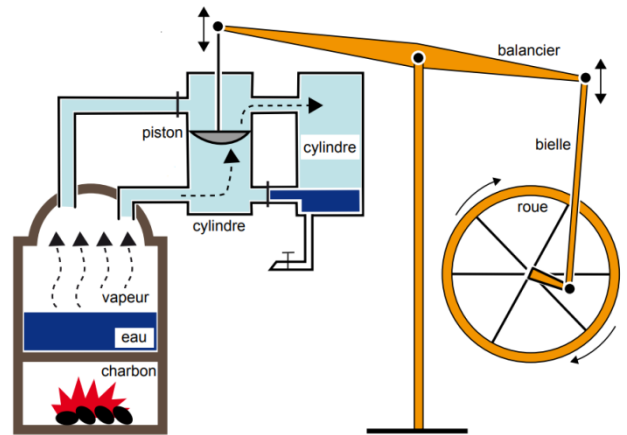


- *Machines thermiques* -

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^{ème} 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

Une machine thermique est un dispositif permettant de transformer :

- # **de l'énergie THERMIQUE en énergie MECANIQUE** : on parle de
- # **de l'énergie MECANIQUE en énergie THERMIQUE** : on parle de

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.

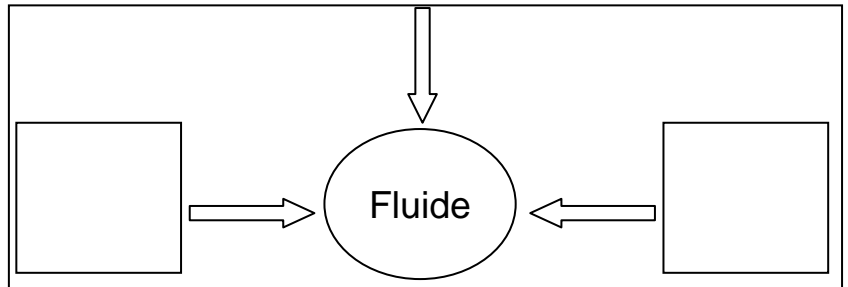
Dans la suite, on s'intéressera aux **machines DITHERMES** :

Une machine thermique est **DITHERME** si, au cours de son cycle, **elle n'échange de l'énergie thermique qu'avec** : une source de température T_c et une source de température $T_f < T_c$.

La représentation ci-contre est la **schématisation conventionnelle d'une machine ditherme**, les grandeurs **W**, **Q_c** et **Q_f** 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.



Au cours d'un cycle :

W pour un **MOTEUR thermique** qui fournit globalement un travail à l'extérieur ;

W pour un **RECEPTEUR thermique** qui reçoit globalement un travail de 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_c** d'une source chaude et un transfert thermique **Q_f** 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 **2nd principe de la thermodynamique** qui sera étudié en 2^{ème} année. Elle fait un lien entre les énergies **Q_c** et **Q_f** **algébriquement reçues** par le fluide par transferts thermiques. Pour une machine ditherme, l'inégalité de Clausius s'écrit :



L'égalité correspond au cas d'un **machine thermique fonctionnant de manière réversible**, ce qui n'est jamais observé. En effet, les transferts thermiques qui ont lieu ne peuvent se faire que dans un sens !

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 :
 - η (appelée *RENDEMENT*) pour les moteurs ;
 - ϵ (appelée *EFFICACITE*) pour les récepteurs.



Vocabulaire : # l'énergie « désirée » est souvent appelée énergie « utile ».
 # l'énergie « à fournir » est souvent appelée énergie « coûteuse ».

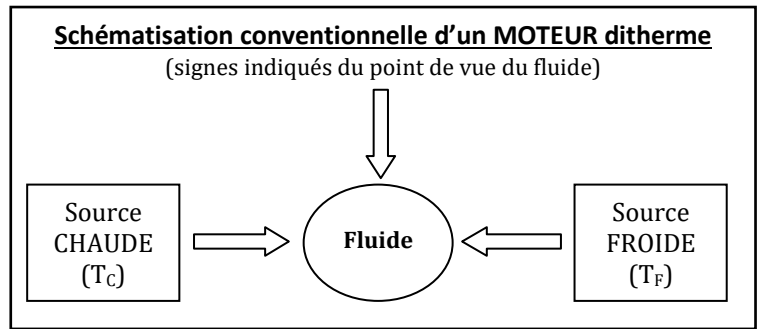
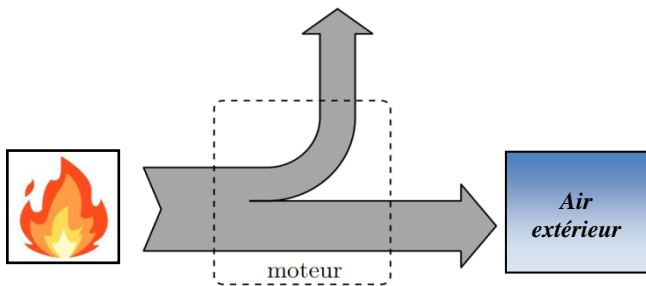
II- Exemples de machines thermiques dithermes

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 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^{er} principe de la thermodynamique :

Par définition, $\eta =$ et $W + Q_C + Q_F = 0 \Leftrightarrow \eta =$ $\Leftrightarrow \eta =$



