

- *Machines thermiques* -

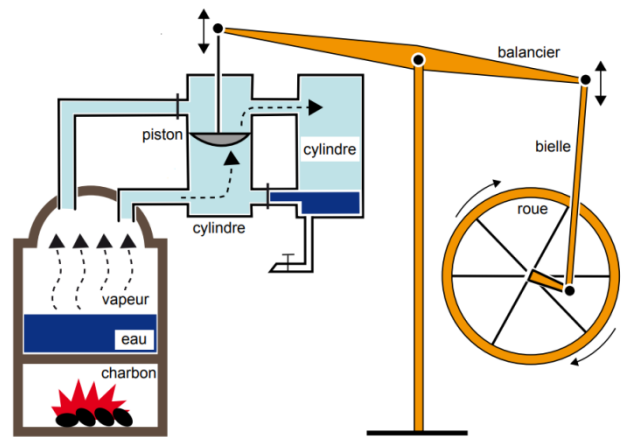
Notions et contenus	Capacités exigibles
- Application du premier principe de la thermodynamique et de l'inégalité de Clausius aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, limitations.	- Décrire le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme. - Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme. - Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. - Citer quelques ordres de grandeur des rendements ou efficacités des machines thermiques réelles actuelles. - Expliquer le principe de la cogénération.
- Premier principe de la thermodynamique pour l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire dans un système muni d'une seule entrée et d'une seule sortie.	- Démontrer et utiliser le premier principe de la thermodynamique pour l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire, en termes de grandeurs massiques ou en termes de puissances, notamment pour l'étude d'un détendeur, d'un compresseur, d'une turbine, d'un échangeur thermique.
- Diagramme (P,h) de fluides réels.	- Exploiter un diagramme donnant la pression P (ou logP) en fonction de l'enthalpie massique h d'un fluide réel pour l'étude de machines thermodynamiques réelles.

Une grande partie de notre technologie repose sur des machines réalisant des transferts d'énergie. Les premières machines étaient purement mécaniques (levier, poulie, moulin ...) car elles convertissaient une énergie mécanique en une autre forme d'énergie mécanique. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux machines qui convertissent de l'énergie thermique en énergie mécanique ou inversement : on parle de **machines thermiques**.

Les premières d'entre elles étaient *les machines à vapeur* : elles ont été construites au cours du 18<sup>ème</sup> siècle, la plus célèbre d'entre elles étant probablement la machine de James Watt (1736-1819), mise au point en 1765 (voir ci-contre). Son principe est le suivant : on chauffe de l'eau (énergie thermique) pour produire de la vapeur d'eau, qui, une fois introduite dans un cylindre, exerce une pression sur un piston qu'elle met alors en mouvement, entraînant avec lui un balancier, une bielle et une roue (énergie mécanique).

Plus proches de nous, *la pompe à chaleur* qui réchauffe l'intérieur d'une maison l'hiver, *le climatiseur* qui la refroidit l'été, *le réfrigérateur* qui refroidit les aliments et permet de les conserver, *le moteur thermique* d'une voiture sont autant d'autres exemples de machines thermiques ...

Le but de ce chapitre est de comprendre le principe de fonctionnement de ces machines en utilisant notamment les notions de thermodynamique présentées dans le cours de **Physique 06**.



## I- Généralités sur les machines thermiques

### 1) Définition

**Exemples :**



**Moteurs thermiques** (de voiture, centrale nucléaire, ...) : ils convertissent l'énergie thermique récupérée par la combustion du carburant ou par la réaction nucléaire en énergie mécanique.

**Machines frigorifiques** (Réfrigérateurs, congélateurs, climatiseur, ...) : elles prélèvent de l'énergie thermique à un milieu pour la rejeter dans un autre milieu, pourtant plus chaud. Cela coûte de l'énergie mécanique pour fonctionner, énergie fournie par le compresseur qu'on entend bien quand le frigo fonctionne. Notons que cette énergie mécanique a en amont été convertie à partir d'énergie électrique : l'énergie que vous payez à EDF.



**Pompe à chaleur** : C'est techniquement la même machine que le réfrigérateur / congélateur / climatiseur, mais le but est ici de réchauffer la maison. En hiver, la pompe à chaleur prélève de l'énergie thermique à l'extérieur de la maison pour l'injecter dans celle-ci, pourtant plus chaude que dehors. Là aussi, cela nécessite de l'énergie mécanique pour fonctionner.

## 2) Description du système

Dans la plupart des machines thermiques, un **fluide gazeux et/ou liquide** circule dans une enceinte fermée : ce fluide constituera notre système. La machine thermique fonctionnant pendant une durée indéfinie, le fluide doit donc réaliser des **cycles de transformations**, chacune de ces transformations permettant de réaliser des échanges d'énergie avec l'extérieur.

Au cours de son cycle, **le fluide pourra échanger de l'énergie avec deux catégories de sources extérieures** :

→ Avec des sources mécaniques (par exemple un piston, une turbine ...) : dans ce cas, **l'énergie est échangée par TRAVAIL** et on la note **W** ;

→ Avec des sources de chaleur avec lesquelles le fluide sera en contact (par exemple l'air extérieur, l'intérieur d'un frigo ...) : dans ce cas, **l'énergie est échangée par TRANSFERTS THERMIQUES**, et on la note **Q** ; ces sources de chaleur seront modélisées par des thermostats.

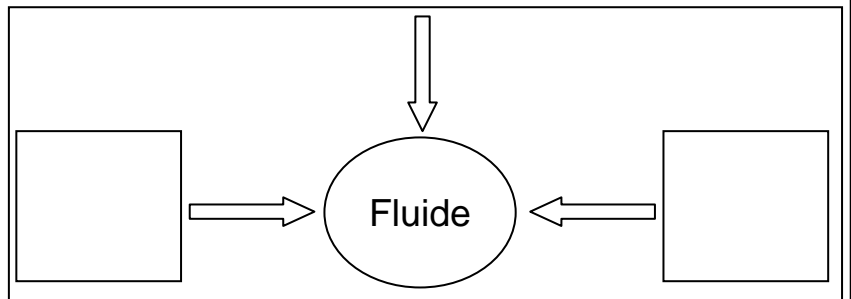


**Rappel du cours de Physique 06** : un **THERMOSTAT** est un système dont la température est constante quels que soient les échanges énergétiques qu'il effectue.

Dans la suite, on s'intéressera aux **machines DITHERMES** :

La représentation ci-contre est la **schématisation conventionnelle d'une machine ditherme**, les grandeurs **W**, **Q<sub>c</sub>** et **Q<sub>f</sub>** étant des **grandeurs algébriquement reçues** par le système :

- comptées **POSITIVEMENT** si le fluide reçoit effectivement de l'énergie de l'extérieur ;
- comptées **NEGATIVEMENT** si le fluide cède de l'énergie à l'extérieur.



