude (SC) au niveau du condenseur	SC =	SC =
source froide (SF) au niveau de l'évaporateur	SF =	SF =

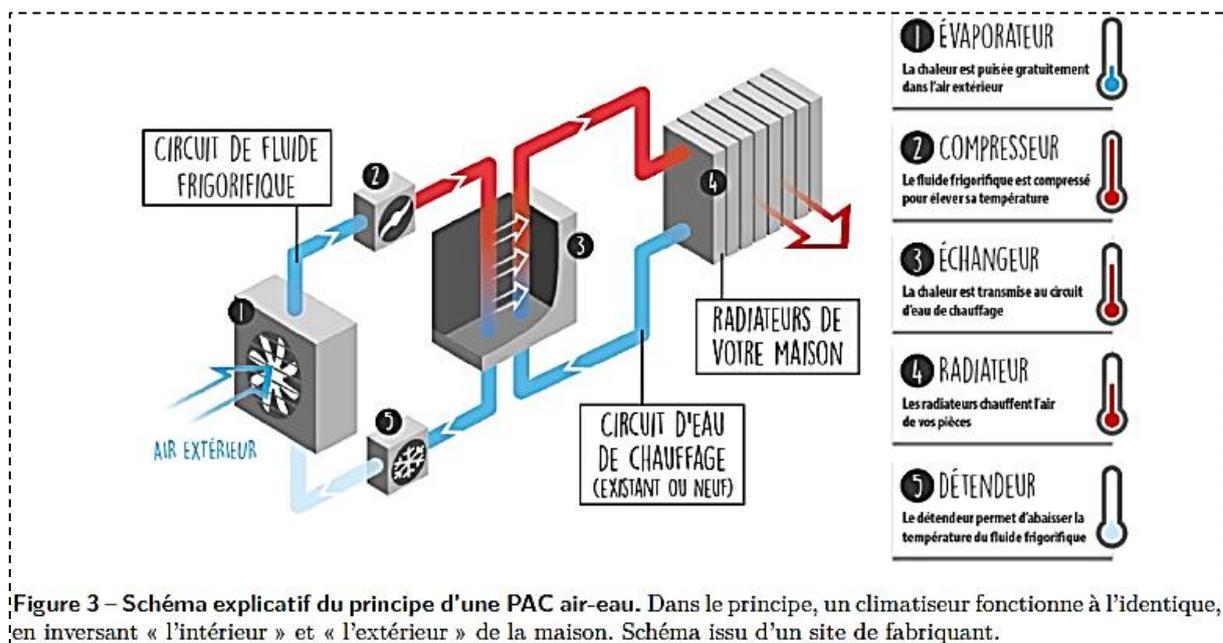


Figure 3 – Schéma explicatif du principe d'une PAC air-eau. Dans le principe, un climatiseur fonctionne à l'identique, en inversant « l'intérieur » et « l'extérieur » de la maison. Schéma issu d'un site de fabricant.

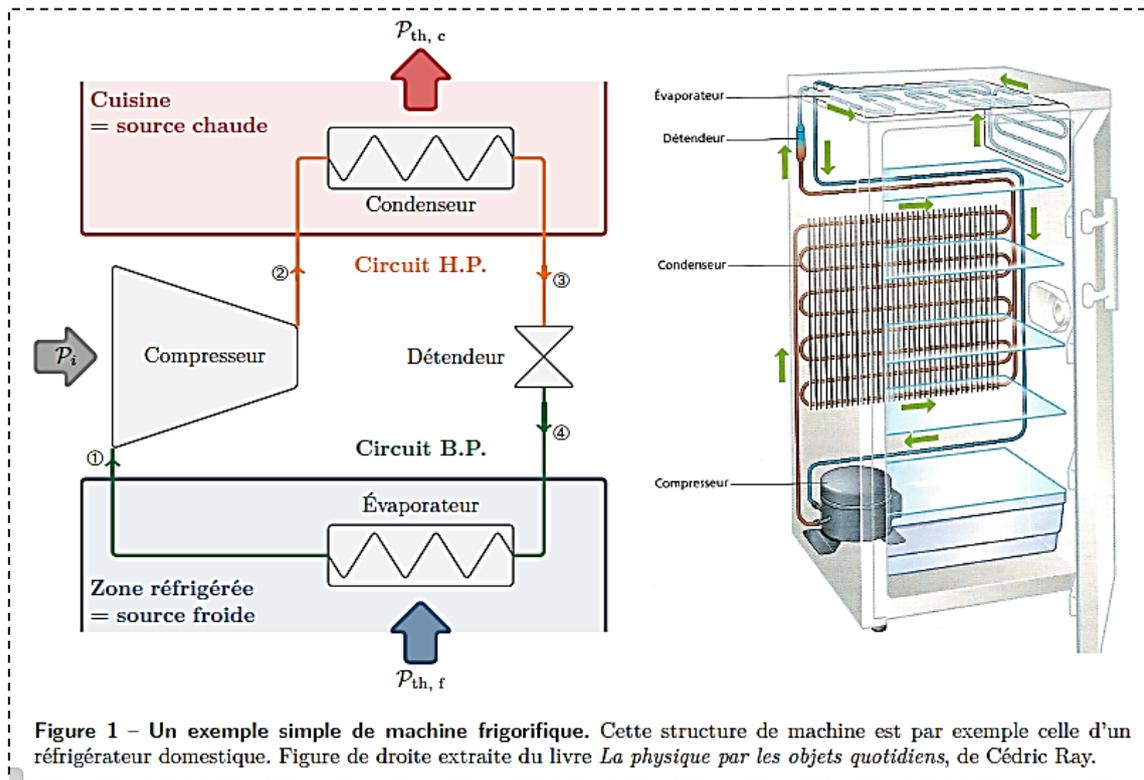


Figure 1 – Un exemple simple de machine frigorifique. Cette structure de machine est par exemple celle d'un réfrigérateur domestique. Figure de droite extraite du livre *La physique par les objets quotidiens*, de Cédric Ray.

2) Etude d'une machine frigorifique avec le diagramme des frigoristes (Cours-TD)

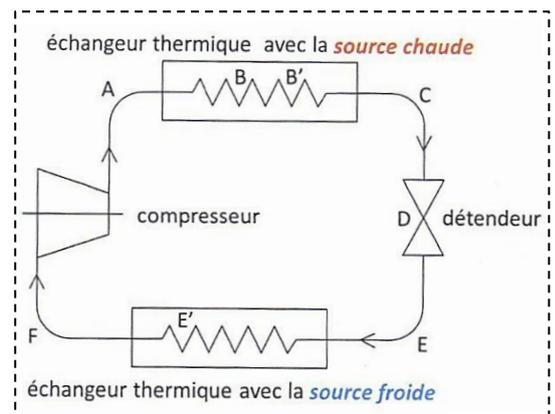
a) Description du cycle

Certains organes réalisent plusieurs transformations : le cycle comprend au total 8 étapes AB, BB', B'C, CD, DE, EE', E'F et FA (les lettres sont repérées sur la figure ci-contre).

Le cycle s'effectue entre une pression minimale P_{min} et une pression maximale P_{max} .

Données : $T_F = -5^\circ\text{C}$ (freezer), $T_C = 20^\circ\text{C}$, $P_{min} = 2,0 \text{ bar}$, $P_{max} = 10 \text{ bar}$.

L'agent thermique est le R-134a dont le diagramme (P, h) est donné p.12.



(i) Compression FA

Partons du fluide qui vient de sortir de l'évaporateur. Le fluide est entièrement à l'état gazeux, à la température T_F et sous la pression P_{min} : cet état est noté F.

Le compresseur comprime le fluide frigorigène (à l'état vapeur) pour augmenter sa pression et sa température. A la sortie du compresseur, le fluide frigorigène est sous phase (g), sa pression vaut P_{max} et sa température vaut T_{max} . On suppose cette compression réversible.

(ii) Refroidissement AB, liquéfaction BB' et refroidissement B'C

Le fluide à la température T_{max} entre dans le condenseur. Le fluide circule à pression constante P_{max} dans le condenseur.

On modélise la transformation au sein du condenseur en 3 étapes :

- AB : l'agent thermique, à l'état gazeux, **cède de la chaleur** et se refroidit. Le fluide atteint alors sa température de liquéfaction T_{liq} .
- BB' : l'agent thermique se **liquéfie** totalement à la température T_{liq} .
- B'C : une fois à l'état **liquide**, l'agent thermique se refroidit **en cédant encore de la chaleur** jusqu'à l'équilibre thermique.

(iii) **Détente CD et vaporisation partielle DE**

Le détenteur réalise une détente **adiabatique** : en C (après le condenseur), la pression du fluide vaut P_{max} et en E (juste avant l'évaporateur), elle vaut P_{min} .

(iv) **Evaporation EE' et échauffement E'F**

Enfin, l'agent thermique circule dans le dernier organe de la machine : l'évaporateur.

Le fluide :

- **se vaporise totalement** : étape EE' ;
- **puis se réchauffe** : étape E'F (« surchauffe ») jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit atteint.

De même qu'au niveau du condenseur, les étapes réalisées dans l'évaporateur sont **isobares**.

b) Exercice classique : Etude avec le diagramme des frigorigères – Efficacité de la machine frigorifique

- Identifier les sources froide et chaude de la machine frigorifique.
- Lorsque le fluide circule dans le condenseur, avec quelle source est-il mis en contact ?
- Même question pour l'évaporateur.
- Que peut-on dire de la transformation CE ?
- Placer les points F, A, B, B', C, D, E et E' sur le diagramme (P,h). Justifier en précisant d'éventuelles hypothèses.
- Donner la valeur de la température T_{max} et le titre en vapeur en E.
- Calculer l'efficacité de cette machine frigorifique et la comparer à l'efficacité de Carnot.