• Utilisation de l'inégalité de Clausius :

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \Leftrightarrow \frac{Q_F}{T_F} \leq \quad \Leftrightarrow \frac{Q_F}{Q_C} \leq \quad \Leftrightarrow 1 + \frac{Q_F}{Q_C} \leq$$

• Commentaires :

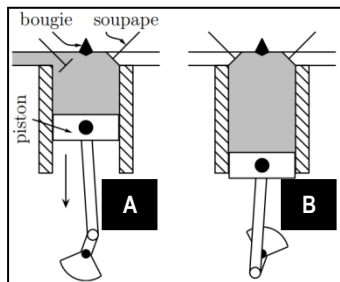
Le **rendement maximal** η_{\max} **d'un moteur ditherme fonctionnant de manière réversible** (appelé **rendement de Carnot**) est Il ne dépend que de T_F et de T_C et il est d'autant plus grand que l'écart entre T_F et T_C est

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

En pratique, les rendements REELS sont compris entre 20 % et 40 %

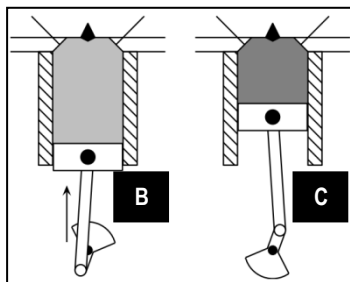
c/ Représentation du cycle dans un diagramme de Watt (P,V) – Exemple du moteur à 4 temps

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.



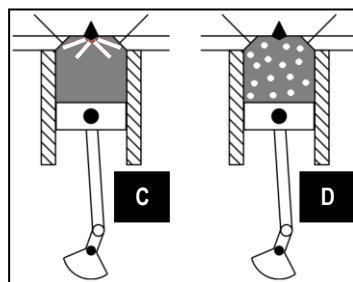
• **1^{er} temps (A → B) :**

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_{atm} . A la fin de ce temps, la soupape de gauche se ferme.



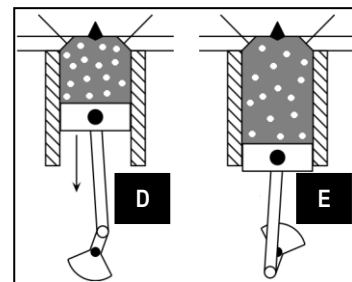
• **2^{ème} temps (B → C) :**

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 .



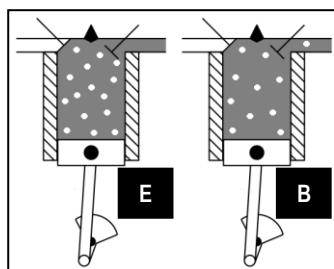
• **Explosion (C → D) :**

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 .



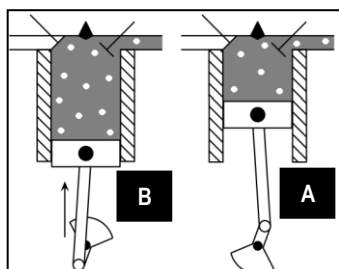
• **3^{ème} temps (D → E) :**

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 .



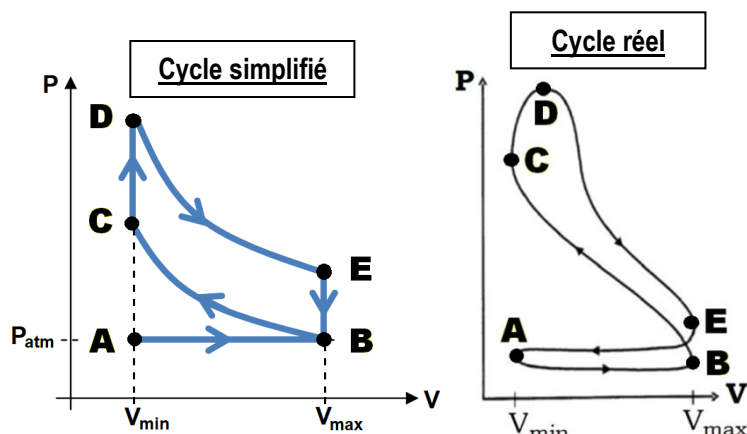
• **4^{ème} temps (E → B) :**

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 ...



Rappel du cours de PHYSIQUE 06 :

Soit un système thermodynamique à la pression P , subissant une **transformation réversible** faisant varier son volume de $V_{initial}$ à V_{final} . **Le travail $W_{EI \rightarrow EF}$ des forces de pression algébriquement reçu** par ce système est donné par la relation :

$$W_{EI \rightarrow EF} = - \int_{V_{initial}}^{V_{final}} P \cdot dV$$

Par conséquent, dans le **diagramme de Watt (P,V)** : $W_{EI \rightarrow EF} < 0$ si $V_{initial} < V_{final}$ et $W_{EI \rightarrow EF} > 0$ si $V_{initial} > V_{final}$

Application 2 :

a) En raisonnant sur le cycle simplifié, indiquer pour chaque étape ci-dessous si le gaz reçoit réellement un travail de l'extérieur ou s'il en fournit réellement à l'extérieur.