☞ **Application 1** : Compléter le tableau ci-dessous en indiquant ce qui joue le rôle de fluide, de source froide et de source chaude dans le cas du réfrigérateur et du moteur de voiture.

	Fluide	Source chaude	Source froide
REFRIGERATEUR			
MOTEUR DE VOITURE			

## 3) Relations entre les énergies échangées

### a/ Utilisation du premier principe de la thermodynamique

On considère une machine ditherme dont le fluide **reçoit algébriquement** un travail **W**, un transfert thermique **Q<sub>c</sub>** d'une source chaude et un transfert thermique **Q<sub>f</sub>** d'une source froide. On note **U** l'anergie interne du fluide et **ΔU** sa variation sur un cycle complet de transformations.

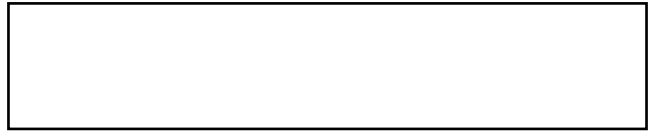
### b/ Inégalité de Clausius

Cette relation est issue du **2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique** qui sera étudié en 2<sup>ème</sup> année. Elle fait un lien entre les énergies **Q<sub>c</sub>** et **Q<sub>f</sub>** **algébriquement reçues** par le fluide par transferts thermiques. Pour une machine ditherme, l'inégalité de Clausius s'écrit :

### c/ Rendement ou efficacité d'une machine ditherme

Pour qu'une machine thermique puisse fonctionner, l'expérimentateur doit lui fournir une énergie ; à l'issue de chaque cycle, on va alors récupérer une énergie qui était celle recherchée par l'utilisation de la machine (énergie désirée).

Pour comparer l'énergie à fournir par l'expérimentateur et l'énergie désirée qu'il récupère on définit la grandeur positive sans dimension :  
-  $\eta$  (appelée *RENDEMENT*) pour les moteurs ;  
-  $\epsilon$  (appelée *EFFICACITE*) pour les récepteurs.



*Vocabulaire* : l'énergie « désirée » est souvent appelée énergie « utile ».

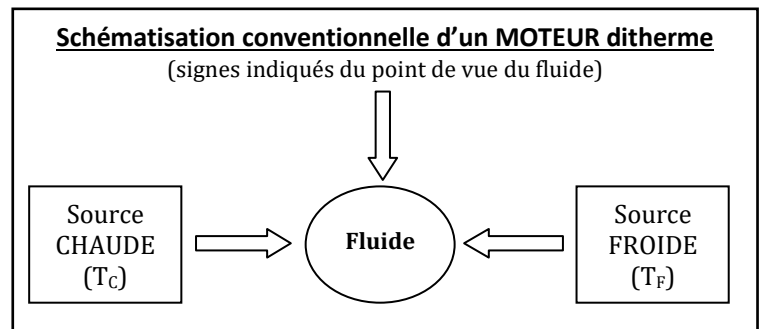
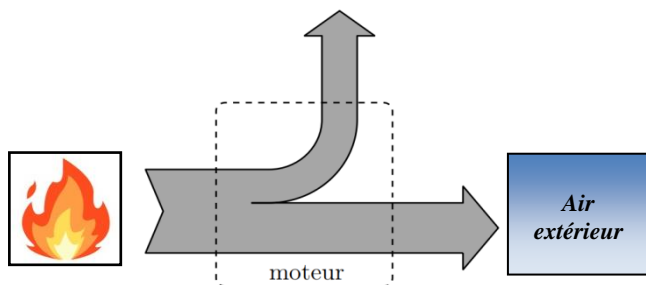
## II- Exemples de machines thermiques dithermes

### 1) Les moteurs thermiques

#### a/ Principe de fonctionnement

Le mot « moteur » nous fait immédiatement penser aux moteurs des véhicules qui les font avancer. Dans le cas classique d'un moteur fonctionnant avec de l'essence, **un transfert thermique a lieu NATURELLEMENT de la source chaude** (créée par la combustion d'un mélange air/essence) **vers la source froide** (l'air extérieur), entraînant par la même occasion le mouvement d'une pièce mécanique et donc, la création d'énergie mécanique.

Le schéma de gauche ci-dessous représente le sens réel des échanges énergétiques tels qu'ils ont été décrits précédemment.



Il existe d'autres moteurs thermiques dont le but n'est pas de fabriquer de l'énergie mécanique, mais de l'énergie électrique : c'est le cas des centrales électriques et autres groupes électrogènes qui sont donc aussi à ranger dans la catégorie des moteurs thermiques.

#### b/ Rendement d'un moteur ditherme

☛ Utilisation du 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique :

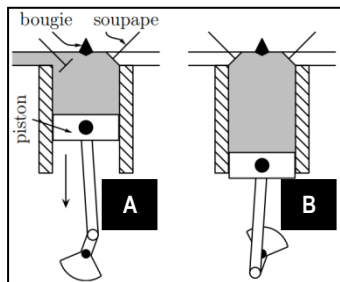
☛ Utilisation de l'inégalité de Clausius :

☛ Commentaires :

☛ Ordres de grandeurs : Calculer le rendement maximal d'un moteur ditherme pour lequel  $T_F = 20\text{ °C}$  et  $T_C = 500\text{ °C}$ .

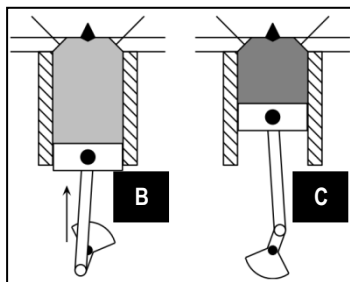
### c/ Représentation du cycle dans un diagramme de Watt (P,V) – Exemple du moteur à 4 temps

Comme leur autre nom l'indique, les moteurs à essence traditionnels (ou moteurs « à 4 temps ») fonctionnent selon un cycle se déroulant en 4 phases décrites ci-dessous. C'est le physicien français *Beau De Rochas* qui a établi ce cycle de façon théorique en 1862.



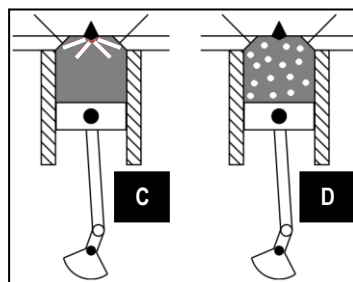
• **1<sup>er</sup> temps (A → B) :**

La soupape de droite étant fermée, celle de gauche s'ouvre et le piston descend en aspirant le mélange air/carburant. Le volume de gaz présent dans la chambre passe du volume  $V_{\min}$  au volume  $V_{\max}$ , à la pression  $P_{\text{atm}}$ . A la fin de ce temps, la soupape de gauche se ferme.