Etape $B \rightarrow C$:

Etape $D \rightarrow E$:

Etapes $C \rightarrow D$ et $E \rightarrow B$:

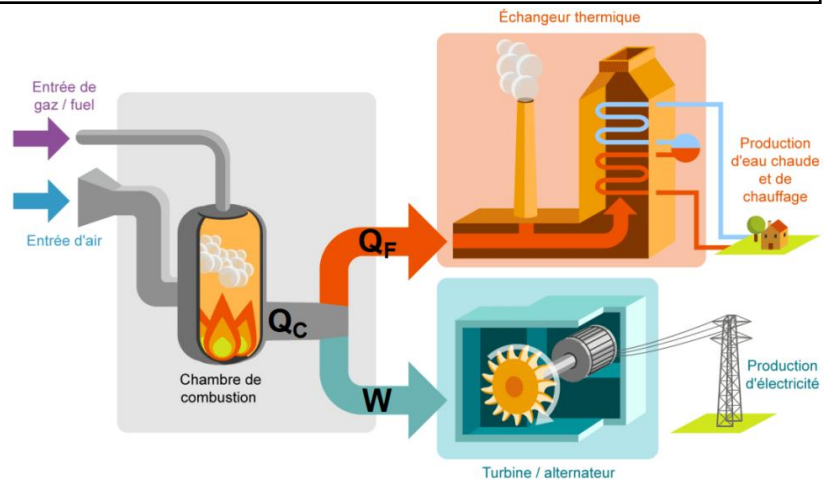
b) Finalement, sur un cycle complet, le moteur reçoit-il ou fournit-il un travail à l'extérieur ?

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.

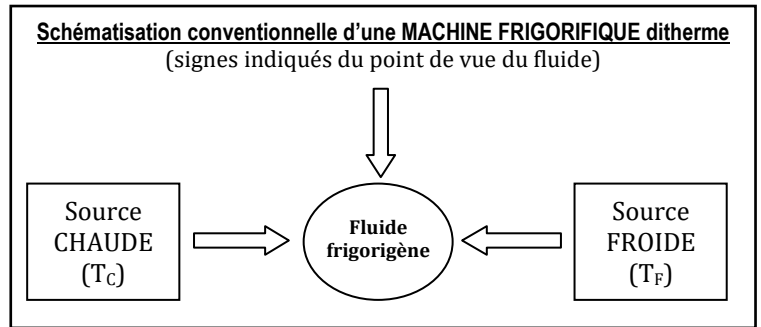
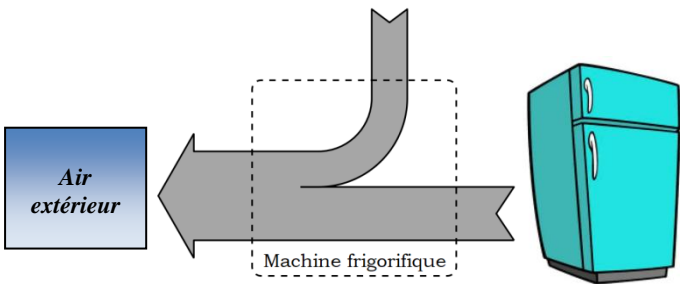


2) Les machines frigorifiques, un premier exemple de récepteur thermique

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 qu'on vienne d'acheter un réfrigérateur : il y règne 20 °C aussi bien dehors que dedans ; si on met en marche le réfrigérateur, la température à l'intérieur de celui-ci atteint 4 °C en quelques minutes et s'y maintient. De l'énergie thermique est donc régulièrement retirée de l'intérieur du réfrigérateur (la zone froide) pour être évacuée à l'extérieur (la zone chaude) : le réfrigérateur a ainsi 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 réfrigérateur 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^{er} principe de la thermodynamique :**

Par définition, $e =$ et $W + Q_C + Q_F = 0 \Leftrightarrow e =$ $e =$

• **Utilisation de l'inégalité de Clausius :**

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \Leftrightarrow \frac{Q_C}{Q_F} \leq \Leftrightarrow \frac{Q_C}{Q_F} + 1 \leq \Leftrightarrow \frac{1}{\frac{Q_C}{Q_F} + 1} \geq$$

$$\Leftrightarrow -\frac{1}{\frac{Q_C}{Q_F} + 1} \leq$$

☛ **Commentaires :**

L'**efficacité maximale** e_{max} **d'une machine frigorifique ditherme fonctionnant de manière réversible** (appelé **efficacité de Carnot**) ne dépend que de T_F et de T_C : elle est **d'autant plus grande que l'écart entre T_F et T_C est**

☛ **Ordres de grandeurs :** Calculer l'efficacité maximale d'un réfrigérateur qui maintiendrait la température interne à $4\text{ }^\circ\text{C}$ pour une température extérieure de $20\text{ }^\circ\text{C}$.

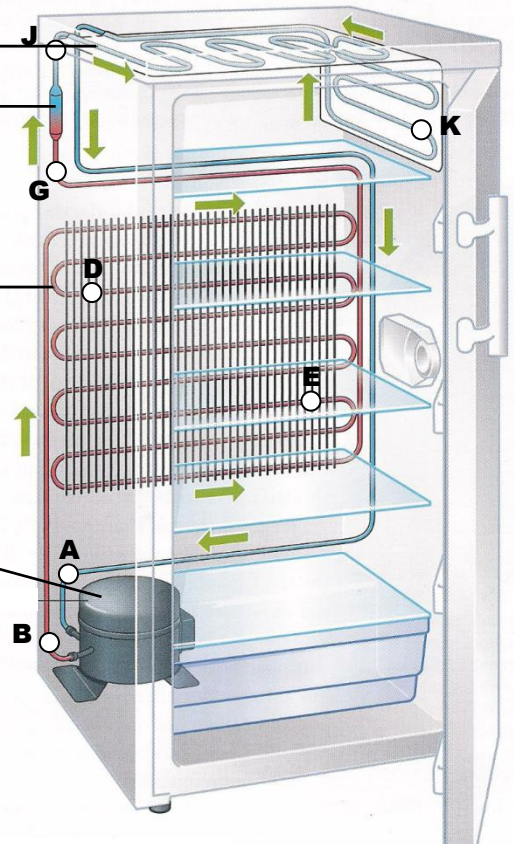
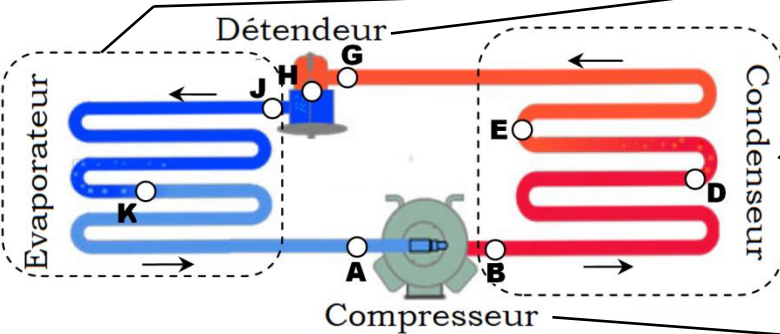
En pratique, les efficacités REELLES sont comprises entre 200 % et 500 %



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 17 signifie que $Q_F = 17 \times W$, c'est-à-dire qu'en consommant $W = 1\text{ J}$ de travail mécanique (pour faire fonctionner le compresseur), on arrive à prélever $Q_F = 17\text{ J}$ d'énergie thermique à la source froide (sous-entendu, en rejetant $-Q_C = 18\text{ J}$ 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 $T_{Froide} = 4\text{ }^\circ\text{C}$ (l'air intérieur du frigo) et $T_{Chaude} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (l'air extérieur au frigo).



Le Condenseur : B → D → E → G

Élément dans lequel a lieu le **transfert thermique Q_C avec la source chaude**

De B à G, le fluide passe de l'état à l'état (on parle de condensation à l'état liquide) avec :

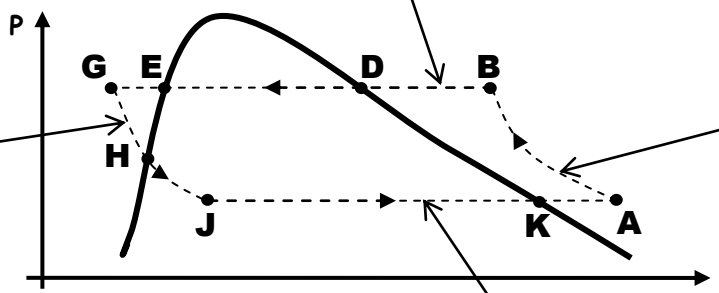
- # la 1^{ère} qui apparaît en D ;
- # la dernière qui apparaît en E ;

Lors de ce changement d'état, le fluide de l'énergie à la source chaude (ici l'air) : donc Q_C

Le Compresseur : A → B

Seule partie du dispositif contenant une pièce mécanique (un piston) exerçant un travail mécanique sur le fluide.

Fluide à l'état
La pression
Le volume
La température



Le Détendeur : G → H → J

De G à J, la pression du fluide (= détente) ce qui le fait passer de l'état à l'état avec apparition de la 1^{ère} en H.

L'évaporateur : J → K → A

Élément dans lequel a lieu le **transfert thermique Q_F avec la source froide**

De J à K, le fluide se : pour cela, il de l'énergie de la part de la source froide (qui en perd, ce qui permet de maintenir froid l'intérieur du réfrigérateur). Donc Q_F

En K disparaît la dernière

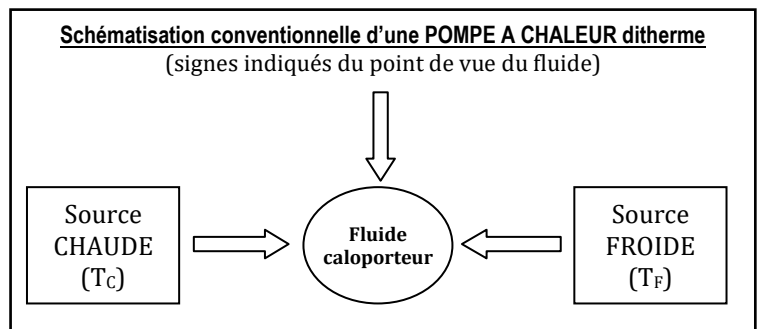
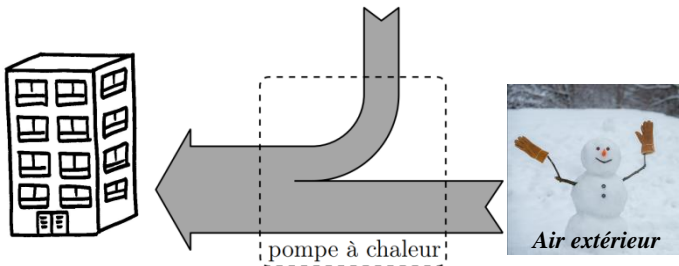
Application 3 : Comment l'allure du cycle précédent confirme-t-il le caractère « récepteur » d'une machine frigorifique ?