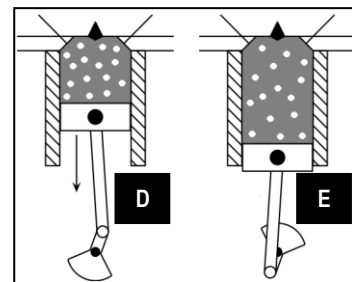
• **2<sup>ème</sup> temps (B → C) :**

Toutes les soupapes étant fermées, le piston remonte et réalise une compression adiabatique réversible du gaz jusqu'en C où celui-ci occupe le volume  $V_{\min}$  et est à la pression  $P_C$ .



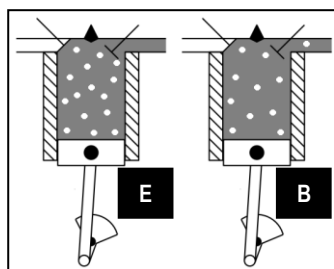
• **Explosion (C → D) :**

La bougie crée une étincelle qui initie la réaction de combustion entre l'air et le carburant ; cette combustion est extrêmement rapide : c'est une explosion. Elle est si rapide que le piston a à peine le temps de bouger (on considérera la transformation isochore). Mais la pression à l'intérieur de la chambre augmente fortement jusqu'à une pression  $P_D$ .



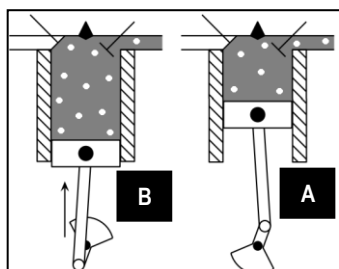
• **3<sup>ème</sup> temps (D → E) :**

La forte pression  $P_D$  régnant à l'intérieur de la chambre repousse le piston jusqu'à son volume  $V_{\max}$ , permettant une détente adiabatique réversible du gaz jusqu'à une pression  $P_E$ .



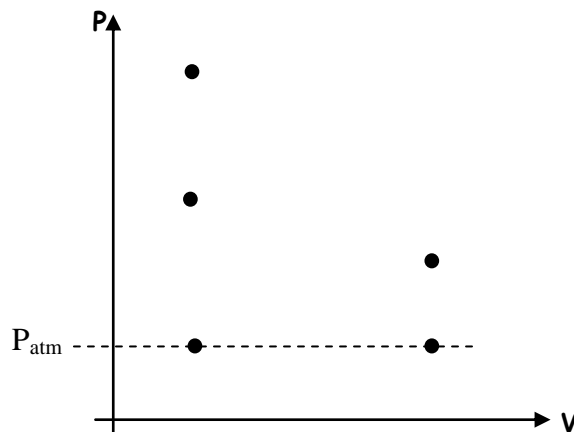
• **4<sup>ème</sup> temps (E → B) :**

La soupape de droite s'ouvre, provoquant une rapide baisse de pression isochore jusqu'en B.



• **Refoulement des gaz (B → A) :**

Le piston remonte pour refouler les gaz brûlés puis la soupape de droite se referme. Le cycle peut recommencer ...



✂ **Application 2 :**

a) Indiquer sur le diagramme de Watt (P,V) ci-dessus la position des états **A, B, C, D** et **E** puis relier ces points par des droites ou par des courbes fléchées en accord avec le type de transformations subies par le gaz.

b) Rappeler comment on peut qualitativement déterminer algébriquement le signe du travail des forces de pression reçu par un système sur un diagramme de Watt.

c) En déduire sur quelle étape du cycle le gaz reçoit réellement un travail de l'extérieur puis sur quelle étape il en fournit réellement à l'extérieur.

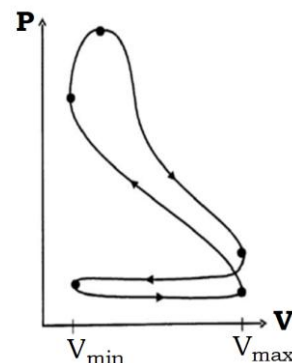
# Etape **B → C** :

# Etape **D → E** :

# Etapes **C → D** et **E → B** :

d) Finalement, sur un cycle complet, le moteur reçoit-il ou fournit-il un travail à l'extérieur ?

e) Le cycle réel d'un moteur à 4 temps est reproduit ci-contre. Y indiquer la position des points **A, B, C, D** et **E**.

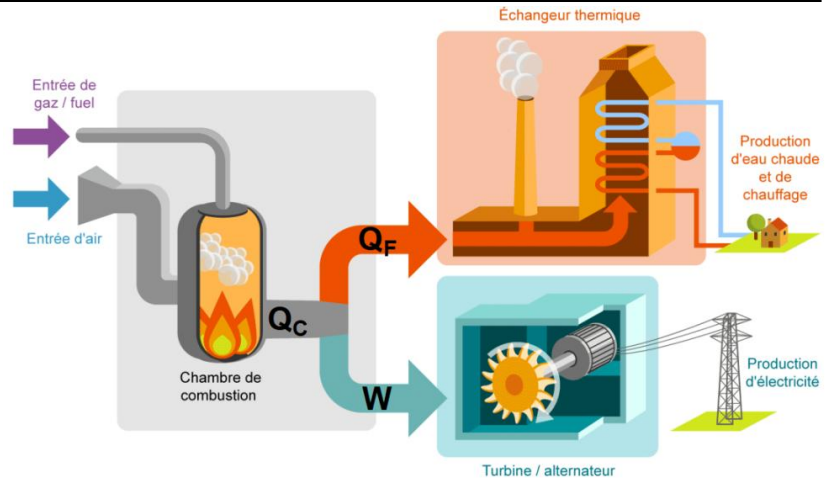


## d/ Principe de la cogénération

L'étude précédente montre qu'une partie de l'énergie fournie pour faire fonctionner le moteur est perdue : il s'agit de l'énergie  $Q_F$  cédée par transfert thermique à la source froide sans être utilisée ; or, perdre de l'énergie n'est plus concevable de nos jours. **Une nouvelle génération de machines thermiques permet d'y remédier en « récupérant » cette énergie perdue pour la valoriser, c'est-à-dire pour en faire quelque chose d'utilisable** : c'est le principe de la cogénération.

L'illustration ci-contre en est un exemple : dans les anciennes générations de centrales thermiques, seule la production du travail mécanique  $W$  était valorisée pour être ensuite transformée en énergie électrique ; en revanche, l'énergie  $Q_F$  était cédée à l'atmosphère ou à l'eau d'un fleuve environnant et était donc perdue.