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 °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 °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^{er} principe de la thermodynamique :

Par définition, $e =$ et $W + Q_C + Q_F = 0 \Leftrightarrow e =$ $e =$

Utilisation de l'inégalité de Clausius :

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \Leftrightarrow \frac{Q_F}{T_F} \leq -\frac{Q_C}{T_C} \Leftrightarrow \frac{Q_F}{Q_C} \geq -\frac{T_C}{T_F} \Leftrightarrow 1 + \frac{Q_F}{Q_C} \geq \frac{T_C - T_F}{T_F}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}} \leq \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

Commentaires :

L'**efficacité maximale** e_{\max} **d'une pompe à chaleur ditherme fonctionnant de manière réversible** (appelé **efficacité de Carnot**) ne dépend que de T_F et de T_C : elle est **d'autant plus grande que l'écart entre T_F et T_C est**

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.

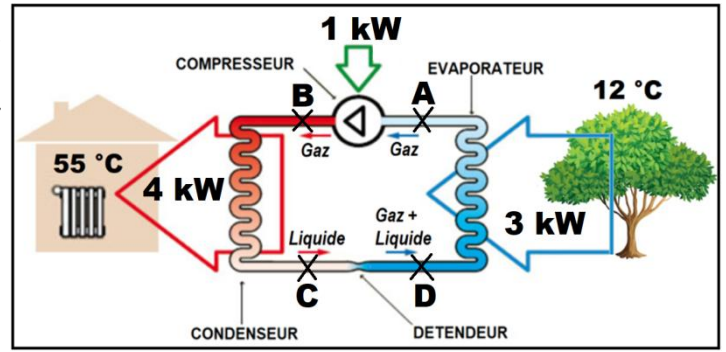
En pratique, les efficacités REELLES sont comprises entre 200 % et 500 %



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

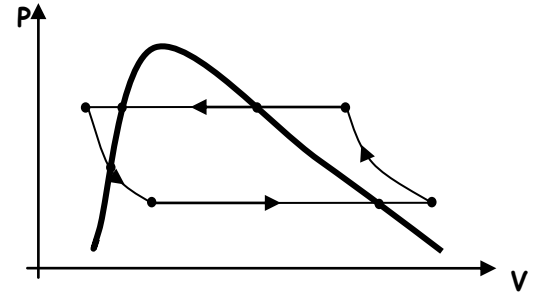
c/ Le cycle d'une pompe à chaleur ditherme

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) Sur le diagramme de Watt ci-contre, placer les points A, B, C et D.

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 présent 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.

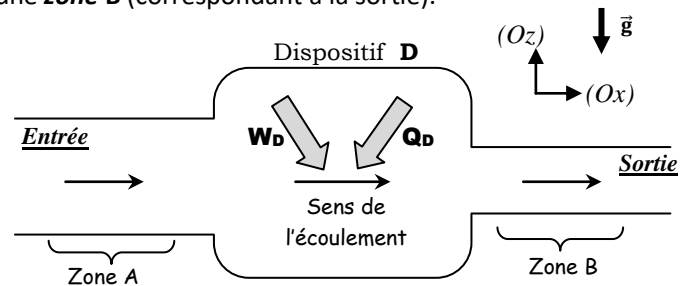
Or, mis à part pour le moteur à explosion où le fluide est emprisonné dans une chambre, **la réalisation du cycle nécessite que le fluide se déplace successivement dans les différents organes de la machine thermique** (compresseur, condenseur, détendeur et évaporateur) ; autrement dit, à chaque instant, **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, détendeur, 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** :

Un écoulement est dit **STATIONNAIRE** si l'état du fluide en un point donné de la canalisation est

 Ici, seront donc supposées constantes.



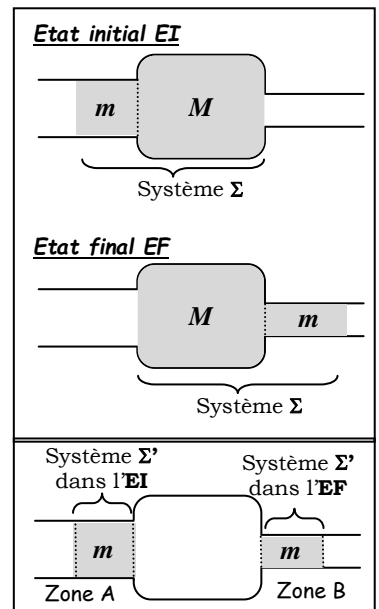
Cette hypothèse implique donc que nous n'étudierons pas les phases transitoires de démarrage et d'arrêt de la machine thermique.

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 Σ** 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 Σ'** 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 Σ' de masse m, évoluant pendant une durée Δt de l'état initial EI à l'état final EF tels que :

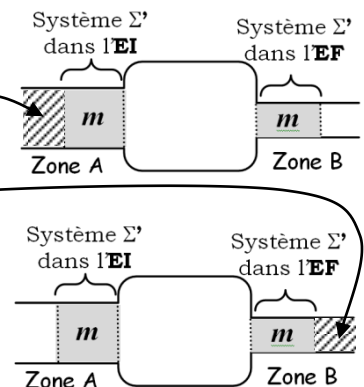
	Pression	Température	Vitesse	Altitude	Volume
Etat initial (EI)	P_A	T_A	v_A	z_A	V_A
Etat final (EF)	P_B	T_B	v_B	z_B	V_B

Quel est le seul transfert thermique algébriquement reçu par Σ' ?

Le système n'échange pas d'énergie avec les canalisations en entrée ni en sortie car celles-ci sont supposées parfaitement calorifugées. Donc le seul transfert thermique algébriquement reçu par le système ne peut avoir lieu qu'au niveau du dispositif D : il s'agit donc du **transfert thermique Q_D** .

Quels sont les 3 travaux algébriquement recus par Σ' ?

- Travail W_D échangé avec le dispositif D ;
- Travail $W_{\text{pression,A}}$ des forces de pression exercées par le fluide situé à gauche du système, dans la zone A du dispositif. Au cours de la transformation, le système situé dans cette zone évoluera d'un volume V_A à un volume nul (à la pression P_A constante).
- Travail $W_{\text{pression,B}}$ des forces de pression exercées par le fluide situé à droite du système, dans la zone B du dispositif. Au cours de la transformation, le système situé dans cette zone évoluera d'un volume nul à un volume V_B (à la pression P_B constante).



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

Rappel du cours de PHYSIQUE 06 : $W_{\text{pression}} = - \int_{V_{\text{initial}}}^{V_{\text{final}}} P_{\text{ext}} \cdot dV$

- $W_{\text{pression,A}} = - \int_{V_A}^0 P_A \cdot dV = -P_A(0 - V_A)$ soit $W_{\text{pression,A}} = P_A \cdot V_A$
- $W_{\text{pression,B}} = - \int_0^{V_B} P_B \cdot dV = -P_B(V_B - 0)$ soit $W_{\text{pression,B}} = -P_B \cdot V_B$

Application du 1^{er} principe au système fermé Σ' de masse m :

$$\Delta U + \Delta E_m = W_{\text{pression,A}} + W_{\text{pression,B}} + W_D + Q_D$$

(ΔU = Variation d'énergie interne, ΔE_m = Variation d'Energie mécanique macroscopique)

$$U_B - U_A + (E_{cB} - E_{cA}) + (E_{pB} - E_{pA}) = P_A V_A - P_B V_B + W_D + Q_D$$

(E_c = énergie cinétique macroscopique, E_p = Energie potentielle de pesanteur macroscopique)

Simplifier avec la fonction d'état ENTHALPIE :

$$\underbrace{U_B + P_B V_B}_{H_B} - \underbrace{(U_A + P_A V_A)}_{H_A} + (E_{cB} - E_{cA}) + (E_{pB} - E_{pA}) = W_D + Q_D$$

(Rappel : $H = U + PV$)

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

$$(h_B - h_A) + (e_{cB} - e_{cA}) + (e_{pB} - e_{pA}) = w_D + q_D$$

Variation d'enthalpie massique du système entre A et B (en $J \cdot kg^{-1}$)

Variation d'énergie cinétique massique du système entre A et B (en $J \cdot kg^{-1}$)

$$\Delta h_{(A \rightarrow B)} + \Delta e_{c(A \rightarrow B)} + \Delta e_{p(A \rightarrow B)} = w_D + q_D$$

Premier principe en écoulement stationnaire

Variation d'énergie potentielle de pesanteur massique du système entre A et B (en $J \cdot kg^{-1}$)

Travail massique algébriquement reçu par le système de la part du dispositif D (en $J \cdot kg^{-1}$)

Transfert thermique massique algébriquement reçu par le système de la part du dispositif D (en $J \cdot kg^{-1}$)

• **Expression simplifiée du 1^{er} principe en écoulem^{nt} stationnaire négligeant $\Delta e_{C(A \rightarrow B)}$ et $\Delta e_{P(A \rightarrow B)}$:**

$$\Delta h_{(A \rightarrow B)} = w_D + q_D$$

• **Autre expression simplifiée du 1^{er} principe en écoulem^{nt} stationnaire négligeant $\Delta e_{C(A \rightarrow B)}$ et $\Delta e_{P(A \rightarrow B)}$ et faisant intervenir les puissances :**

Pour transformer les énergies massiques (en $J.kg^{-1}$) en puissances (en $W = J.s^{-1}$), il faut multiplier la relation précédente par une grandeur dont l'unité est le « $kg.s^{-1}$ ». Cette grandeur est le **débit massique D_m** du fluide en écoulement, défini comme 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 Δt .

$$D_m = \frac{m}{\Delta t}$$

kg
kg.s⁻¹ s

La relation précédente devient alors :

$$D_m \times \Delta h_{(A \rightarrow B)} = D_m \times w_D + D_m \times q_D$$

c'est-à-dire :

$$D_m \times \Delta h_{(A \rightarrow B)} = P_{\text{mécanique,D}} + P_{\text{thermique,D}}$$