Désormais, cette énergie  $Q_F$  peut être récupérée par un échangeur thermique qui va par exemple l'utiliser pour produire de l'eau chaude ; celle-ci pourra alors être distribuée dans un réseau de chauffage ou dans des installations sanitaires.

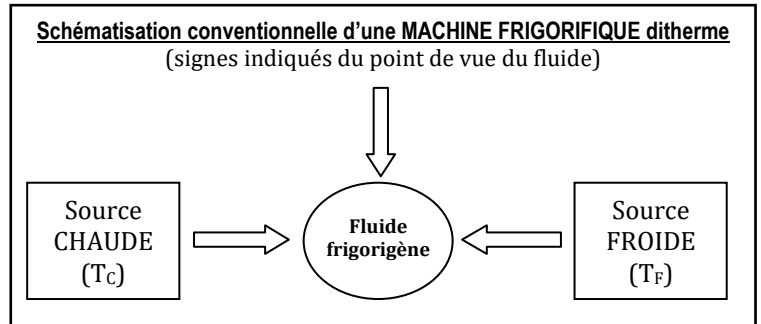
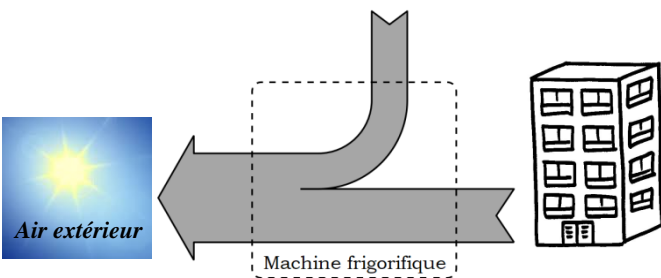


## 2) Les machines frigorifiques, un premier exemple de récepteur thermique

### a/ Principe de fonctionnement

Alors que les moteurs thermiques ont pour base de fonctionnement un transfert thermique spontané qui s'opère de la source chaude vers la source froide, **le transfert thermique qui est recherché dans une machine frigorifique** (réfrigérateur, climatiseur ...) **est TOUT SAUF NATUREL**. En effet, imaginons un appartement, fenêtres ouvertes en plein été : il y règne  $35\text{ °C}$  aussi bien dehors que dedans ... On ferme les fenêtres et on met en marche le climatiseur : la température à l'intérieur de l'appartement atteint  $25\text{ °C}$  en quelques minutes et s'y maintient. De l'énergie thermique est donc régulièrement retirée de l'habitation (la zone froide) pour être évacuée à l'extérieur (la zone chaude) : le climatiseur a donc permis un **transfert thermique de la source froide vers la source chaude**, ce qui n'est effectivement pas un transfert thermique naturel.

Comme ce transfert thermique n'est pas naturel, il ne se fait pas spontanément : il faut le forcer à se faire en apportant de l'énergie électrique au climatiseur pour qu'il fonctionne. Le schéma de gauche ci-dessous représente le sens réel des échanges énergétiques tels qu'ils ont été décrits précédemment.



### b/ Efficacité d'une machine frigorifique ditherme

☛ Utilisation du 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique :

☛ Utilisation de l'inégalité de Clausius :

☛ Commentaires :

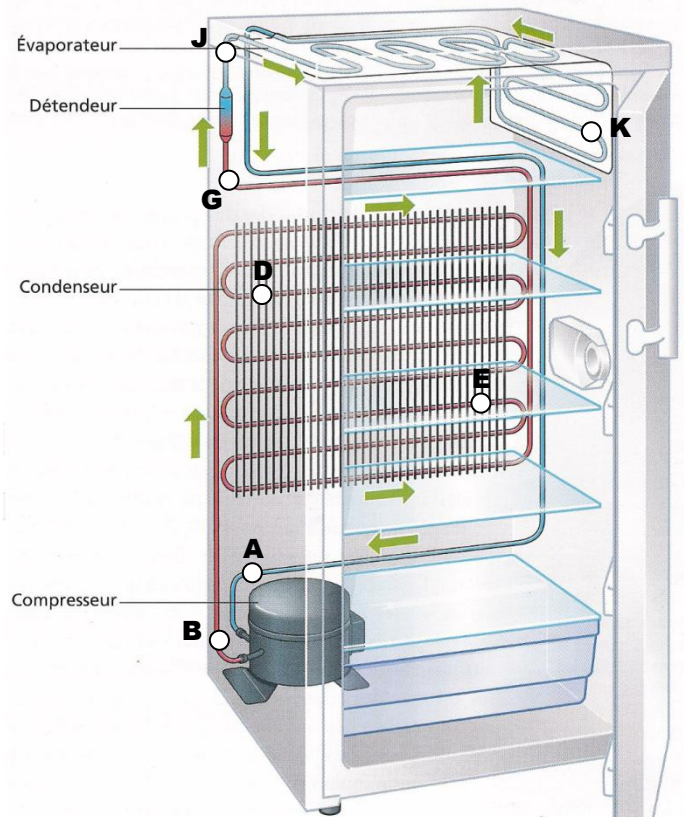
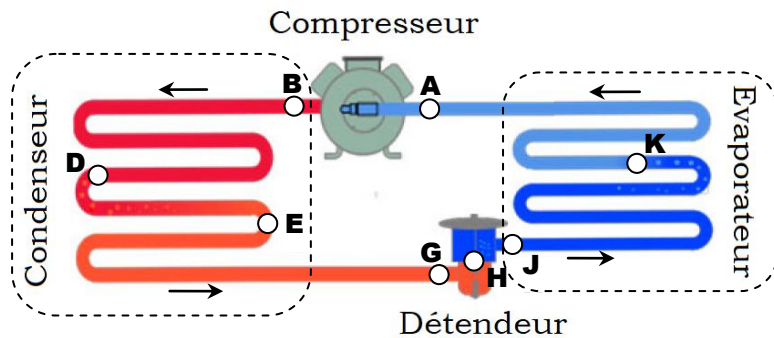
☛ Ordres de grandeurs : Calculer l'efficacité maximale d'un climatiseur qui maintiendrait la température d'un appartement à 25 °C pour une température extérieure de 35 °C.



Ce résultat peut paraître surprenant et en contradiction avec la conservation de l'énergie, mais il n'en est rien : le premier principe est toujours respecté. Par exemple, une efficacité de 31 signifie que  $Q_F = 31 \times W$ , c'est-à-dire qu'en consommant  $W = 1 \text{ J}$  de travail mécanique (pour faire fonctionner le compresseur), on arrive à prélever  $Q_F = 31 \text{ J}$  d'énergie thermique à la source froide (sous-entendu, en rejetant  $-Q_C = 32 \text{ J}$  d'énergie dans la source chaude).