Puissance mécanique algébriquement reçue par le fluide de la part des parties mobiles de D (en W) → **concerne exclusivement le COMPRESSEUR**

Puissance thermique algébriquement reçue par le fluide lors de sa traversée de D (en W)

2) Exploitation avec un diagramme (P,h)

a/ Description du diagramme (P,h)

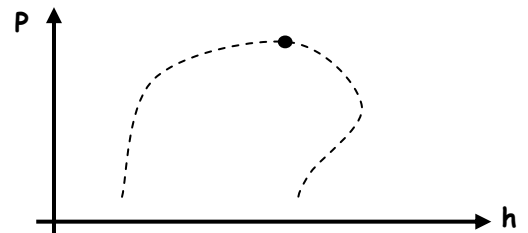
Le **diagramme (P,h)** représente la **pression P** d'un fluide (souvent en échelle logarithmique pour couvrir une large gamme de pressions) en fonction de son **enthalpie massique h**. Aussi appelé « Diagramme de Mollier », il en existe un pour chaque fluide frigorigène ou caloporteur (R22, R134a, ...); 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 :

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**.

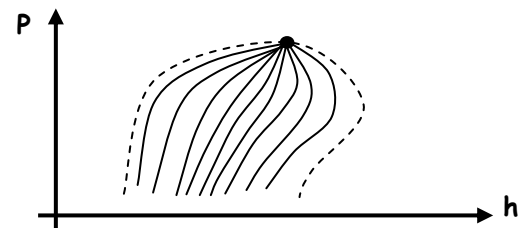
Elle est constituée de deux courbes : la **courbe d'ébullition** et la **courbe de rosée** qui se rejoignent au point critique dont l'interprétation est la même que celle donnée dans le cours de **Physique 05**.



Les :

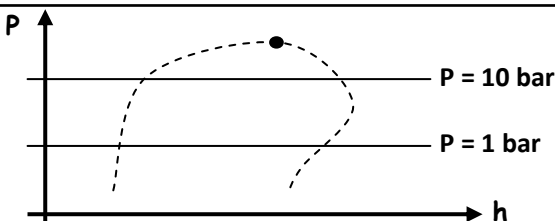
Courbes où le **titre massique en vapeur (w_v ou x_v)** est **CONSTANT**.

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.



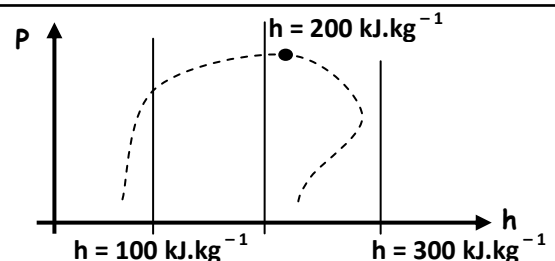
Les :

Horizontales où la **pression P** est **CONSTANTE**.



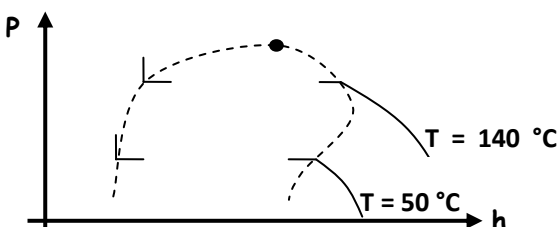
Les :

Verticales où l'**enthalpie massique h** est **CONSTANTE**.



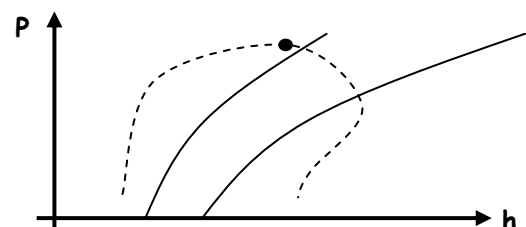
Les :

Courbes où la **température T** est **CONSTANTE**.



Les ADIABATIQUES réversibles = isentropes

Courbes où **Q = 0** (elles ont une pente positive)