**c/ Représentation du cycle dans un diagramme de Watt (P,V) – Exemple du réfrigérateur**

Dans un réfrigérateur, le fluide frigorigène circule successivement dans les différents éléments représentés sur le schéma ci-contre : le compresseur, le condenseur, le détendeur et l'évaporateur. Voyons quel est le rôle de chacun de ces dispositifs avec une température de source froide  $T_{\text{Froide}} = 4 \text{ °C}$  (l'air intérieur du frigo) et  $T_{\text{Chaude}} = 20 \text{ °C}$  (l'air extérieur au frigo).



• **Le Compresseur :** A → B

En **A**, le fluide est sous forme gazeuse, à la température  $T_{\text{Froide}}$  de la source froide et à une pression minimale  $P_A = P_{\text{MIN}}$ .

Le compresseur utilise un piston pour réaliser une compression et ainsi, élever la pression du fluide. En **B**, le fluide est toujours gazeux mais à une pression  $P_B = P_{\text{MAX}}$  et à une température  $T_B = T_{\text{MAX}}$  de l'ordre de 40 °C, supérieure à  $T_{\text{Chaude}}$ .

• **Le Condenseur :** B → D → E → G

Le condenseur est un dispositif en forme de serpentín situé à l'arrière du réfrigérateur et à l'extérieur de celui-ci, au contact de l'air ambiant. C'est un tube de section constante dans lequel le fluide ne rencontre aucun obstacle et où on peut supposer que la pression reste constante et égale à  $P_{\text{MAX}}$  sur l'ensemble du trajet **BDEG**.

Comme le fluide est introduit en **B** à une température supérieure à celle de l'air ambiant qui l'entoure, son trajet dans le condenseur va lui permettre de se refroidir, mais cela va se faire en trois étapes :

- **De B à D**, il est gazeux et se refroidit jusqu'à atteindre la température de condensation  $T_{\text{COND}}$  caractéristique de la pression  $P_{\text{MAX}}$  : au point **D** apparaît la 1<sup>ère</sup> goutte de liquide.

- **De D à E**, le fluide poursuit sa condensation à l'état liquide à la température  $T_{\text{COND}}$  : au point **E**, la totalité du fluide est devenue liquide.

- **De E à G**, le liquide se refroidit encore jusqu'à atteindre une température  $T_G$  inférieure ou égale à la température  $T_{\text{Chaude}}$  de la source chaude. On a donc :  $T_G < T_{\text{Chaude}} < T_{\text{COND}} < T_{\text{MAX}}$ .

• **Le Détendeur** : G → H → J

Ce dispositif permet d'abaisser la pression du fluide de  $P_{MAX}$  à  $P_{MIN}$  et la température de  $T_G$  à une valeur  $T_{MIN} < T_{Froide}$  de la source froide. On peut décomposer ce processus en deux temps :

- De **G à H** : la pression diminue mais le fluide reste liquide jusqu'au point **H** où la première bulle de gaz apparaît ;
- De **H à J** : la pression diminue toujours et la vaporisation du liquide se poursuit jusqu'au point **J** où elle n'est que partielle.

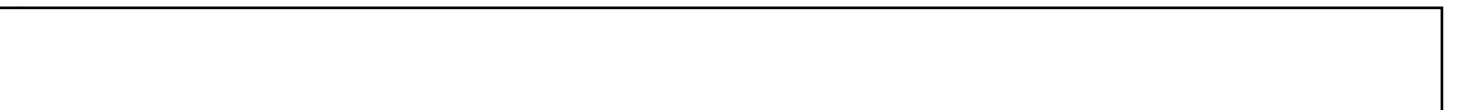


• **L'évaporateur** : J → K → A.

L'évaporateur est un serpentin situé à l'intérieur du réfrigérateur (on ne le voit généralement pas car il est « caché » dans les parois de l'appareil) au contact direct de l'air qu'il contient à une température  $T_{Froide} = 4\text{ °C}$ . C'est un tube de section constante dans lequel le fluide ne rencontre aucun obstacle et où on peut supposer que la pression reste constante et égale à  $P_{MIN}$  sur l'ensemble du trajet **JKA**.

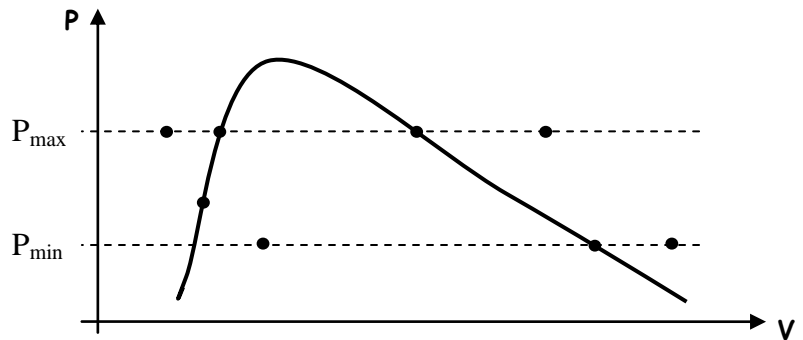
Comme le fluide est introduit en **J** à une température  $T_{MIN}$  inférieure à celle de l'air du réfrigérateur ( $T_{Froide}$ ) avec lequel il est en contact, le trajet dans l'évaporateur va permettre au fluide de se réchauffer en prenant de l'énergie à l'air présent à l'intérieur du réfrigérateur : c'est l'étape clé qui explique le refroidissement de l'intérieur du réfrigérateur. On peut décomposer ce processus en deux temps :

- De **J à K**, le fluide qui était déjà partiellement vaporisé poursuit sa vaporisation à la température constante  $T_{MIN}$  jusqu'à atteindre le point **K** où la dernière goutte de liquide se vaporise ;
- De **K à A**, le fluide (entièrement sous forme gazeuse) se réchauffe jusqu'à atteindre la température  $T_{Froide}$  de la source froide.



⌘ **Application 3** : Indiquer sur le diagramme de Watt ( $P, V$ ) ci-contre la position des états **A, B, D, E, G, H, J** et **K** puis relier ces points par des droites ou par des courbes fléchées en accord avec le type de descriptions subies par le fluide.

Dans quel sens est parcouru le cycle ? Conclure.

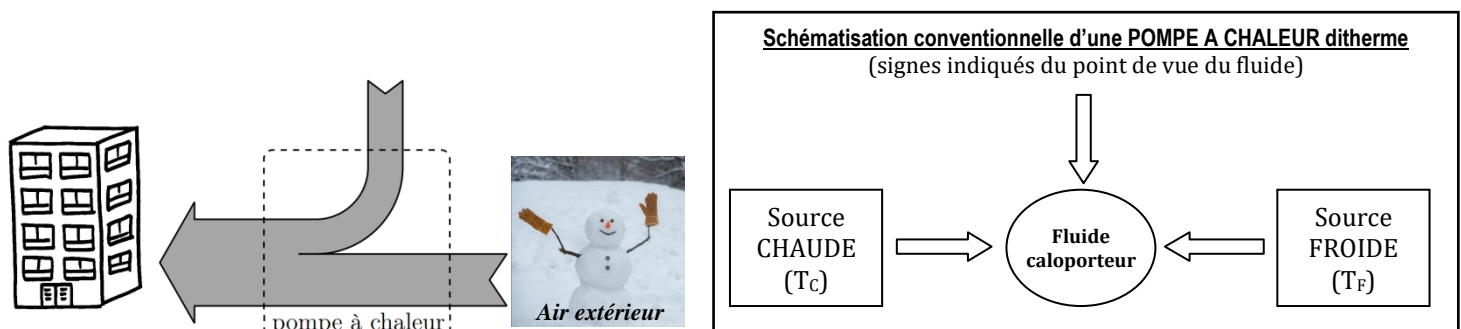


### 3) Les pompes à chaleur, un deuxième exemple de récepteur thermique

#### a) Principe de fonctionnement

De la même manière que les machines frigorifiques, **le transfert thermique qui est recherché dans une pompe à chaleur est TOUT SAUF NATUREL**. En effet, imaginons un appartement, fenêtres ouvertes en plein hiver : la température mesurée y est de  $0\text{ °C}$  aussi bien dehors que dedans. Si on ferme les fenêtres et qu'on met en marche la pompe à chaleur, la température à l'intérieur de l'appartement atteindra  $20\text{ °C}$  en quelques minutes et s'y maintiendra car de l'énergie thermique est régulièrement apportée dans l'appartement (la zone chaude) en provenance de l'extérieur (la zone froide = air extérieur ou sous-sol) : **la pompe à chaleur a donc permis un transfert thermique de la source froide vers la source chaude**, ce qui n'est effectivement pas un transfert thermique naturel.

Comme ce transfert thermique n'est pas naturel, il ne se fait pas spontanément : il faut le forcer à se faire en apportant de l'énergie électrique à la pompe à chaleur pour qu'elle fonctionne. Le schéma de gauche ci-dessous représente le sens réel des échanges énergétiques tels qu'ils ont été décrits précédemment.



## b/ Efficacité d'une pompe à chaleur ditherme

☛ Utilisation du 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique :

☛ Utilisation de l'inégalité de Clausius :

☛ Commentaires :

☛ Ordres de grandeurs : Calculer l'efficacité maximale d'une pompe à chaleur maintenant la température d'un appartement à 20 °C pour une température extérieure de 0 °C.



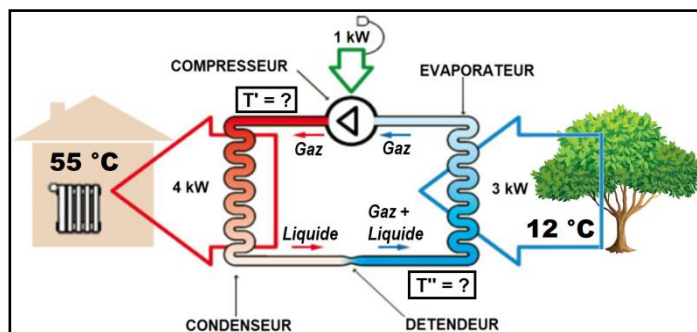
Là encore, cette efficacité supérieure à 100 % ne doit pas vous étonner : le premier principe est toujours respecté. Par exemple, une efficacité de 20 signifie simplement que  $-Q_C = 15 \times W$ , c'est-à-dire qu'en consommant  $W = 1 \text{ J}$  de travail mécanique, on arrive à apporter  $-Q_C = 15 \text{ J}$  d'énergie thermique à la source chaude (sous-entendu, en prélevant  $Q_F = 14 \text{ J}$  d'énergie à la source froide).

## c/ Le cycle d'une pompe à chaleur ditherme

Le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur est strictement le même que celui d'une machine frigorifique. Ces deux machines sont donc constituées d'**éléments en tout point identiques** (compresseur, condenseur, détendeur et évaporateur) et **les échanges thermiques sont de même nature** que ceux détaillés au II-2.c). Le schéma ci-contre illustre une pompe à chaleur alimentant le réseau d'eau chaude d'une maison.

☛ Application 4 :

a) Déterminer l'efficacité de cette pompe à chaleur.



b) Le fluide gagne-t-il ou perd-il de l'énergie quand il circule dans le compresseur ? En déduire une estimation de  $T'$ .

c) Le fluide gagne-t-il ou perd-il de l'énergie quand il circule dans l'évaporateur ? En déduire une estimation de  $T''$ .

## III- Les machines thermiques à écoulement de fluide stationnaire

Dans les paragraphes précédents, nous avons appliqué les principes de la thermodynamique au système constitué de la **totalité du fluide contenu dans le circuit**, correspondant à un **système FERME** (ou qu'on modélise comme un système fermé) au cours d'une transformation correspondant à un cycle complet.

Or, mis à part pour le moteur à explosion où le fluide est emprisonné dans une chambre, **la réalisation du cycle nécessite que le fluide se déplace successivement dans les différents organes** (compresseur, condenseur, détendeur et évaporateur) **de la machine thermique** ; autrement dit, à chaque instant, **le fluide entre et sort de ces éléments** (on parle d'« écoulement » du fluide). **Si on veut étudier le fluide présent dans UN de ces éléments, ce fluide constitue donc un système OUVERT** ! L'énoncé du premier principe de la thermodynamique tel que nous le connaissons va donc devoir être adapté car nous l'avons énoncé dans le cours de **Physique 06** pour des systèmes fermés ...

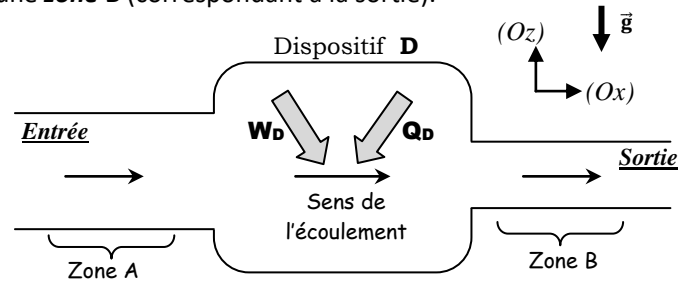


# 1) Le premier principe en écoulement stationnaire

## a/ Description de l'écoulement stationnaire

On considère une canalisation ouverte rigide, dans laquelle circule un fluide. On s'intéresse à la façon dont l'état du fluide est modifié entre une **zone A** (correspondant à l'entrée) et une **zone B** (correspondant à la sortie).

Sur le chemin du fluide, entre ces deux zones, peut se trouver un **dispositif D** (compresseur, condenseur, détenteur, évaporateur) susceptible d'échanger de l'énergie avec le fluide sous forme de **travail  $W_D$**  et/ou de **transfert thermique  $Q_D$**  ; on considèrera dans la suite que les grandeurs  $W_D$  et  $Q_D$  sont les énergies algébriquement reçues par le fluide de la part du **dispositif D**. Ailleurs, les parois seront considérées comme **parfaitement calorifugées**.



On définit l'état local du fluide dans chaque zone **A** et **B** par les pressions  $P_A$  et  $P_B$ , les températures  $T_A$  et  $T_B$ , les vitesses de déplacement du fluide  $\vec{v}_A$  et  $\vec{v}_B$ .

Enfin, on limite l'étude au cas d'un écoulement unidimensionnel suivant une direction  $(Ox)$  dans un champ de pesanteur uniforme dirigé suivant une direction  $(Oz)$ . **L'écoulement sera supposé STATIONNAIRE** :



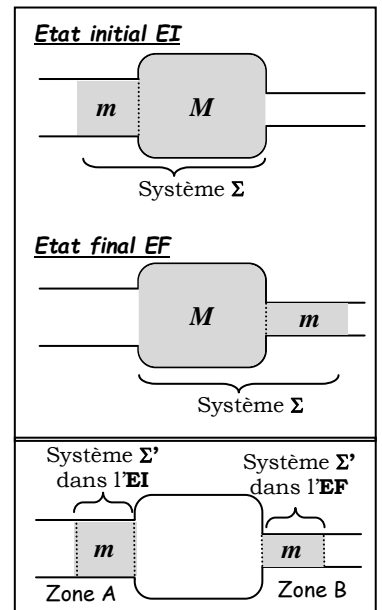
*Cette hypothèse implique donc que nous n'étudierons pas les phases transitoires de démarrage et d'arrêt de la machine thermique.*

## b/ Choix du système étudié

Afin de pouvoir se raccrocher à l'utilisation du premier principe de la thermodynamique établi pour un système fermé, tentons d'isoler par la pensée un tel système, bien que le fluide soit en écoulement ... Il suffit pour cela de « suivre » le fluide au cours de sa progression dans la canalisation.

Considérons par exemple le **système FERME  $\Sigma$**  contenant dans l'état initial EI **{la masse m de fluide situé dans l'entrée de la canalisation + la masse M de fluide contenu dans le dispositif D}**. On laisse alors le fluide s'écouler jusqu'à un état final EF où la totalité du fluide qui était présent dans l'entrée de la canalisation est rentrée dans le dispositif D ; entre EI et EF, une partie du fluide qui était présent dans le dispositif D a été évacué et se trouve donc dans la sortie. L'écoulement étant stationnaire, la masse de fluide se trouvant en sortie dans l'EF est la même que la masse de fluide qui était dans l'entrée dans l'EI.

On peut alors grandement simplifier le problème en remarquant que tout se passe comme si un **système FERME  $\Sigma'$**  contenant la masse m de fluide évoluait entre un état initial où il est dans l'entrée de la canalisation (zone A) et un état final où il est dans la sortie de la canalisation (zone B). L'avantage évident est qu'il n'est alors pas nécessaire de connaître en détail comment ce système évolue dans le dispositif pour établir le bilan énergétique du système.



## c/ Etablissement de la relation

Réalisons un bilan d'énergie sur le système fermé  $\Sigma'$  de masse m, évoluant pendant une durée  $\Delta t$  de l'état initial EI à l'état final EF tels que :

	Pression	Température	Vitesse	Altitude	Volume
Etat initial (EI)	$P_A$	$T_A$	$v_A$	$z_A$	$V_A$
Etat final (EF)	$P_B$	$T_B$	$v_B$	$z_B$	$V_B$

☛ Quel est le seul transfert thermique reçu par  $\Sigma'$  ?

☛ Quels sont les 3 travaux reçus par  $\Sigma'$  ?

- 
-

•  
☛ Expression de  $W_{\text{pression,A}}$  et  $W_{\text{pression,B}}$  en fonction de  $P_A$ ,  $V_A$ ,  $P_B$  et  $V_B$  :

•  $W_{\text{pression,A}} =$

•  $W_{\text{pression,B}} =$

☛ Application du 1<sup>er</sup> principe au système fermé  $\Sigma'$  de masse  $m$  :

☛ Simplifier avec la fonction d'état ENTHALPIE :

☛ Diviser cette relation par la masse  $m$  pour faire apparaître les grandeurs massiques :

☛ Expression simplifiée en négligeant  $\Delta e_C$  et  $\Delta e_P$  :

☛ Expression simplifiée faisant intervenir le débit massique :

Un autre énoncé du 1<sup>er</sup> principe fait intervenir le **débit massique  $D_m$**  du fluide en écoulement, défini comme étant la **masse de fluide traversant une section de canalisation par unité de temps**. Dans notre cas, c'est la masse  $m$  qui traverse la canalisation pendant la durée  $\Delta t$  :



## 2) Exploitation avec un diagramme (P,h)

### a/ Description du diagramme (P,h)

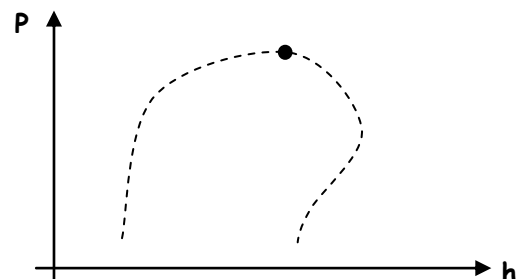
Le **diagramme (P,h)** représente la **pression P** d'un fluide (souvent en échelle logarithmique pour couvrir une large gamme de pressions) en fonction de son **enthalpie massique h**. Aussi appelé « Diagramme de Mollier », il en existe un pour chaque fluide frigorigène ou caloporteur (R22, R134a, ...) ; il est très utile aux machinistes pour choisir le fluide qui circulera dans la machine ou pour choisir et dimensionner les éléments de la machine. A notre niveau, il nous permettra de **visualiser aisément les propriétés d'un fluide et de calculer les échanges énergétiques qui ont lieu tout au long du cycle**.

Un grand nombre de tracés figurent sur ce diagramme ; il faut comprendre la signification de chacun d'eux.

#### # **La courbe de SATURATION** :

Comme sur le diagramme de Clapeyron (P,v), cette courbe « en cloche » délimite trois domaines : celui du **LIQUIDE**, celui de la **VAPEUR** et celui où il y a un **EQUILIBRE LIQUIDE/VAPEUR**.

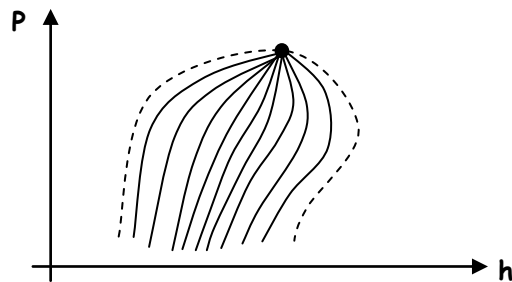
Elle est constituée de deux courbes : la **courbe d'ébullition** et la **courbe de rosée** qui se rejoignent au point critique dont l'interprétation est la même que celle donnée dans le cours de **Physique 05**.



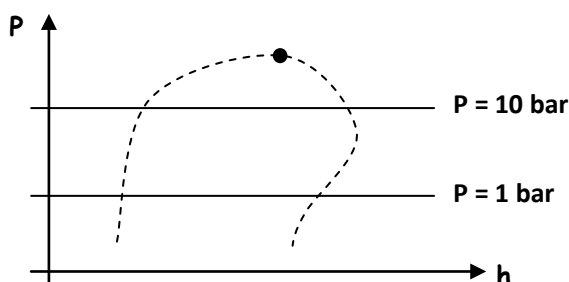
Chacune des autres courbes correspond à une grandeur intensive restant constante

# **Les ISOTITRES** :

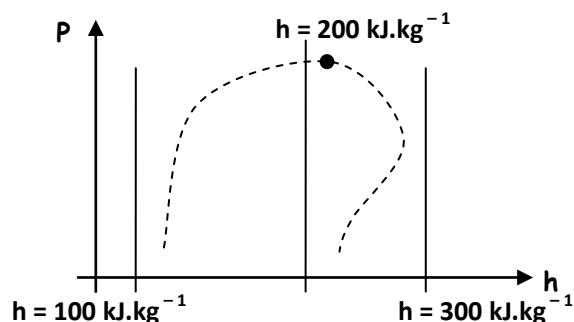
Elles n'existent que sous la courbe de saturation en rayonnant depuis le point critique. Notons que la courbe de saturation est elle-même un isotitre :  $x_v = 0$  pour la courbe d'ébullition et  $x_v = 1$  pour la courbe de rosée.



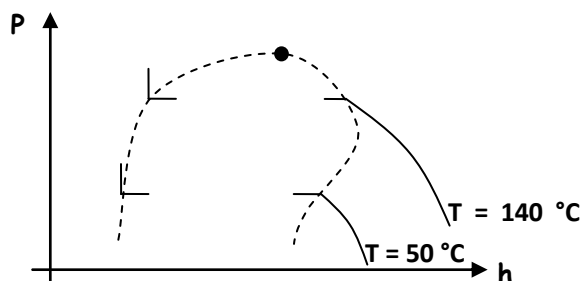
# **Les ISOBARES** :



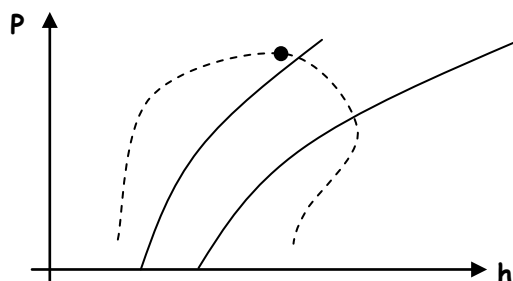
# **Les ISENTHALPES** :



# **Les ISOTHERMES** :



# **Les ADIABATIQUES réversibles** = isentropes



💡 La notion d'entropie sera vue en 2<sup>ème</sup> année ...

## b/ Exemple d'utilisation

➤ **Application 5** : Un frigoriste veut concevoir un congélateur à compression en utilisant comme fluide frigorigène le R134a dont le diagramme (P,h) est reproduit au verso. Il pense faire subir au fluide le cycle suivant :

- **Transformation isobare J → K → A (Evaporateur)** : Dans l'état J, le fluide est sous forme diphasée (70 % de liquide et 30 % de gaz) à la température  $T_J = -30\text{ °C}$  et à la pression de vapeur saturante  $P_J$ . Il est alors complètement vaporisé dans suivant une transformation isobare jusqu'à l'état K de vapeur saturante. Pour éviter d'injecter du liquide dans le compresseur, on réalise une surchauffe de la vapeur à la pression  $P_{\text{sat}}(T_J)$  jusqu'à l'état A, caractérisé par une température  $T_A = -20\text{ °C}$ .
- **Transformation isentropique A → B (Compresseur)** : la vapeur sèche subit une compression adiabatique réversible dans le compresseur parfaitement calorifugé ; il passe ainsi de l'état A à l'état B où la pression est maximale et vaut  $P_B = 10\text{ bar}$ .
- **Transformation isobare B → D → E → G (Condenseur)** : la vapeur est refroidie à pression constante. On passe par l'état D où la 1<sup>ère</sup> goutte de liquide apparaît puis par l'état E où la dernière bulle de gaz se condense. On poursuit alors la transformation isobare en réalisant un sous-refroidissement du liquide obtenu jusqu'à un état G tel que  $T_G = 20\text{ °C}$ .
- **Transformation isenthalpique G → H → J (Détendeur)** : le liquide subit une détente isenthalpique qui le refroidit jusqu'à la température  $T_J$  et la pression  $P_J$  en le vaporisant partiellement ; la première bulle de gaz apparaît en H.

1) Tracer le cycle correspondant au fonctionnement du congélateur dans le diagramme (P, h) du fluide R134a. On y précisera les positions des points J, K, A, B, D, E, G et H.

2) À l'aide du diagramme (P, h) et des données précédentes, déterminer :

- a- la pression de l'évaporateur :  $P_{év} =$
- b- la pression du condenseur :  $P_{cond} =$
- c- le titre en vapeur à l'entrée de l'évaporateur :  $x_v =$
- d- la température à la sortie du compresseur :  $T_{MAX} =$
- e- la température à laquelle la condensation a lieu :  $T_{COND} =$
- f- la valeur du transfert thermique massique  $q_C$  réalisé avec la source chaude :
- g- la valeur du transfert thermique massique  $q_F$  réalisé avec la source froide :
- h- la valeur du travail mécanique massique reçu au cours du cycle :
- i- l'efficacité  $e$  de ce congélateur :
- j- l'efficacité maximale sachant que  $T_F = -18\text{ °C}$  et  $T_C = 20\text{ °C}$  :