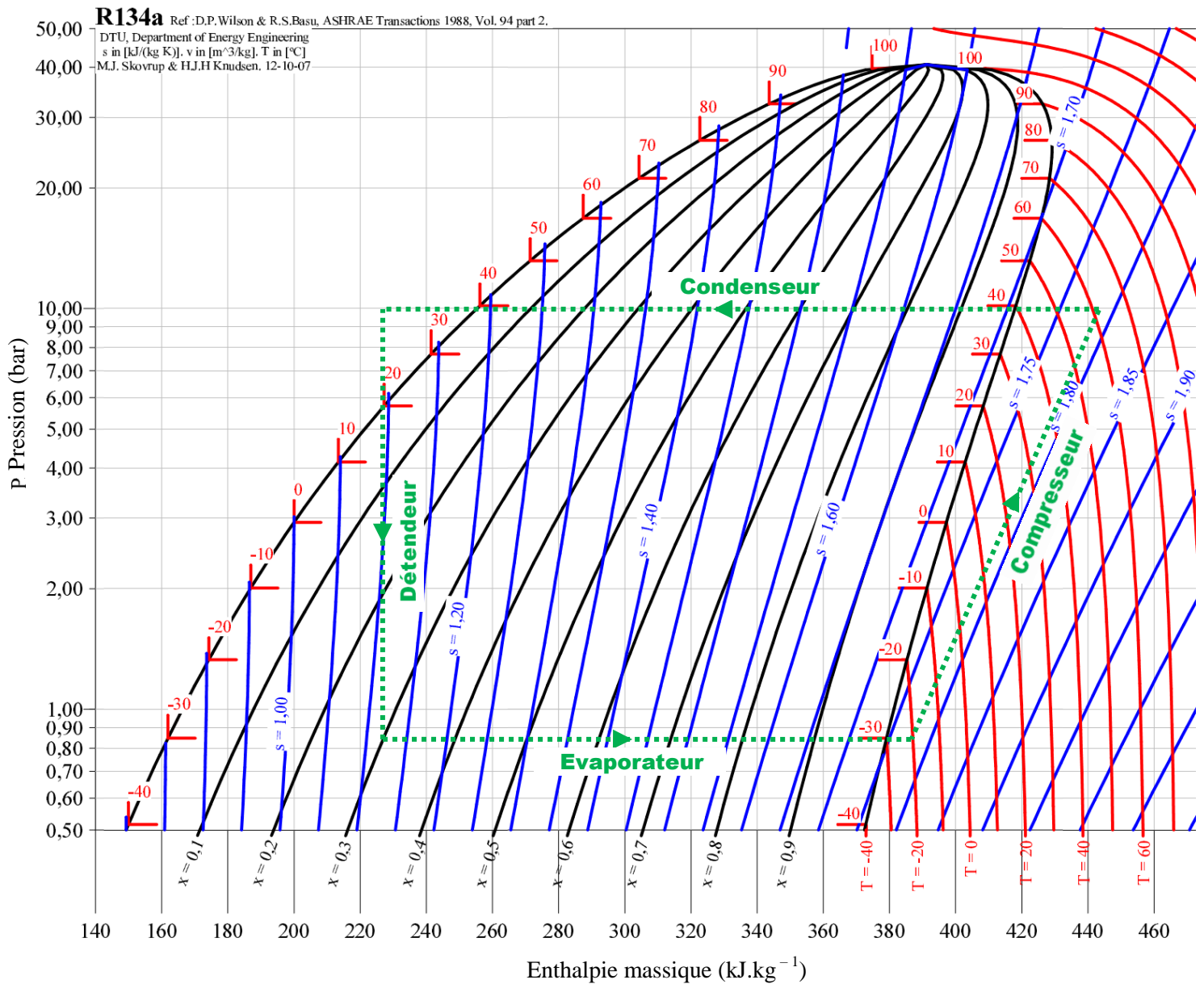


b/ Exemple d'utilisation

☞ **Application 5** : Un frigoriste a conçu un congélateur à compression en utilisant comme fluide frigorigène le R134a dont le diagramme (P,h) est reproduit au verso. Il fait 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 $T_J = -30^\circ\text{C}$ et à la pression de vapeur saturante P_J . Il est alors complètement vaporisé 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 $T_A = -20^\circ\text{C}$.
- **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^{ère} 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 $T_G = 20^\circ\text{C}$.
- **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) Le cycle correspondant au fonctionnement de ce congélateur est tracé en pointillés verts dans le diagramme (P, h) ci-dessous. Y indiquer la position des points J, K, A, B, D, E, G et H.



2) À l'aide du diagramme (P, h) et des données précédentes et des enthalpies massiques des points B, G, A et J, déterminer :

	Point G	Point B	Point A	Point J
Enthalpie massique (en kJ.kg ⁻¹)	$h_G = 227\text{ kJ.kg}^{-1}$	$h_B = 445\text{ kJ.kg}^{-1}$	$h_A = 387\text{ kJ.kg}^{-1}$	$h_J = 227\text{ kJ.kg}^{-1}$

(Valeurs lues sur le graphique)

a- la pression dans l'évaporateur : $P_{\text{év}} =$

b- la pression dans le condenseur : $P_{\text{cond}} =$

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 :

- Ce transfert thermique a lieu dans le, sur le trajet \rightarrow
- L'application du **1^{er} principe pour un fluide en écoulement stationnaire** entre et conduit à la relation :
.....
- Or, il n'y a aucune pièce mobile dans le condenseur, donc
- Donc $q_{condenseur} = q_c =$

g- la valeur du transfert thermique massique q_f réalisé avec la source froide :

- Ce transfert thermique a lieu dans l', sur le trajet \rightarrow
- L'application du **1^{er} principe pour un fluide en écoulement stationnaire** entre et conduit à la relation :
.....
- Or, il n'y a aucune pièce mobile dans l'évaporateur, donc
- Donc $q_{évaporateur} = q_f =$

h- la valeur du travail mécanique massique reçu au cours du cycle :

- Ce travail mécanique n'a lieu que dans le, sur le trajet \rightarrow
- L'application du **1^{er} principe pour un fluide en écoulement stationnaire** entre et conduit à la relation :
.....
- Or, la compression est **adiabatique**, donc
- Donc $w_{compresseur} =$

i- l'efficacité e de ce congélateur :

j- l'efficacité maximale e_{max} sachant que $T_F = -18\text{ °C}$ et $T_C = 20\text{ °C}$: