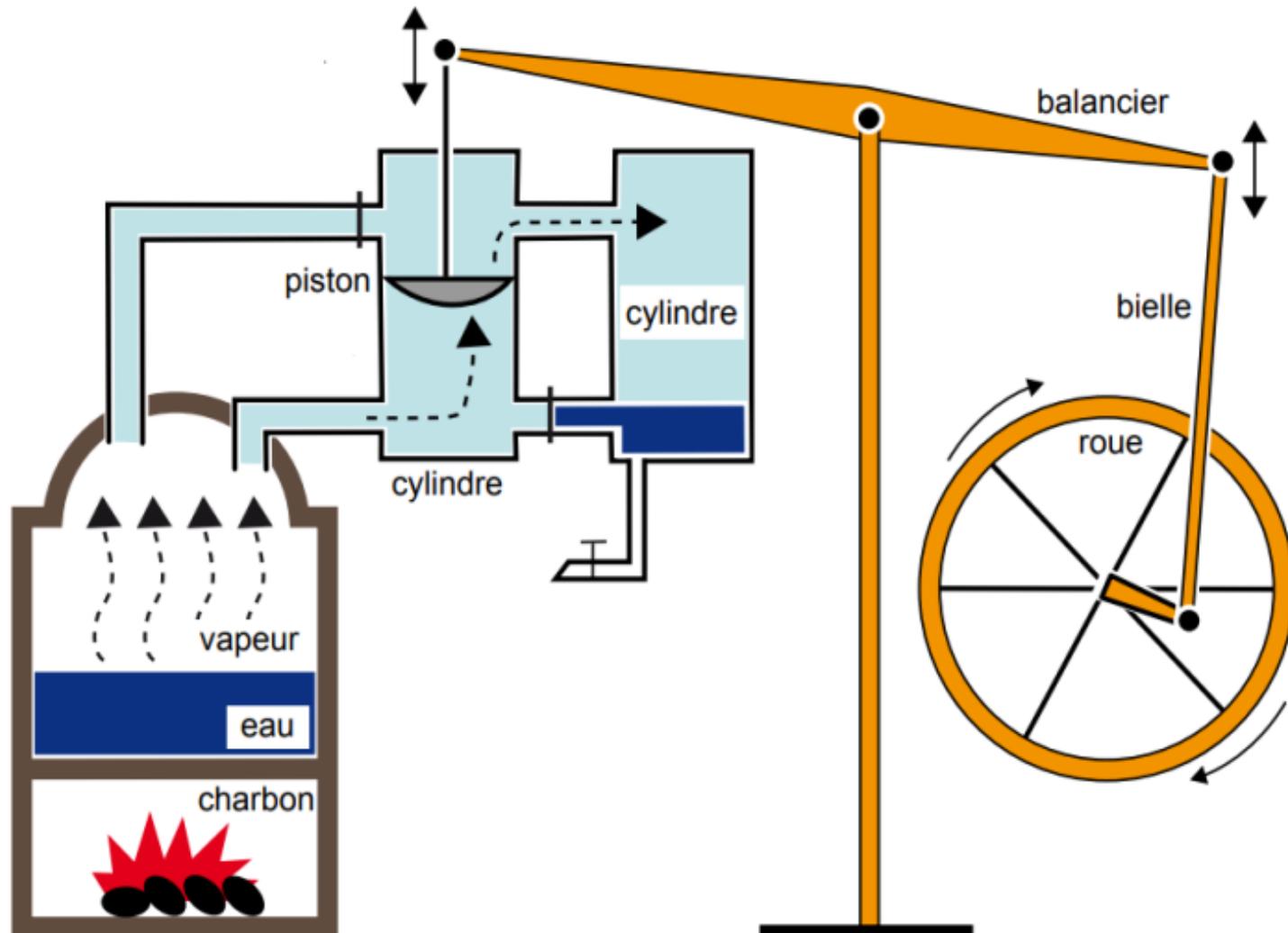


- Machines thermiques -

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>- Application du premier principe de la thermodynamique et de l'inégalité de Clausius aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, limitations.</p>	<p>- Décrire le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.</p> <p>- Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme.</p> <p>- Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.</p> <p>- Citer quelques ordres de grandeur des rendements ou efficacités des machines thermiques réelles actuelles.</p> <p>- Expliquer le principe de la cogénération.</p>
<p>- 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.</p>	<p>- 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.</p>
<p>- Diagramme (P,h) de fluides réels.</p>	<p>- Exploiter un diagramme donnant la pression P (ou $\log P$) en fonction de l'enthalpie massique h d'un fluide réel pour l'étude de machines thermodynamiques réelles.</p>

- *Machines thermiques* -

WATT : La machine à vapeur





I- Généralités sur les machines thermiques

1) Définition

Une machine thermique est un dispositif permettant de *transformer* de :

- *l'énergie thermique en énergie mécanique* : on parle de **MOTEUR thermique** ;
- *l'énergie mécanique en énergie thermique* : on parle de **RECEPTEUR thermique** ;

MOTEUR



RECEPTEUR



RECEPTEUR



2) Description du système

FLUIDE gazeux et/ou liquide qui circule dans une **ENCEINTE FERMEE**

CYCLES de
transformations

ECHANGES ENERGETIQUES avec 2
catégories de sources extérieures

2) Description du système

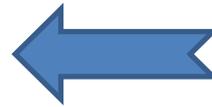
FLUIDE gazeux et/ou liquide qui circule dans une **ENCEINTE FERMEE**

CYCLES de transformations

ECHANGES ENERGETIQUES avec 2 catégories de sources extérieures

TRAVAIL W

Sources
mécaniques



TRANSFERTS THERMIQUES Q

Sources de
chaleur



(Thermostats)



Rappel : 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** :

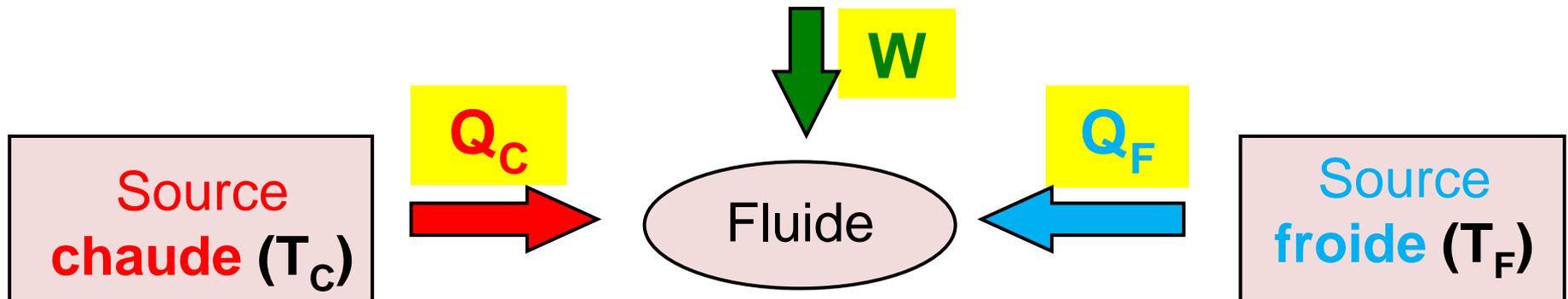
Une machine thermique est **DITHERME** si, au cours de son cycle, **elle n'échange de l'énergie thermique qu'avec 2 sources de chaleur** : une **source chaude** de température T_C et une **source froide** de température $T_F < T_C$.

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 2 sources de chaleur** : une **source chaude** de température T_C et une **source froide** de température $T_F < T_C$.

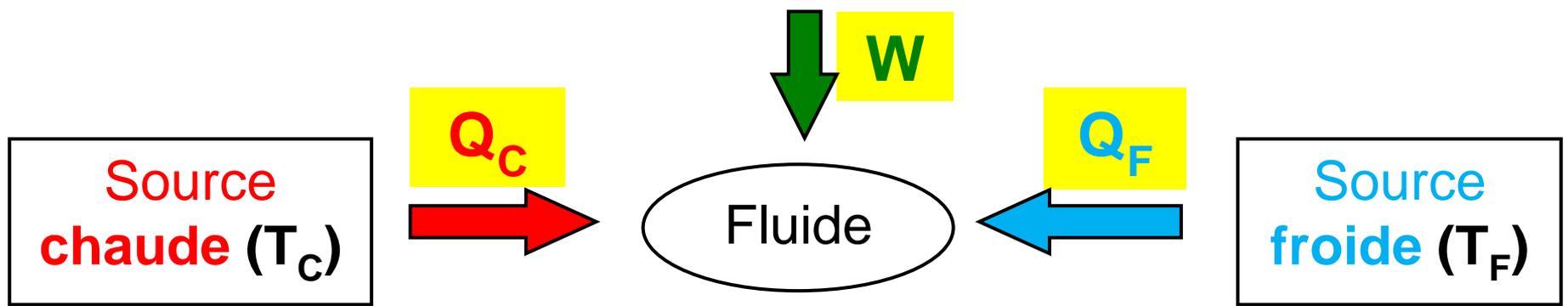
La représentation ci-contre est la ***schématisation conventionnelle d'une machine ditherme***, les grandeurs W , Q_C et Q_F étant des **grandeurs algébriquement reçues** par le système :

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



Au cours d'un cycle :

$W < 0$ pour un **moteur thermique** qui fournit globalement un travail au milieu extérieur



Au cours d'un cycle :

$W < 0$ pour un moteur thermique qui fournit globalement un travail au milieu extérieur

$W > 0$ pour un récepteur thermique qui reçoit globalement un travail de l'extérieur.

✂ Application 1 : Compléter le tableau 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	Fluide réfrigérant	Air extérieur	Air intérieur
MOTEUR DE VOITURE	Mélange « Air / Essence »	Fluide « brûlé »	Air extérieur

🔗 Application 1 : Compléter le tableau 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	Fluide réfrigérant	Air extérieur	Air intérieur
MOTEUR DE VOITURE	Mélange « Air / Essence »	Fluide « brûlé »	Air extérieur

3) Relations entre les énergies échangées

a/ Utilisation du 1^{er} principe de la thermodynamique

Lien entre W , Q_C , Q_F et ΔU

D'après le 1^{er} principe appliqué à un système fermé macroscopiquement au repos : $\Delta U = W + Q_C + Q_F$

Pour un cycle, $U_{\text{INITIAL}} = U_{\text{FINAL}}$, donc $\Delta U = U_{\text{FINAL}} - U_{\text{INITIAL}} = 0$.

$$W + Q_C + Q_F = 0$$

b/ Inégalité de Clausius

Lien entre Q_C , Q_F , T_C et T_F

a/ Utilisation du 1^{er} principe de la thermodynamique

Lien entre W , Q_C , Q_F et ΔU

D'après le 1^{er} principe appliqué à un système fermé macroscopiquement au repos : $\Delta U = W + Q_C + Q_F$

Pour un cycle, $U_{\text{INITIAL}} = U_{\text{FINAL}}$, donc $\Delta U = U_{\text{FINAL}} - U_{\text{INITIAL}} = 0$.

$W + Q_C + Q_F = 0$

b/ Inégalité de Clausius

Lien entre Q_C , Q_F , T_C et T_F

L'EGALITE correspond au cas idéal d'une 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 ...

en **Joule** (J)

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

en **Kelvin** (K)

c/ Rendement ou efficacité d'une machine ditherme



Lien entre Q_C , Q_F et W

b/ Inégalité de Clausius

Lien entre Q_C , Q_F , T_C et T_F

en **Joule (J)**

L'EGALITE correspond au cas idéal d'une 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 ...

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

en **Kelvin (K)**

c/ Rendement ou efficacité d'une machine ditherme

↓ **η**

pour les **MOTEURS**

↓ **e**

pour les **RECEPTEURS**

Lien entre Q_C , Q_F et W

$$\eta \text{ ou } e = \frac{\text{Energie désirée}}{\text{Energie à fournir}}$$

en **Joule (J)**

Sans unité (pourcentage)



Vocabulaire : # Energie « **désirée** » = Energie « **utile** »
Energie « **à fournir** » = Energie « **coûteuse** »

c/ Rendement ou efficacité d'une machine ditherme

Sans unité
(pourcentage)

$$\eta \text{ ou } e = \frac{\text{Energie désirée}}{\text{Energie à fournir}} \quad \text{en Joule (J)}$$



Vocabulaire : # Energie « *désirée* » = Energie « *utile* »
Energie « *à fournir* » = Energie « *coûteuse* »

II- Exemples de machines thermiques dithermes

1) Les moteurs thermiques

a/ Principe de fonctionnement

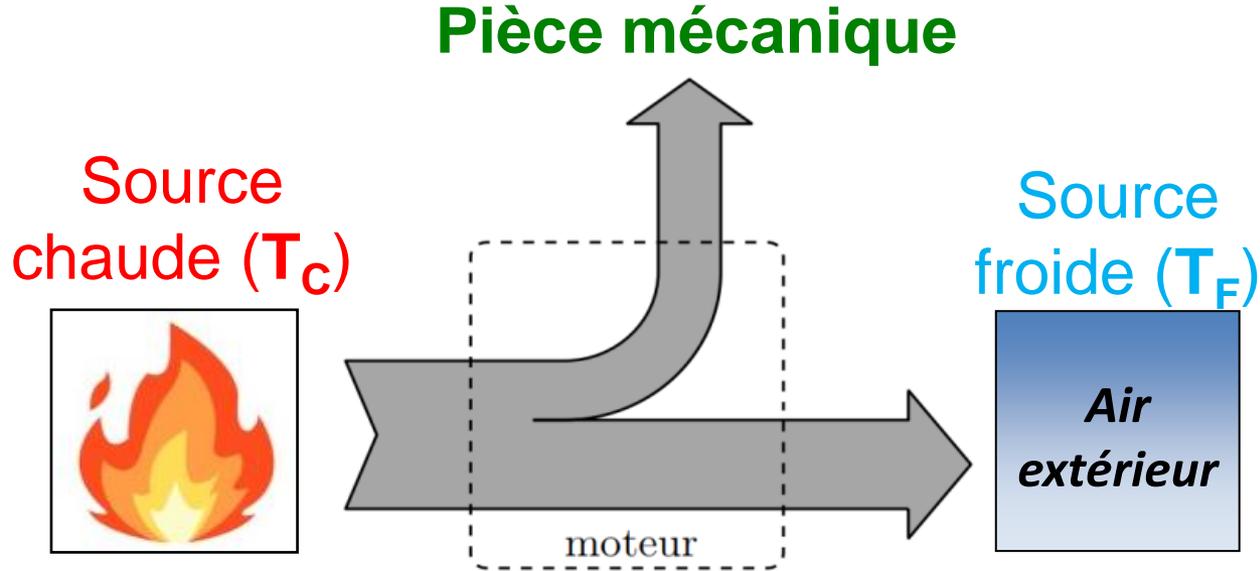
Transfert thermique NATUREL **de la source chaude**
(combustion air/essence) **vers la source froide** (l'air extérieur)



Mouvement d'une pièce mécanique

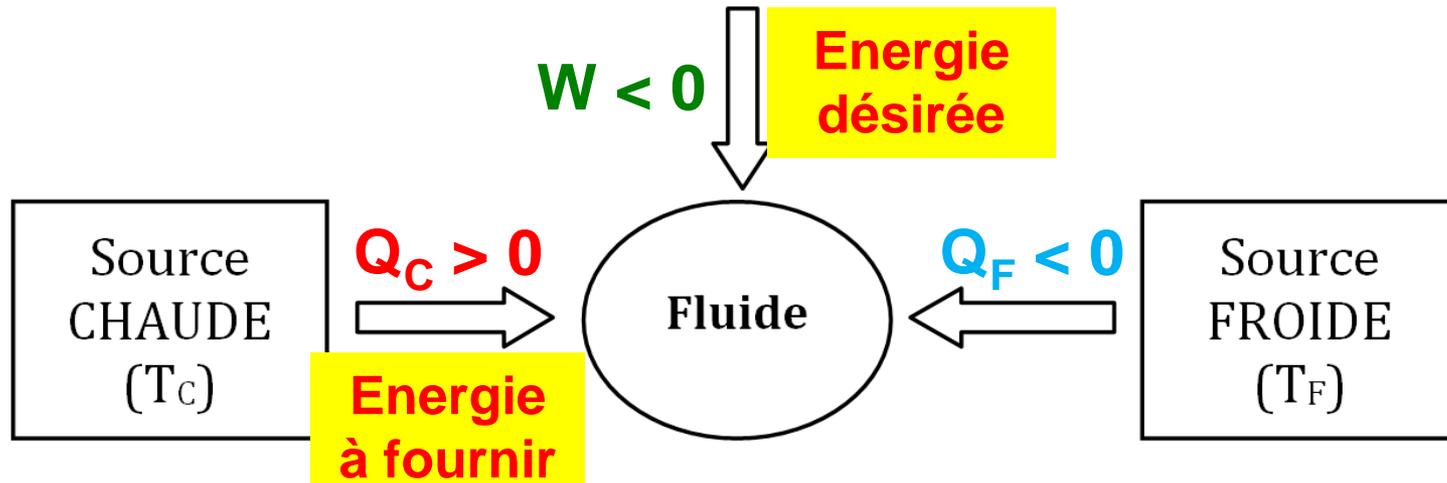
1) Les moteurs thermiques

a/ Principe de fonctionnement



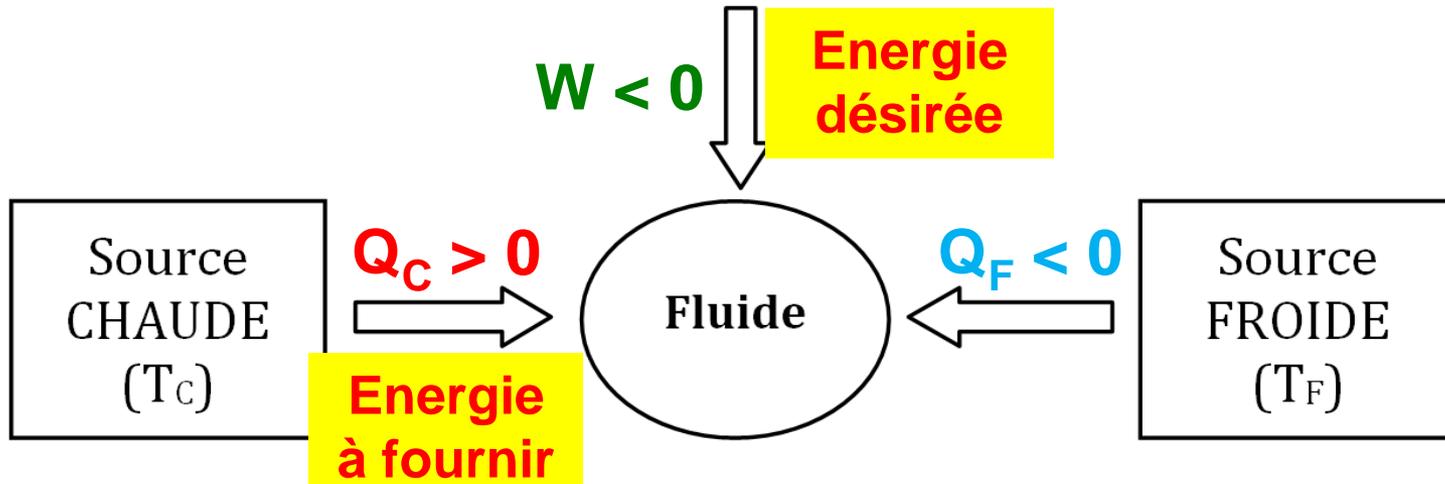
Schématisation conventionnelle d'un MOTEUR ditherme

(signes indiqués du point de vue du fluide)



Schématisation conventionnelle d'un MOTEUR ditherme

(signes indiqués du point de vue du fluide)



Autres moteurs thermiques dont le but n'est pas la production d'un travail mécanique mais d'un TRAVAIL ELECTRIQUE.

b/ Rendement d'un moteur ditherme

☛ Utilisation du 1^{er} principe de la thermodynamique :

$$\eta = \frac{-W}{Q_C} \quad \Leftrightarrow \quad \eta = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} \quad \Leftrightarrow \quad \eta = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

$W + Q_C + Q_F = 0$

☛ Utilisation de l'inégalité de Clausius :

• Utilisation du 1^{er} principe de la thermodynamique :

$$\eta = \frac{-W}{Q_C} \quad \Leftrightarrow \quad \eta = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} \quad \Leftrightarrow \quad \eta = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

$W + Q_C + Q_F = 0$

• Utilisation de l'inégalité de Clausius :

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{Q_F}{T_F} \leq -\frac{Q_C}{T_C} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{Q_F}{Q_C} \leq -\frac{T_F}{T_C} \quad (Q_C > 0)$$

$$\Leftrightarrow \quad \eta \leq 1 - \underbrace{\frac{T_F}{T_C}}_{\eta_{MAX}} < 1$$

• Commentaires :

Le rendement maximal η_{max} d'un moteur ditherme fonctionnant de manière réversible (appelé *rendement de Carnot*) est **strictement inférieur à 100 %**. Il ne dépend que de T_F et de T_C et il est **d'autant plus grand que l'écart entre T_C et T_F est grand**.

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

$$\eta_{MAX} = 1 - \frac{293}{773} \quad \eta_{MAX} = 0,62 \text{ (62 \%)}$$

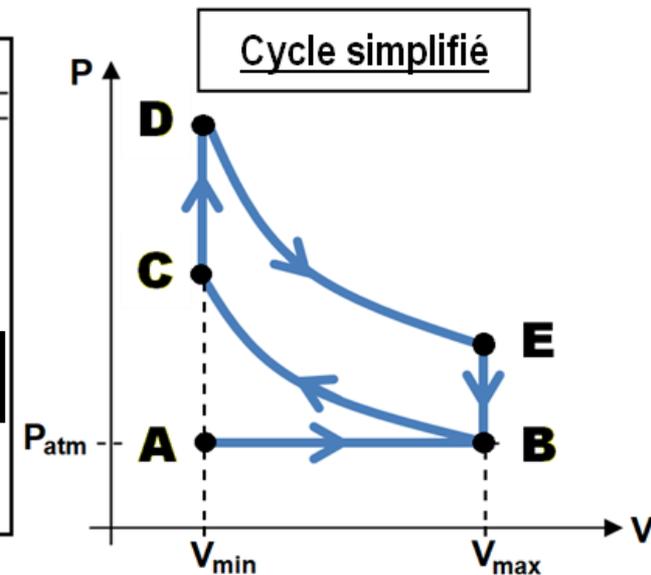
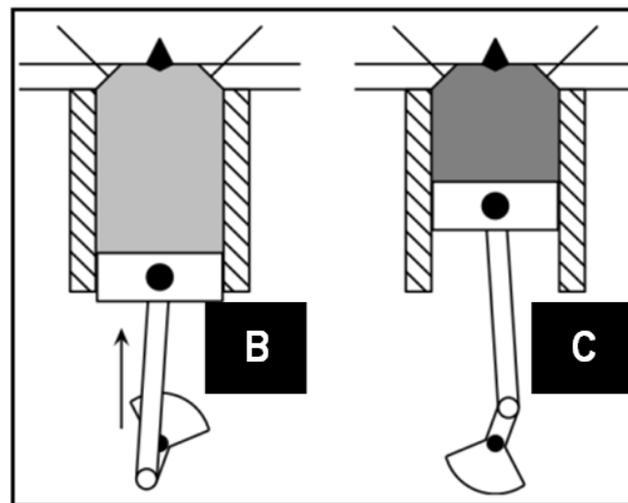
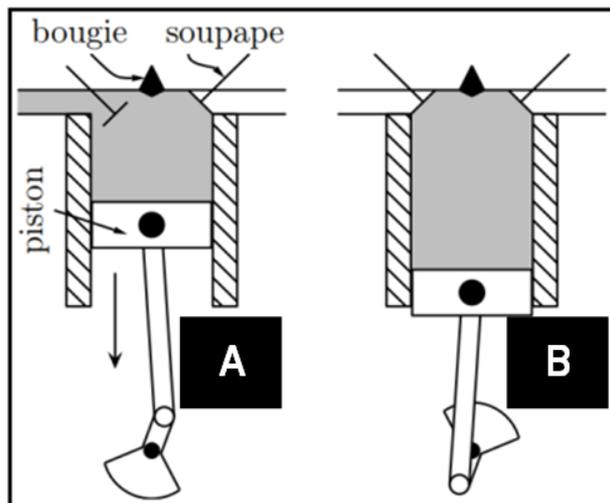
☛ Commentaires : Le rendement maximal η_{\max} d'un moteur ditherme fonctionnant de manière réversible (appelé *rendement de Carnot*) est **strictement inférieur à 100 %**. Il ne dépend que de T_F et de T_C et il est **d'autant plus grand que l'écart entre T_C et T_F est grand**.

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

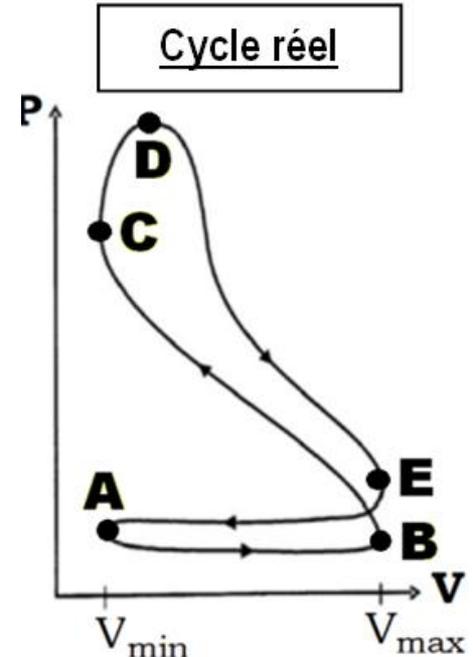
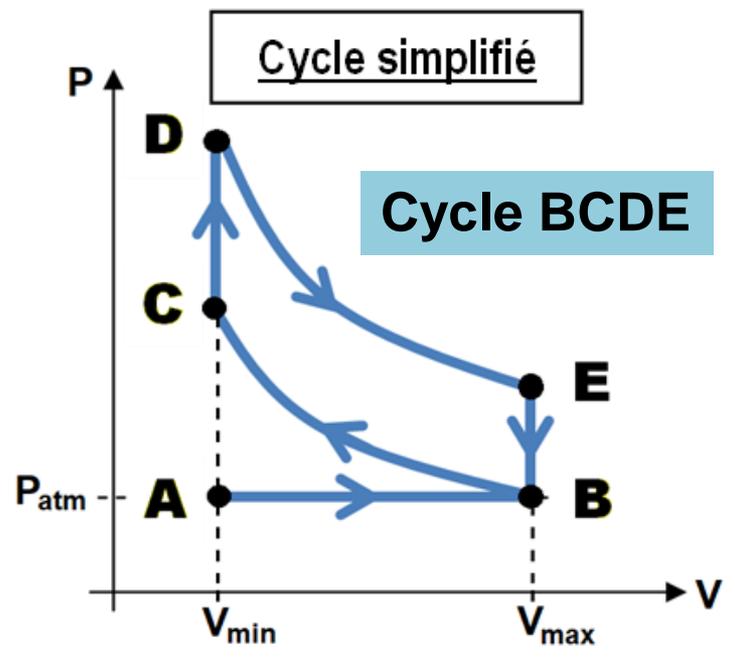
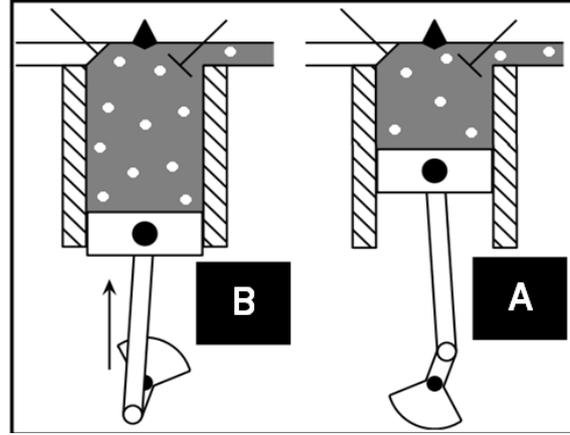
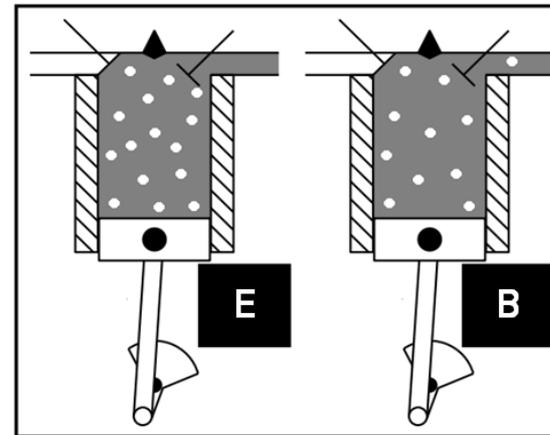
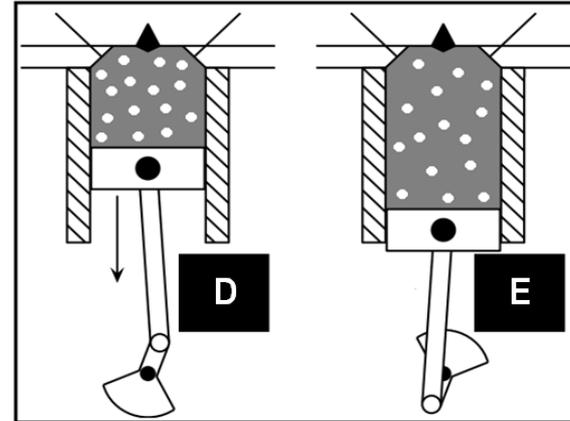
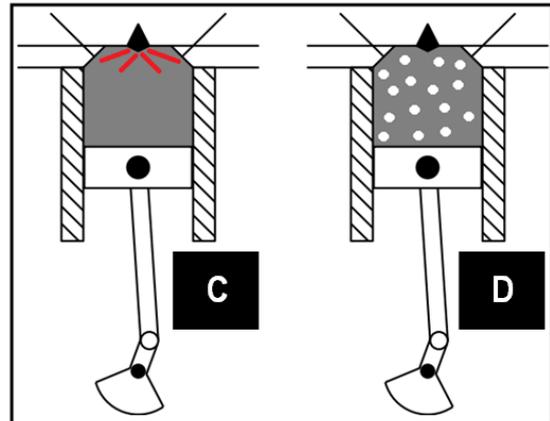
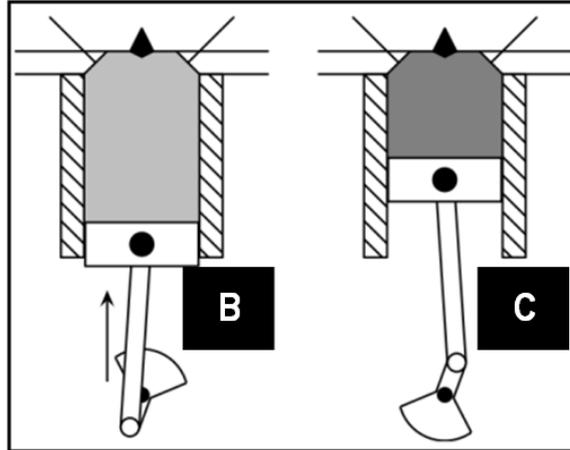
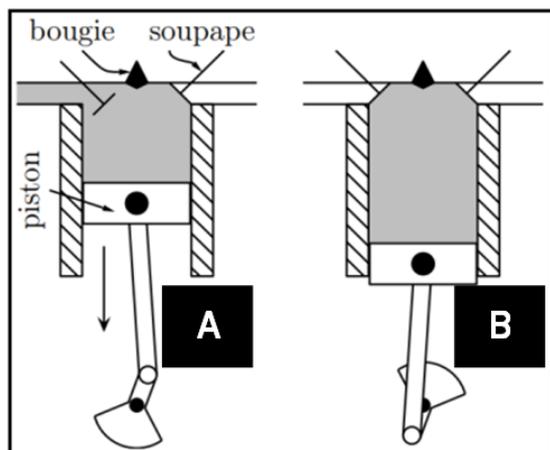
$$\eta_{\text{MAX}} = 1 - \frac{293}{773} \quad \eta_{\text{MAX}} = 0,62 \text{ (62 \%)}$$

➔ En pratique, les rendements réels sont compris entre 20 % et 40 %.

c/ Représentation du cycle dans un diagramme de Watt (P,V)



c/ Représentation du cycle dans un diagramme de Watt (P,V)



Rappel du Cours de PHYSIQUE 06 :

Pour une transformation réversible, le travail algébriquement reçu par le système de la part des forces de pression vaut :

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

Aire sous la courbe

$$W_{EI \rightarrow EF} < 0 \text{ si } V_{\text{initial}} < V_{\text{final}}$$

$$W_{EI \rightarrow EF} > 0 \text{ si } V_{\text{initial}} > V_{\text{final}}$$

(Travail *négligé* si on se déplace *vers la droite* et inversement)

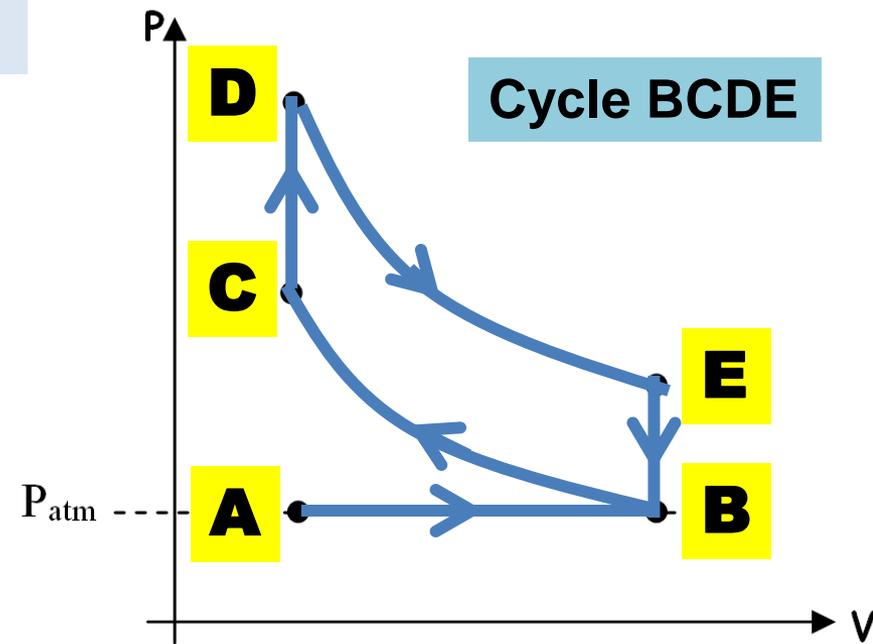
✂ Application 2 :

a) 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.

- B → C : Déplacement *vers la gauche*, donc **travail > 0** (travail réellement reçu)
- D → E : Déplacement *vers la droite*, donc **travail < 0** (travail réellement perdu)
- C → D et E → B : Transformation isochore, donc **travail = 0**

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

$$W_{\text{CYCLE}} = W_{BC} + W_{CD} + W_{DE} + W_{EB} \quad \text{donc } W_{\text{CYCLE}} = W_{BC} (>0) + W_{DE} (<0)$$

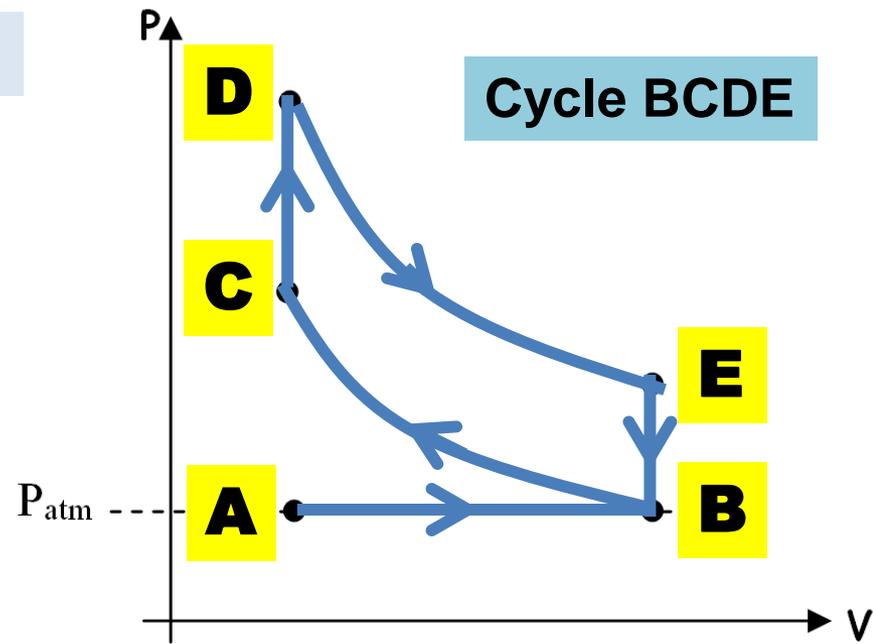


Rappel du Cours de PHYSIQUE 06 :

$$\underline{W_{EI \rightarrow EF} < 0} \text{ si } V_{\text{initial}} < V_{\text{final}}$$

$$\underline{W_{EI \rightarrow EF} > 0} \text{ si } V_{\text{initial}} > V_{\text{final}}$$

a) 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.



- **B → C** : Déplacement **vers la gauche**, donc **travail > 0** (travail réellement reçu)
- **D → E** : Déplacement **vers la droite**, donc **travail < 0** (travail réellement perdu)
- **C → D** et **E → B** : Transformation isochore, donc **travail = 0**

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

$$W_{\text{CYCLE}} = W_{BC} + W_{CD} + W_{DE} + W_{EB} \quad \text{donc } W_{\text{CYCLE}} = W_{BC} (>0) + W_{DE} (<0)$$

Or, $|W_{DE}| > W_{BC}$ car l'aire sous la courbe DE est plus grande que l'aire sous la courbe BC. Donc **$W_{\text{cycle}} < 0$** (cohérent avec un cycle **MOTEUR**)

Raccourci : cycle parcouru dans le **SENS HORAIRE** = cycle **MOTEUR**

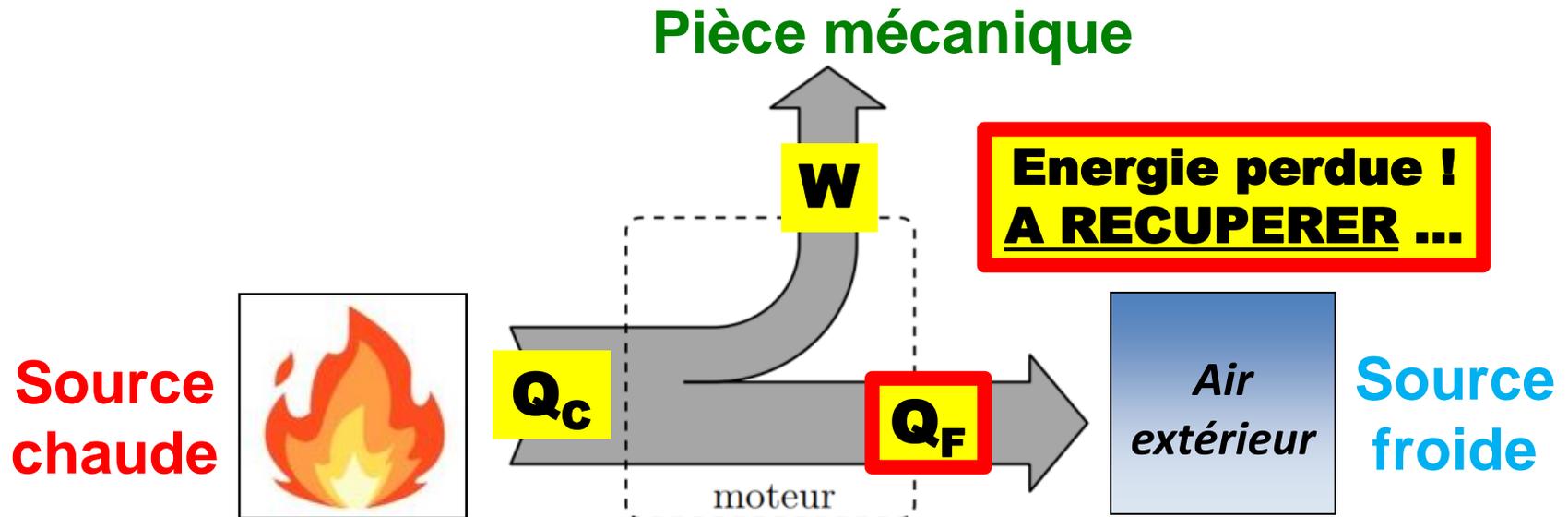
b) Sur un cycle complet, le moteur reçoit-il ou fournit-il un travail à l'extérieur ?

$$W_{\text{CYCLE}} = W_{\text{BC}} + W_{\text{CD}} + W_{\text{DE}} + W_{\text{EB}} \quad \text{donc } W_{\text{CYCLE}} = W_{\text{BC}} (>0) + W_{\text{DE}} (<0)$$

Or, $|W_{\text{DE}}| > W_{\text{BC}}$ car l'aire sous la courbe DE est plus grande que l'aire sous la courbe BC.

Raccourci : cycle parcouru dans le SENS HORAIRE = cycle MOTEUR

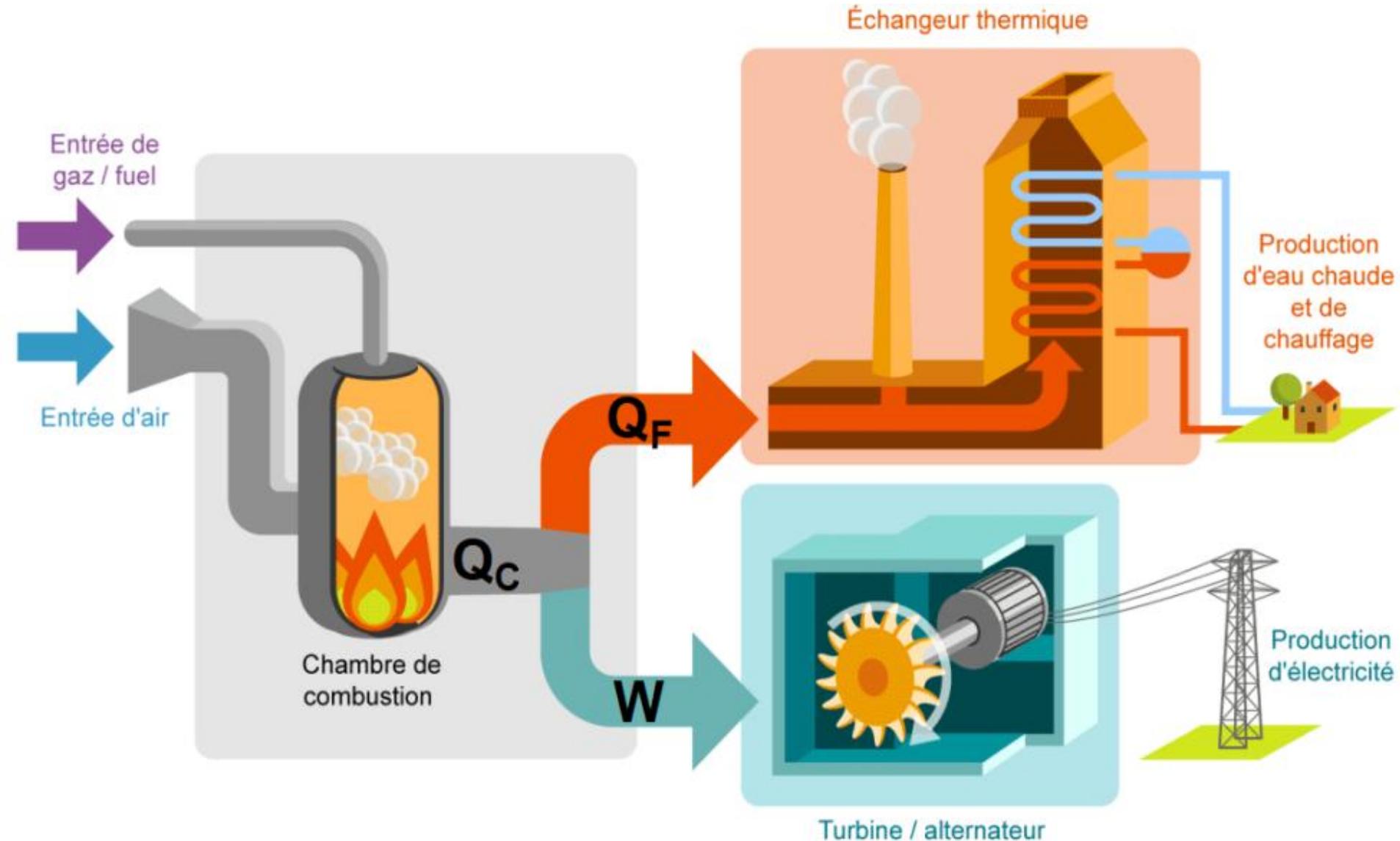
d/ Principe de la cogénération



La cogénération est la PRODUCTION et VALORISATION simultanée de 2 formes d'énergie différentes par la *même machine thermique*.

d/ Principe de la cogénération

La cogénération est la PRODUCTION et VALORISATION simultanée de 2 formes d'énergie différentes par la *même machine thermique*.



2) Les machines frigorifiques

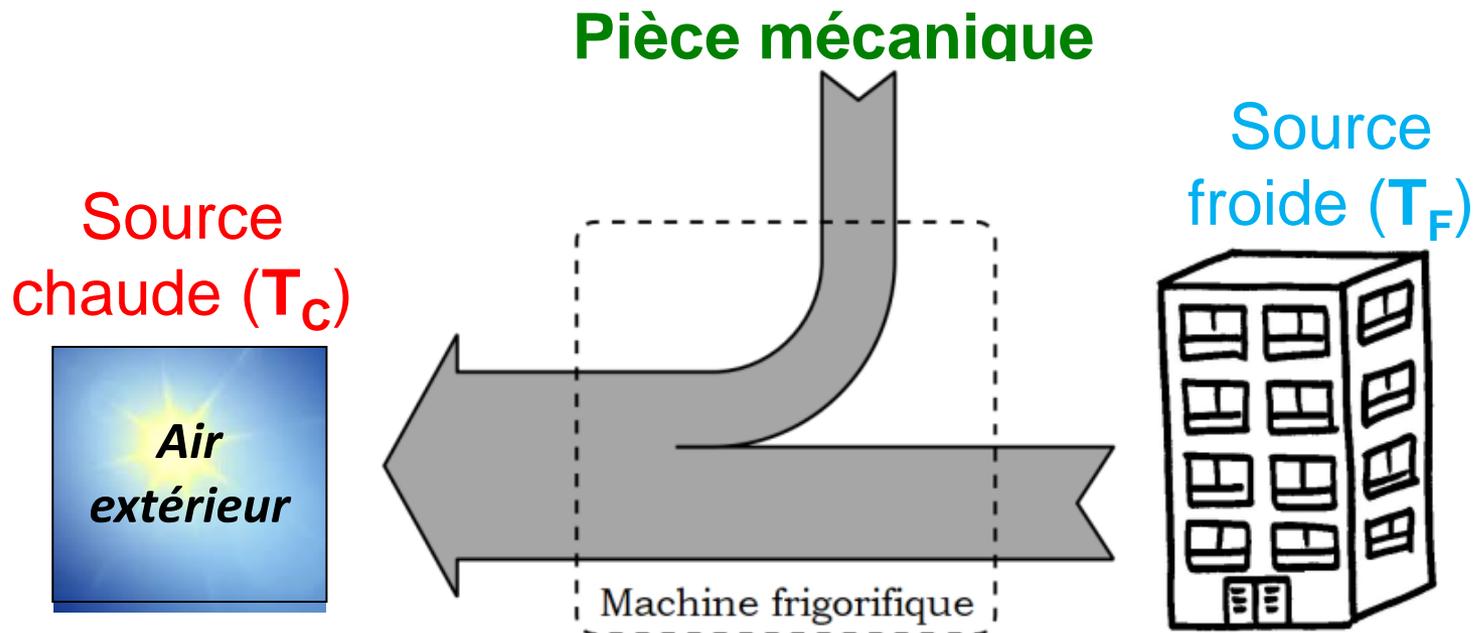
a/ Principe de fonctionnement

Apport d'énergie mécanique



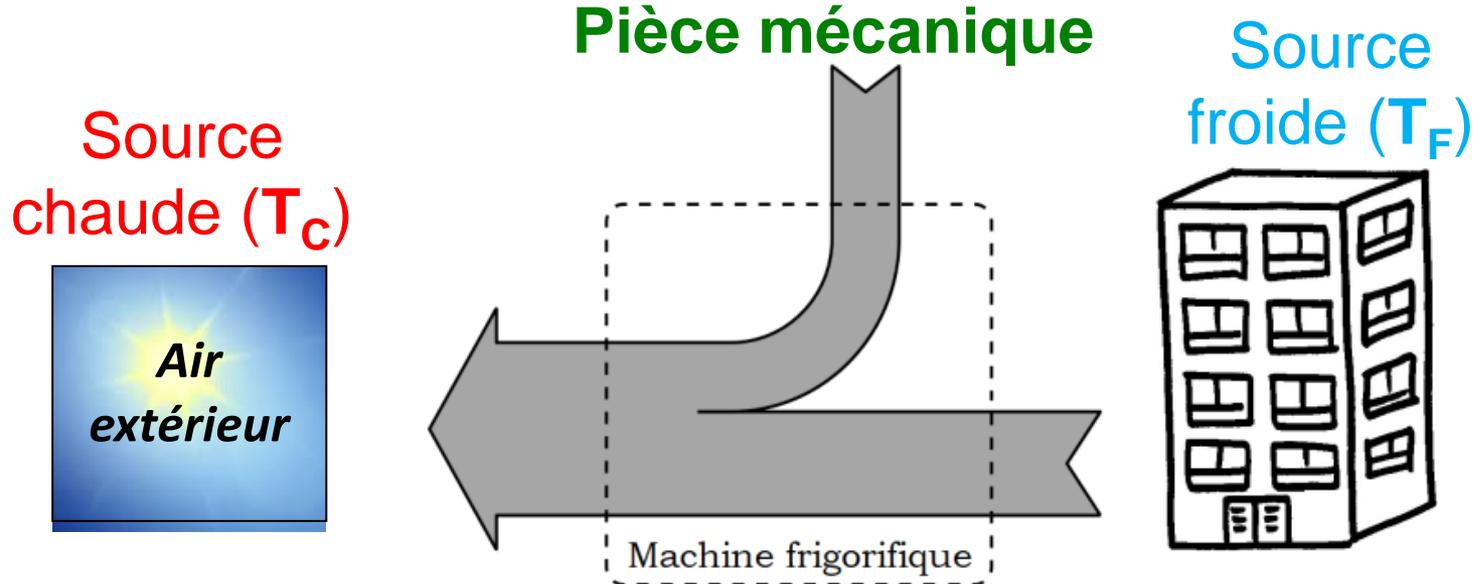
Transfert thermique NON NATUREL de la source froide

(intérieur de l'habitation) vers la source chaude (air extérieur)



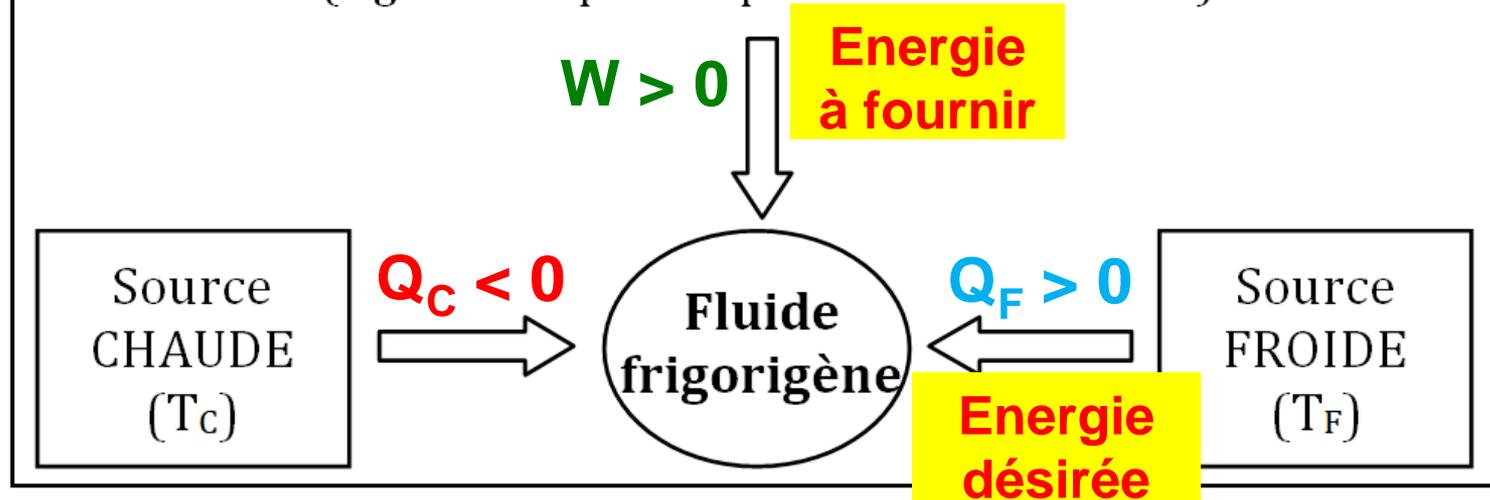
2) Les machines frigorifiques

a/ Principe de fonctionnement



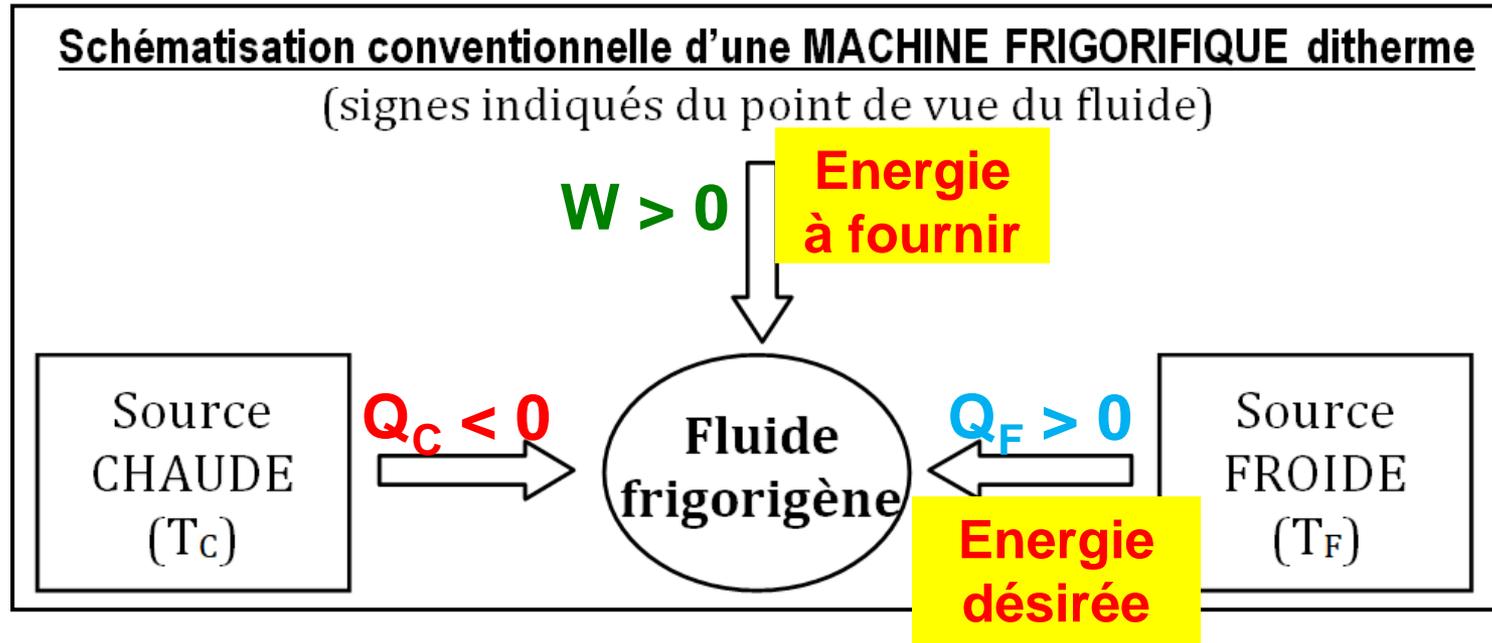
Schématisation conventionnelle d'une MACHINE FRIGORIFIQUE ditherme

(signes indiqués du point de vue du fluide)



2) Les machines frigorifiques

a/ Principe de fonctionnement



b/ Efficacité d'une machine frigorifique ditherme

☛ Utilisation du 1^{er} principe de la thermodynamique :

$$e = \frac{Q_F}{W} \quad \Leftrightarrow \quad e = -\frac{Q_F}{Q_C + Q_F} \quad \Leftrightarrow \quad e = -\frac{1}{\frac{Q_C}{Q_F} + 1}$$

$W + Q_C + Q_F = 0$

☛ Utilisation de l'inégalité de Clausius :

• Utilisation du 1^{er} principe de la thermodynamique :

$$e = \frac{Q_F}{W} \quad \Leftrightarrow \quad e = -\frac{Q_F}{Q_C + Q_F} \quad \Leftrightarrow \quad e = -\frac{1}{\frac{Q_C}{Q_F} + 1}$$

$W + Q_C + Q_F = 0$

• Utilisation de l'inégalité de Clausius :

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{Q_C}{Q_F} \leq -\frac{T_C}{T_F} \quad (Q_F \text{ positif})$$

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

$$\Leftrightarrow -\frac{1}{e} \leq \frac{T_F - T_C}{T_F} \quad \Leftrightarrow \quad e \leq \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

e_{MAX}

• 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 et elle est d'autant plus faible que l'écart entre T_C et T_F est grand.

☛ Utilisation de l'inégalité de Clausius :

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

$$\Leftrightarrow -\frac{1}{e} \leq \frac{T_F - T_C}{T_F} \Leftrightarrow$$

$$e \leq \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

e_{MAX}

☛ 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 et elle est d'autant plus faible que l'écart entre T_C et T_F est grand.

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

$$e_{MAX} = \frac{25 + 273}{35 - 25}$$

Soit $e_{MAX} = 30$ (donc $e_{MAX} = 3000\%$!!!)

➔ Une efficacité peut en effet être plus grande que 100 % mais les efficacités réelles des machines frigorifiques sont entre 300 % et 400 %.

☛ 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 et elle est d'autant plus faible que l'écart entre T_C et T_F est grand.

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

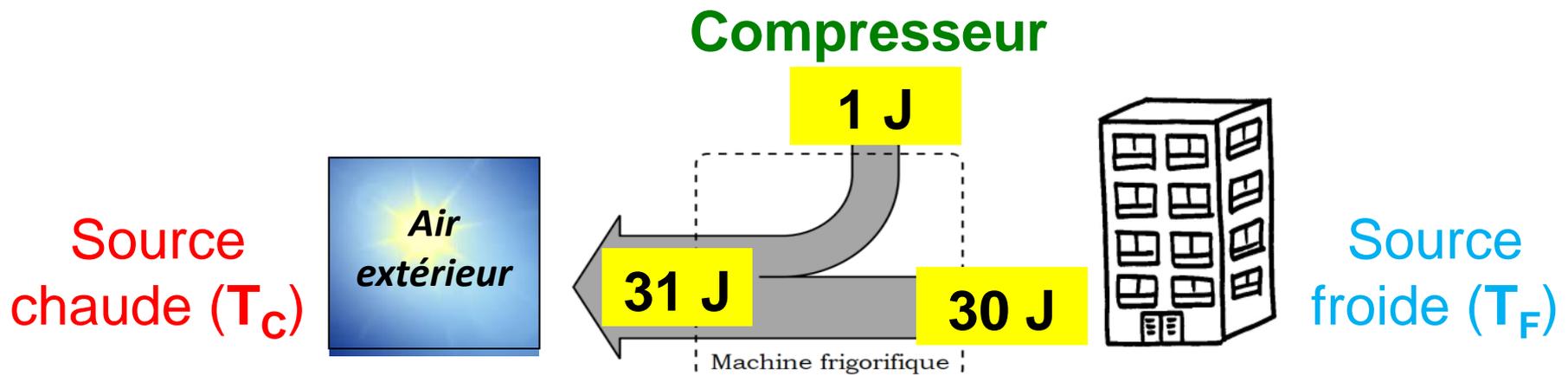
$$e_{\text{MAX}} = \frac{25 + 273}{35 - 25}$$

Soit $e_{\text{MAX}} = 30$ (donc $e_{\text{MAX}} = 3000\%$!!!)

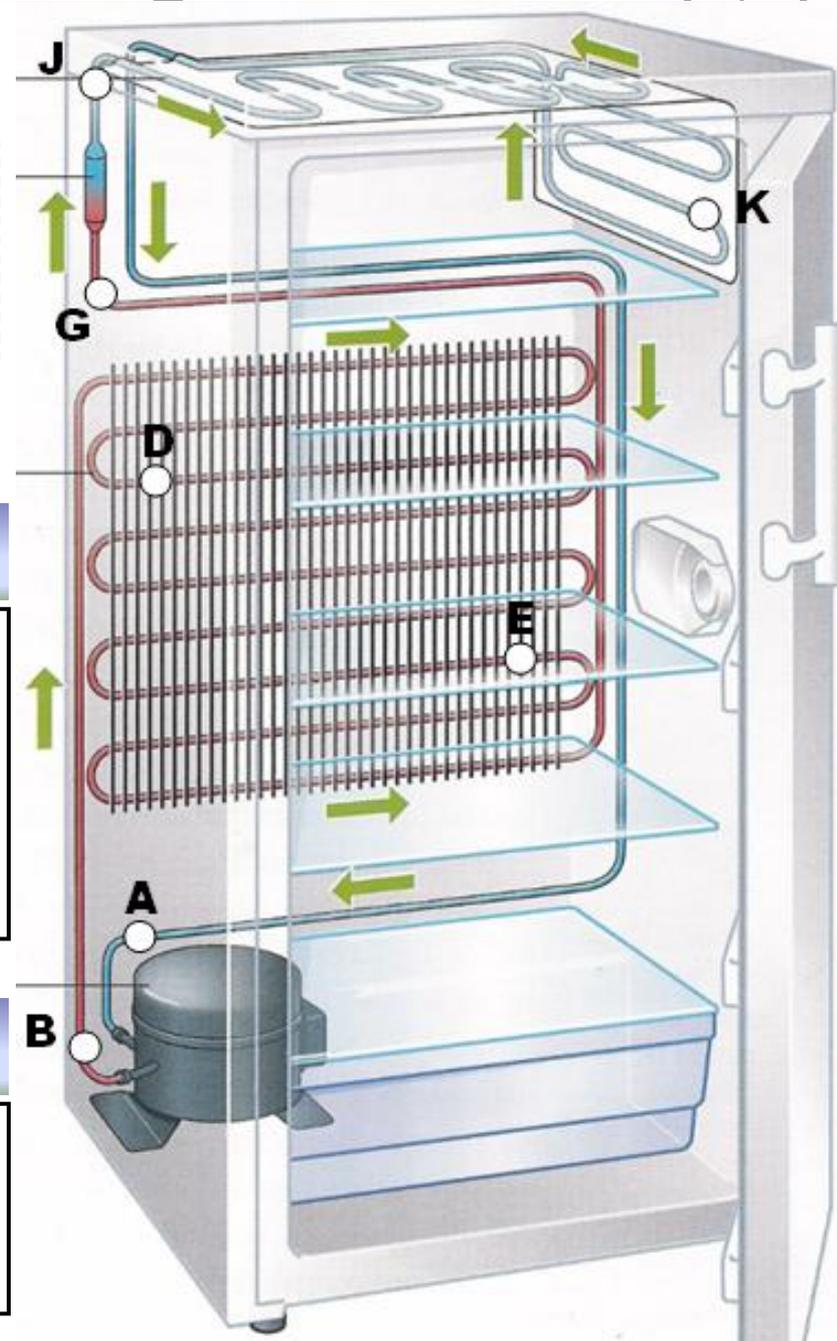
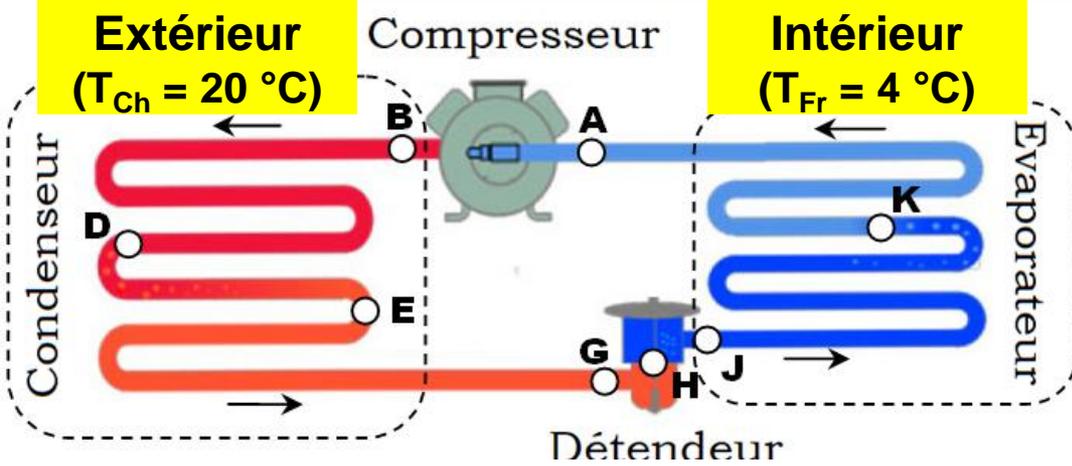
➔ Une efficacité peut en effet être plus grande que 100 % mais les efficacités réelles des machines frigorifiques sont entre 300 % et 400 %.



Ce résultat peut paraître surprenant et en contradiction avec la conservation de l'énergie, mais il n'en est rien ...



c/ Représentation du cycle dans un diagramme de Watt (P,V)



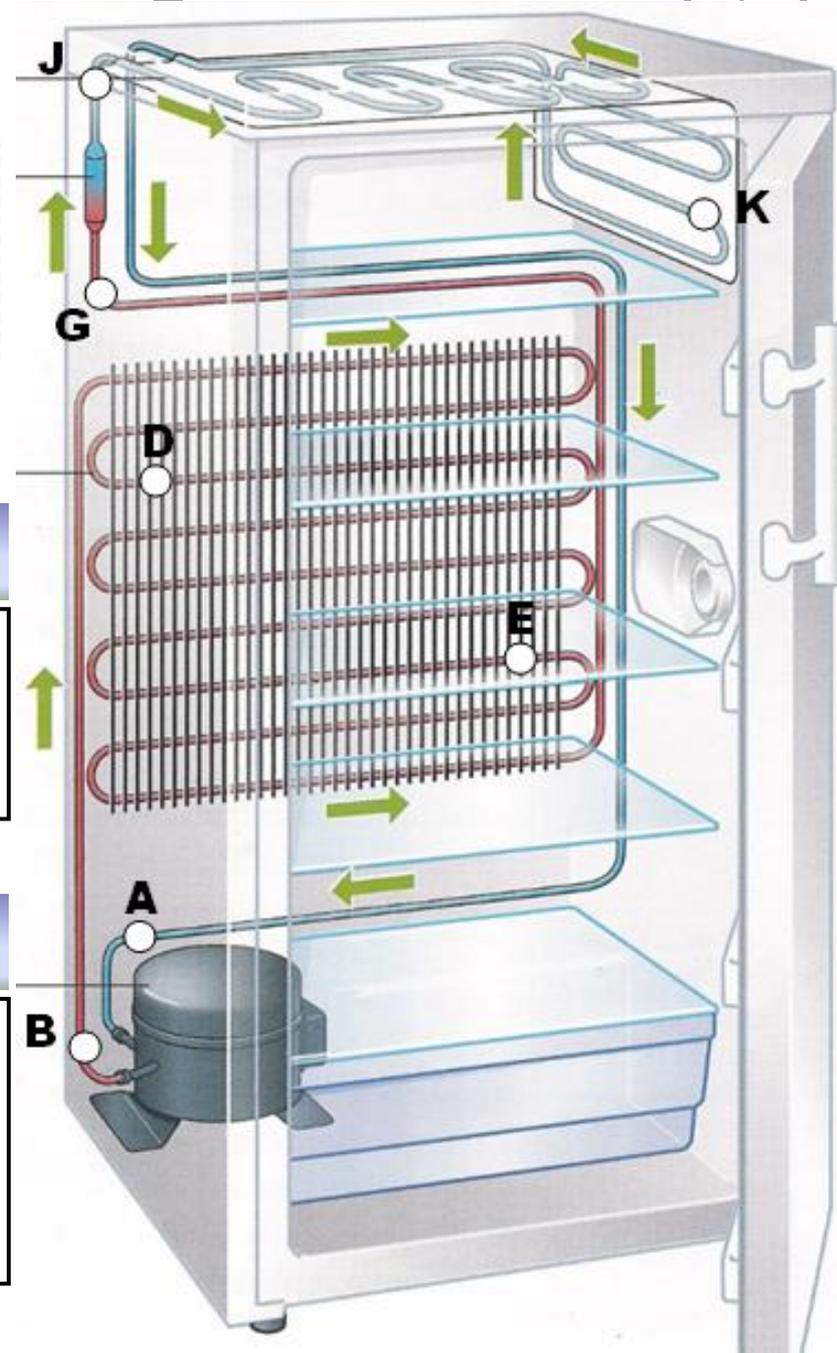
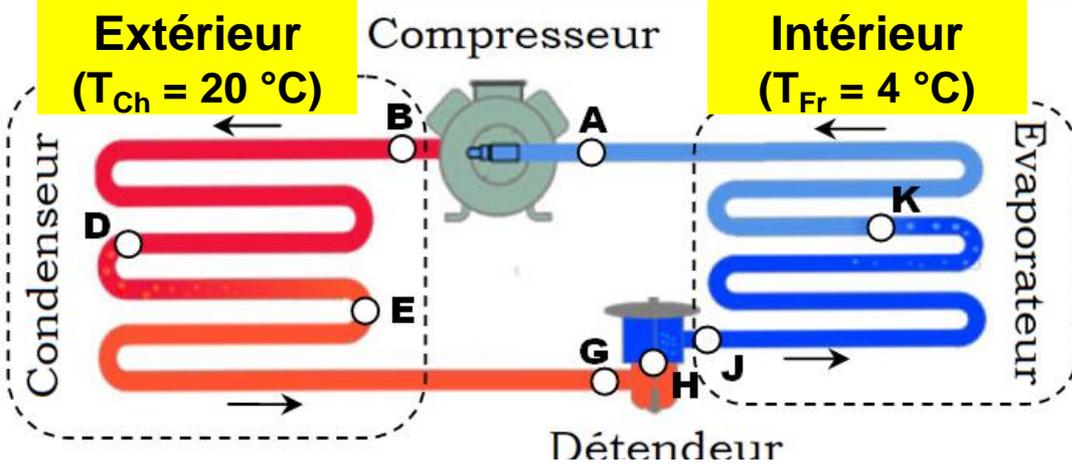
• Le Compresseur : A \rightarrow B

Au niveau *du compresseur*, le **travail mécanique W est reçu par le fluide**, lui permettant d'atteindre une température plus grande que celle de la source chaude (l'air extérieur)

• Le Condenseur : B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow G

Au niveau *du condenseur*, le **transfert thermique Q_C est cédé par le fluide** à la source chaude (l'air extérieur).

c/ Représentation du cycle dans un diagramme de Watt (P,V)



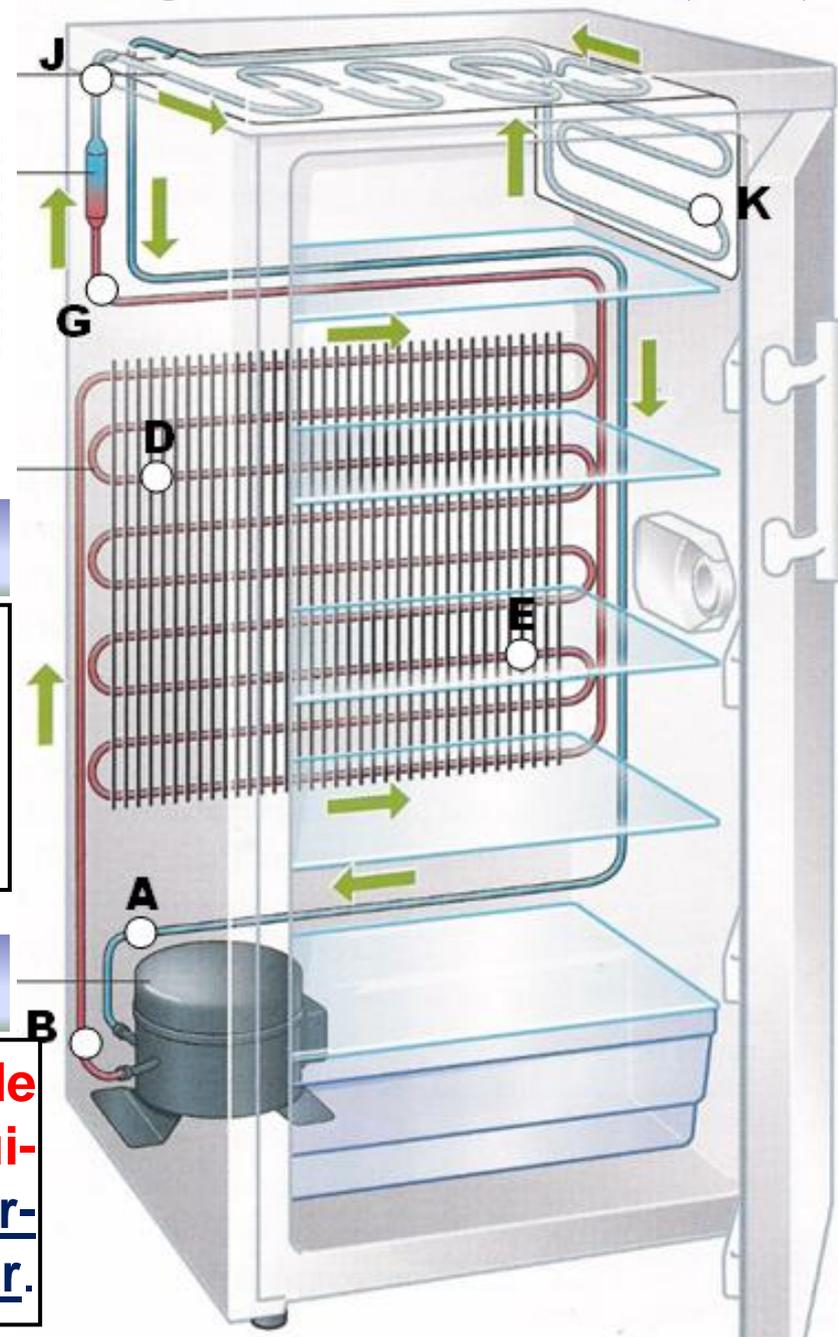
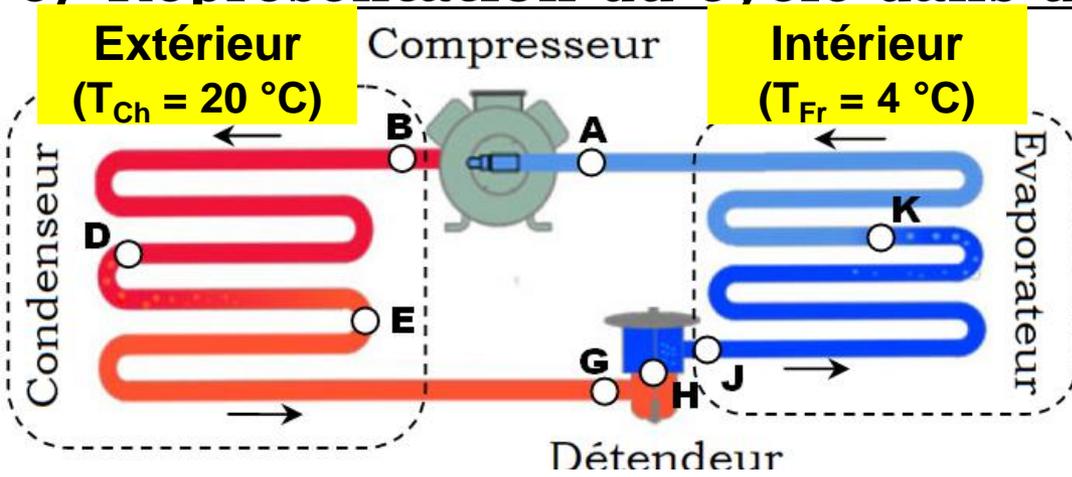
- **Le Condenseur** : $B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow G$

Au niveau **du condenseur**, **le transfert thermique Q_C est cédé par le fluide** à la source chaude (l'air extérieur).

- **Le Détendeur** : $G \rightarrow H \rightarrow J$

Au niveau du **détendeur**, **la température du fluide baisse jusqu'à une valeur inférieure à celle de la source froide** (l'intérieur du réfrigérateur).

c/ Représentation du cycle dans un diagramme de Watt (P,V)

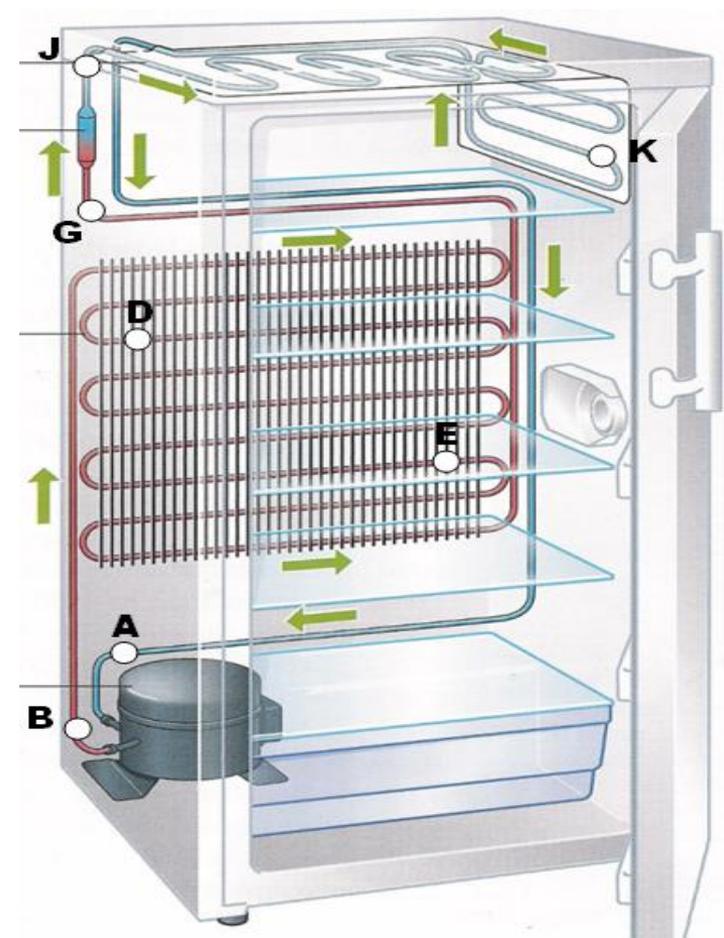
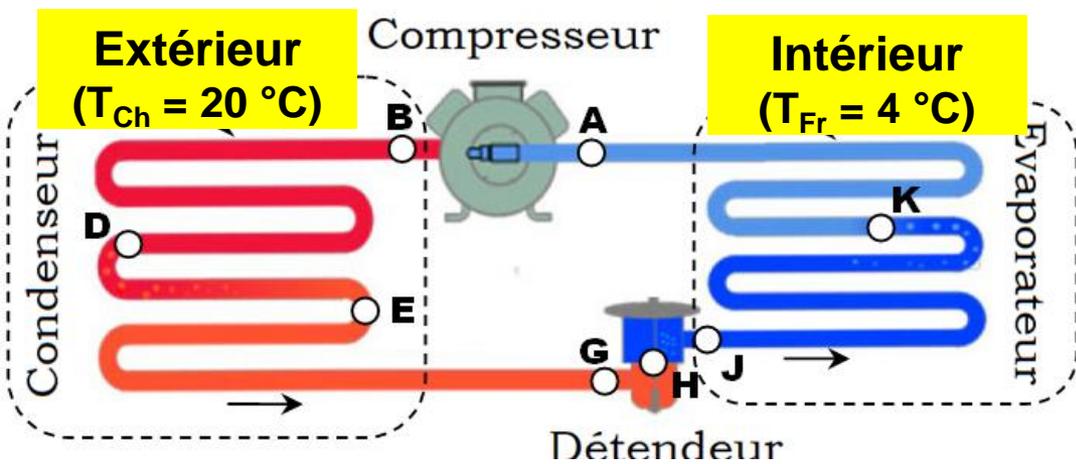


- Le Détendeur : G → H → J

Au niveau du *détendeur*, la température du fluide baisse jusqu'à une valeur inférieure à celle de la source froide (l'intérieur du réfrigérateur).

- L'évaporateur : J → K → A

C'est au niveau de *l'évaporateur* que le transfert thermique Q_F est reçu par le fluide de la part de la source froide, ce qui permet de refroidir l'intérieur du réfrigérateur.



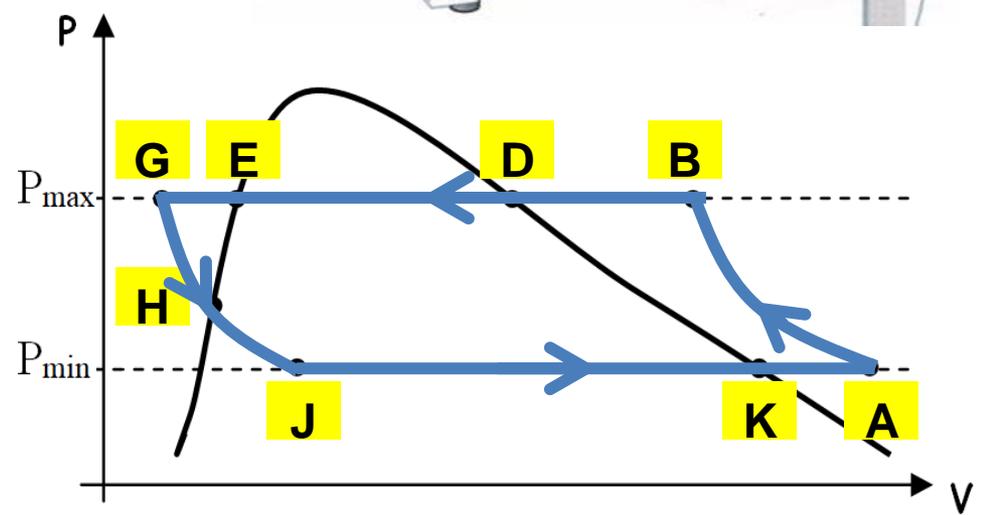
• L'évaporateur : J → K → A

C'est au niveau de *l'évaporateur* que **le transfert thermique Q_F est reçu par le fluide** de la part de la source froide, ce qui permet de refroidir l'intérieur du réfrigérateur

✎ Application 3 : Le cycle de transformations est représenté ci-contre.
 Confirme-t-il le caractère « *récepteur* » des machines frigorifiques ?

Cycle parcouru dans le sens **ANTI-HORAIRE**, caractéristique des **RECEPTEURS** thermiques

$W_{\text{cycle}} > 0$



🔗 Application 3 : Le cycle de transformations est représenté ci-contre. Confirme-t-il le caractère « récepteur » des machines frigorifiques ?

Cycle parcouru dans le sens **ANTI-HORAIRE**, caractéristique des **RECEPTEURS** thermiques

$$W_{\text{cycle}} > 0$$

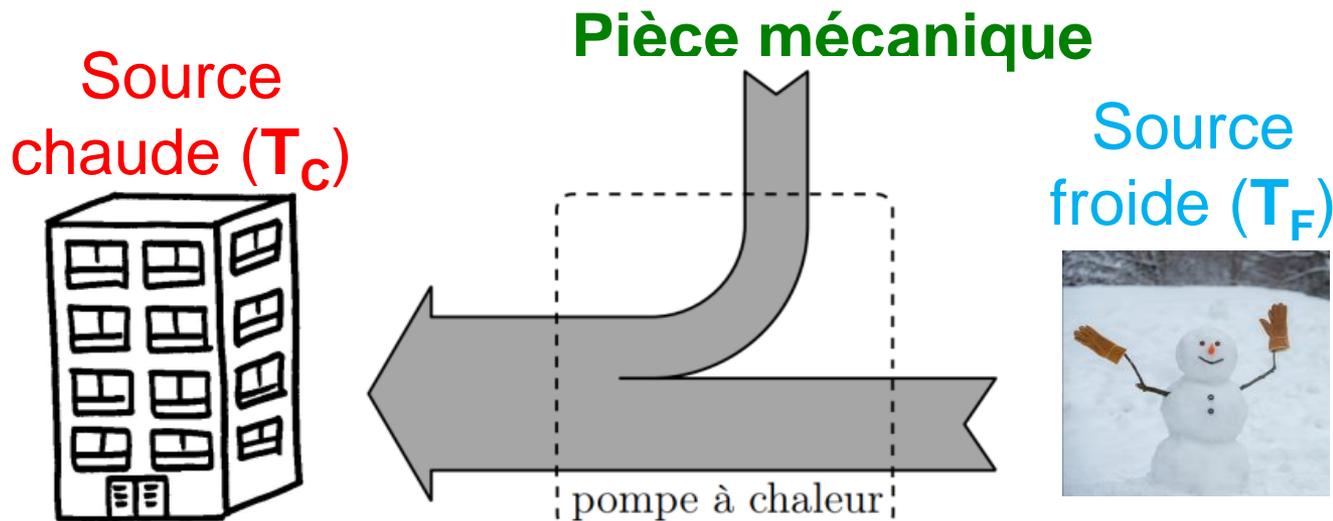
3) Les pompes à chaleur

a/ Principe de fonctionnement

Apport d'énergie mécanique

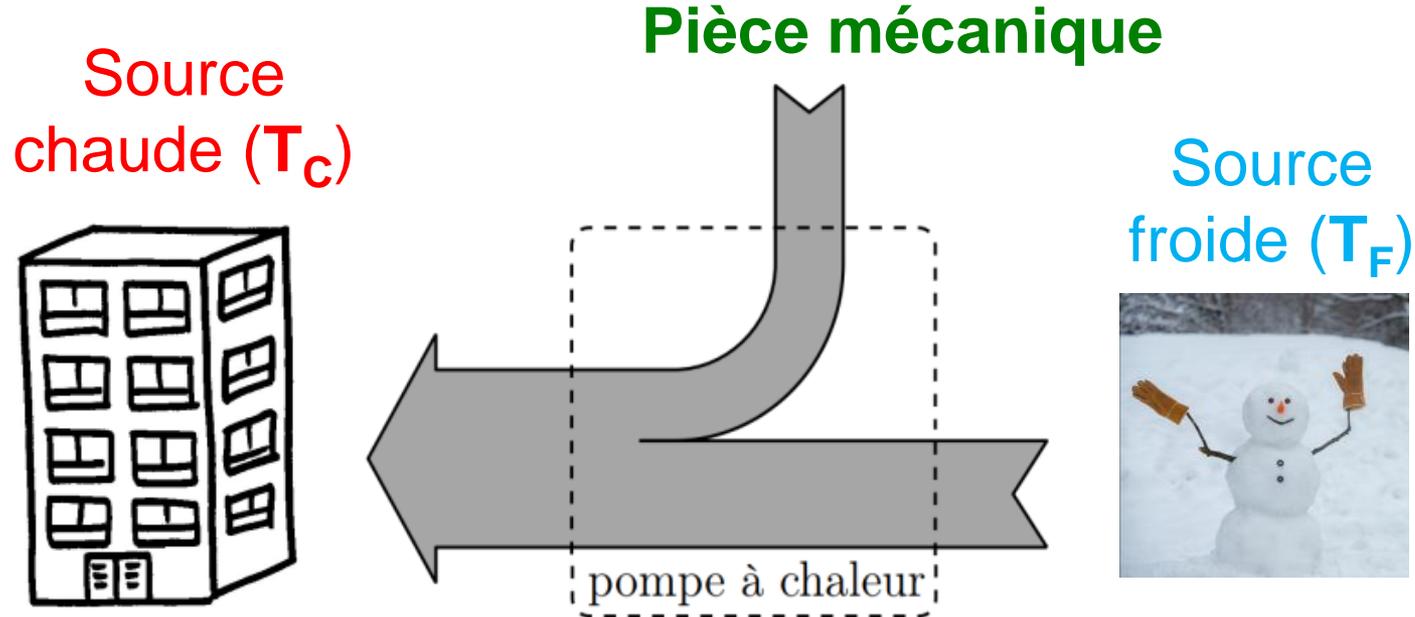


Transfert thermique NON NATUREL de la source froide
(l'extérieur d'une maison) vers la source chaude (l'intérieur)

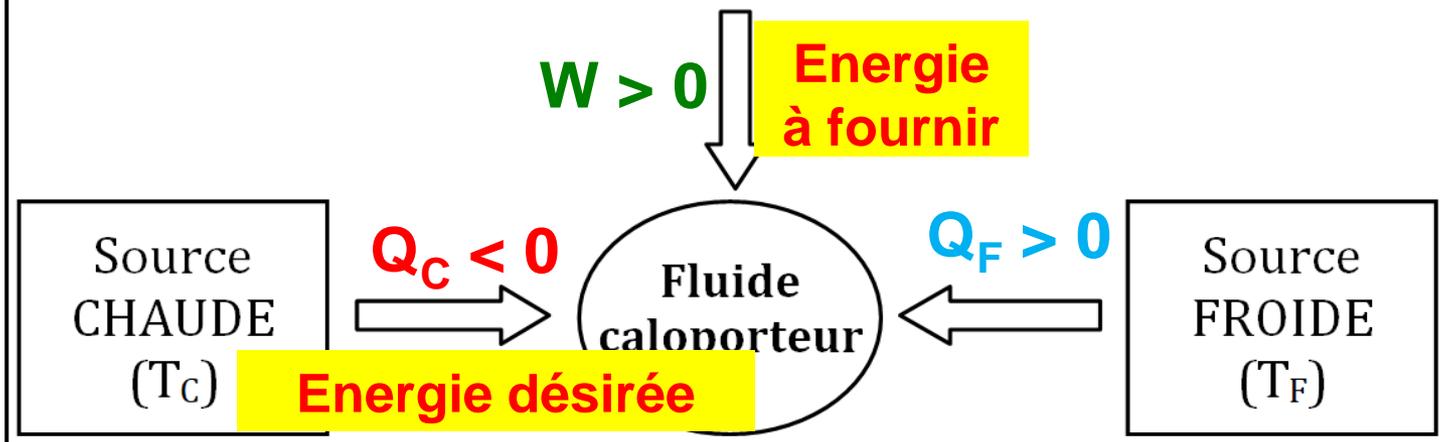


3) Les pompes à chaleur

a/ Principe de fonctionnement

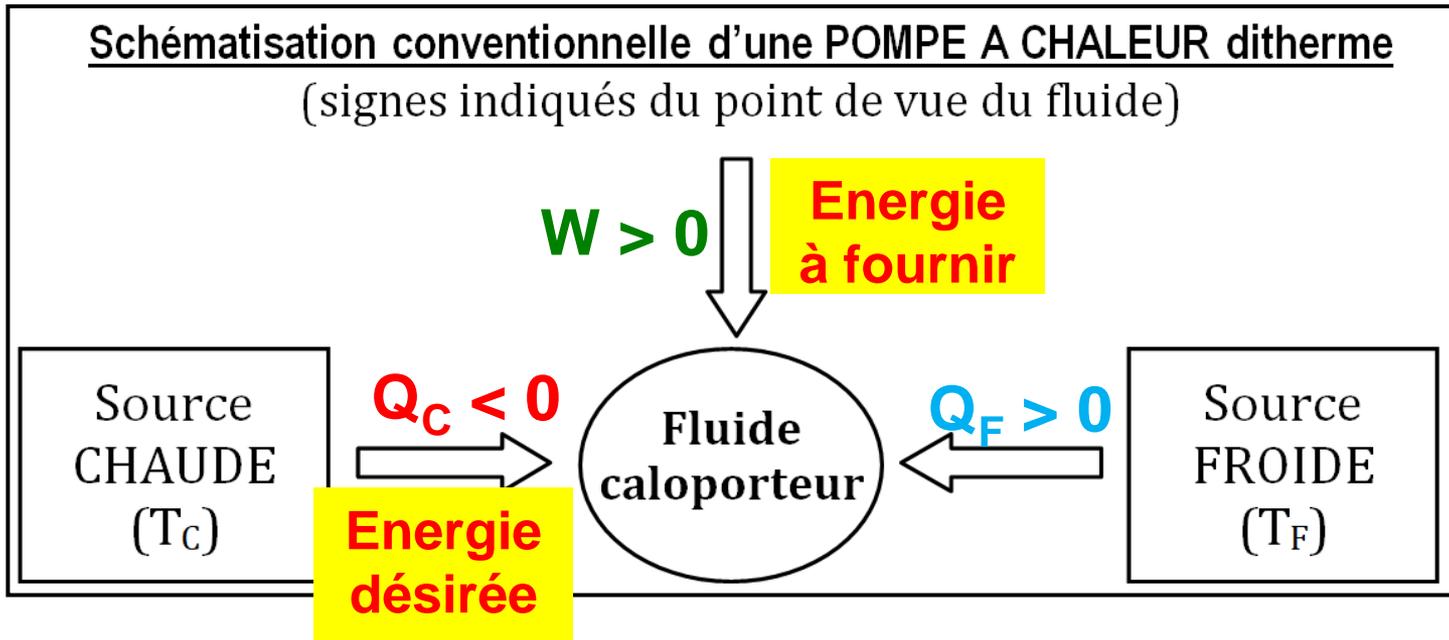


Schématisation conventionnelle d'une POMPE A CHALEUR ditherme
(signes indiqués du point de vue du fluide)



3) Les pompes à chaleur

a/ Principe de fonctionnement



b/ Efficacité d'une pompe à chaleur ditherme

☛ Utilisation du 1^{er} principe de la thermodynamique :

$$e = -\frac{Q_C}{W} \quad \Leftrightarrow \quad e = \frac{Q_C}{Q_C + Q_F} \quad \Leftrightarrow \quad e = \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}}$$

$W + Q_C + Q_F = 0$

☛ Utilisation de l'inégalité de Clausius :

• Utilisation du 1^{er} principe de la thermodynamique :

$$e = -\frac{Q_C}{W} \quad \Leftrightarrow \quad e = \frac{Q_C}{Q_C + Q_F} \quad \Leftrightarrow \quad e = \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}}$$

$W + Q_C + Q_F = 0$

• Utilisation de l'inégalité de Clausius :

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

**ATTENTION
AU
SIGNE**

$$\Leftrightarrow \frac{Q_F}{Q_C} \geq -\frac{T_F}{T_C}$$

(Q_C négatif)



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

$$\Leftrightarrow \frac{1}{e} \geq \frac{T_C - T_F}{T_C}$$

$$e \leq \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

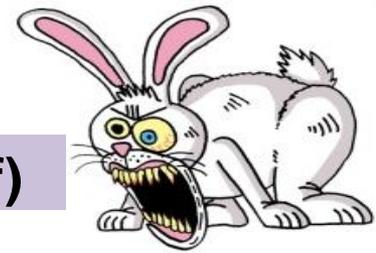
e_{MAX}

☛ Utilisation de l'inégalité de Clausius :

ATTENTION
AU
SIGNE

$$\Leftrightarrow \frac{Q_F}{Q_C} \geq -\frac{T_F}{T_C}$$

(Q_C négatif)



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

$$\Leftrightarrow \frac{1}{e} \geq \frac{T_C - T_F}{T_C}$$

\Leftrightarrow

$$e \leq \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

e_{MAX}

☛ 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 et elle est **d'autant plus faible que l'écart entre T_C et T_F est grand.**

☛ Ordres de grandeurs : Calculer le e_{MAX} d'une pompe à chaleur maintenant la température d'un appartement à 20 °C pour une température extérieure de 0 °C .

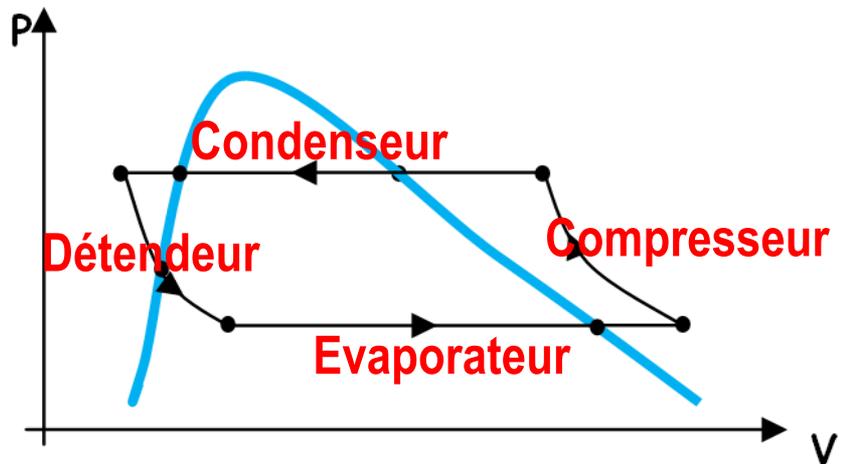
Application 4 :

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

Puissance désirée = $P_1 = 4 \text{ kW}$

Puissance à fournir = $P_2 = 1 \text{ kW}$

$$e = \frac{P_1}{P_2} = 4 \quad \text{soit } \underline{e = 400 \%}$$



b) Indiquer où se trouvent compresseur, condenseur, détenteur et évaporateur.

II- Les machines thermiques à écoulement de fluide stationnaire

- Compresseur
- Condenseur
- Détendeur
- Evaporateur

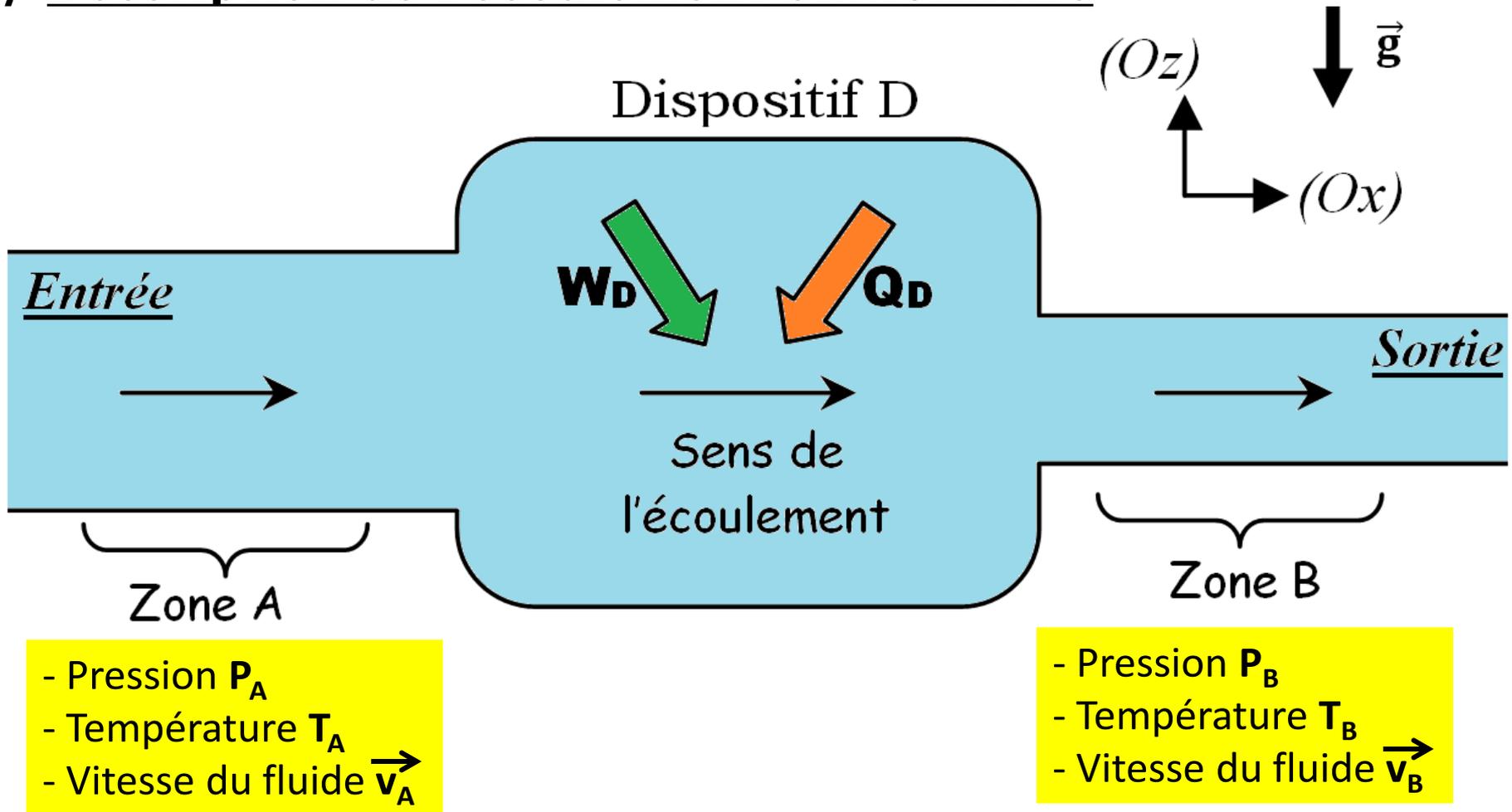


Systemes
OUVERTS

L'énoncé
 $\Delta E_m + \Delta U = W + Q$
 du 1^{er} principe ne s'applique pas

1) Le 1^{er} principe en écoulement stationnaire

a/ Description de l'écoulement stationnaire



Un écoulement est dit **STATIONNAIRE** (ou permanent) si l'état du fluide en un point donné de la canalisation est le même à chaque instant.

Ici P_A , T_A , \vec{v}_A , P_B , T_B et \vec{v}_B sont toutes des constantes.

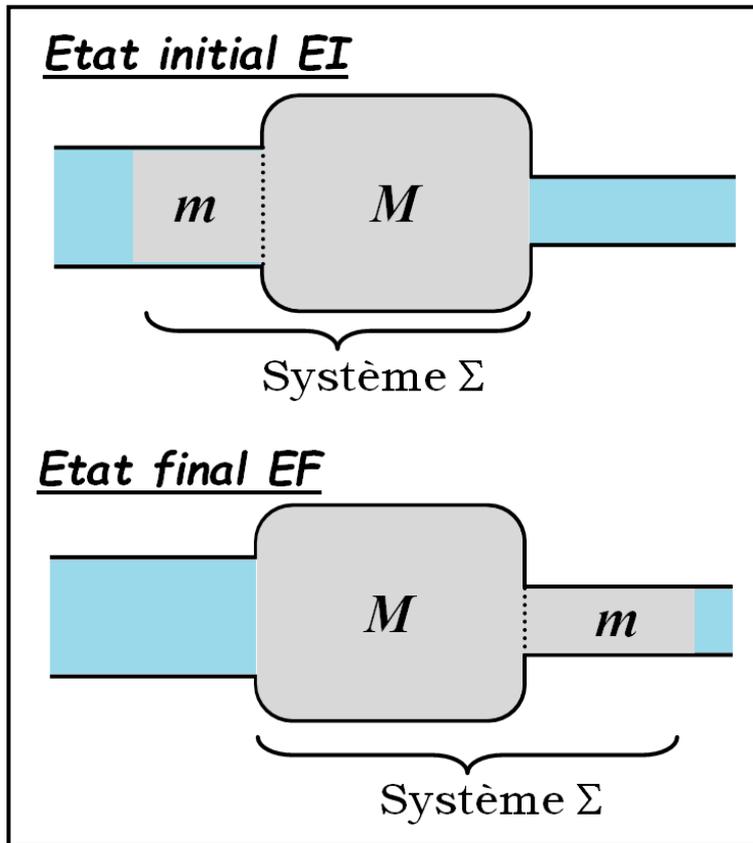
1) Le 1^{er} principe en écoulement stationnaire

a/ Description de l'écoulement stationnaire

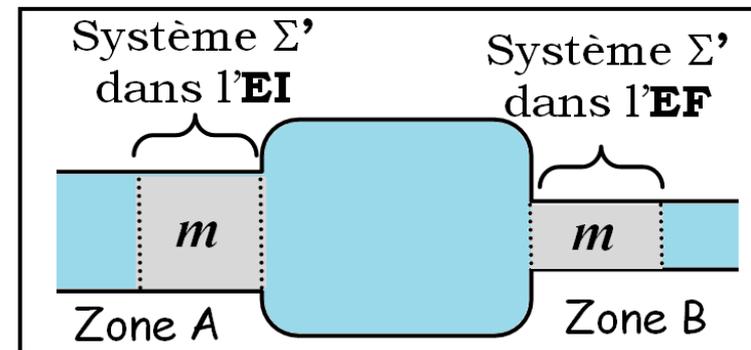
Un écoulement est dit **STATIONNAIRE** (ou permanent) si l'état du fluide en un point donné de la canalisation est le même à chaque instant.

Ici P_A , T_A , \vec{v}_A , P_B , T_B et \vec{v}_B sont toutes des constantes.

b/ Choix du système étudié



Système Σ équivalent
au système Σ' ...

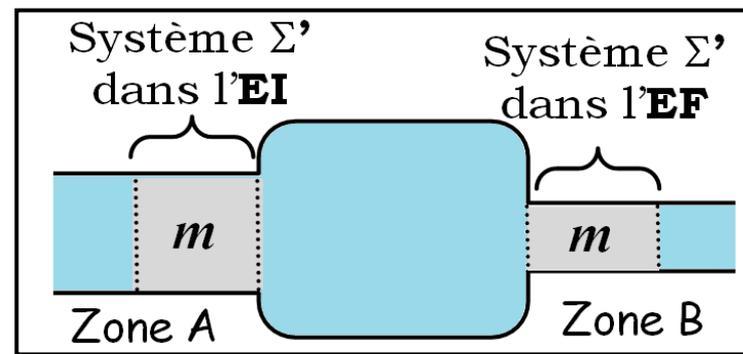


P_A , T_A , \vec{v}_A , z_A et V_A

P_B , T_B , \vec{v}_B , z_B et V_B

c/ Etablissement de la relation

Système fermé de masse m ,
évoluant pendant une durée Δt
de l'**EI** à l'**EF**



P_A, T_A, \vec{v}_A, z_A et V_A

P_B, T_B, \vec{v}_B, z_B et V_B

- ☛ Quel est le seul transfert thermique reçu par Σ' ? Transfert thermique Q_D **échangé avec le dispositif D** (mais pas de transfert thermique avec les canalisations qui sont supposées parfaitement calorifugées)
- ☛ Quels sont les 3 travaux reçus 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, le système évoluant 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, le système évoluant 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 :

☛ Quels sont les 3 travaux reçus 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**, le système évoluant 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**, le système évoluant 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 :
$$W_{\text{pression}} = - \int_{EI}^{EF} P_{\text{ext}} \cdot dV$$

$$W_{\text{pression,A}} = - \int_{V_A}^0 P_A \cdot dV = -P_A (0 - V_A) = \boxed{P_A \cdot V_A}$$

$$W_{\text{pression,B}} = - \int_0^{V_B} P_B \cdot dV = -P_B (V_B - 0) = \boxed{-P_B \cdot V_B}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

☛ Simplifier avec la fonction d'état ENTHALPIE : $H = U + PV$

$$\Leftrightarrow H_B - H_A + (E_{cB} - E_{cA}) + (E_{pB} - E_{pA}) = W_D + Q_D$$

☛ Diviser 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
(J.kg⁻¹)

Δh

+

Δe_c

+

Δe_p

=

w_D

+

q_D

1^{er} principe en écoulement stationnaire

Travail massique et
Transfert thermique
massique (J.kg⁻¹)

Variation d'énergie
cinétique massique (J.kg⁻¹)

Variation d'énergie
potentielle massique (J.kg⁻¹)

☛ Expression simplifiée en négligeant Δe_c et Δe_p : $\Delta h = w_D + q_D$ (J.kg⁻¹)

☛ Simplifier avec la fonction d'état ENTHALPIE : $H = U + PV$

$$\Leftrightarrow H_B - H_A + (E_{cB} - E_{cA}) + (E_{pB} - E_{pA}) = W_D + Q_D$$

☛ Diviser 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

Δh

+

Δe_c

+

Δe_p

=

w_D

+

q_D

($J.kg^{-1}$)

1^{er} principe en écoulement stationnaire

Travail massique et
Transfert thermique
massique ($J.kg^{-1}$)

Variation d'énergie
cinétique massique

($J.kg^{-1}$)

Variation d'énergie
potentielle massique

($J.kg^{-1}$)

☛ Expression simplifiée en négligeant Δe_c et Δe_p : $\Delta h = w_D + q_D$ ($J.kg^{-1}$)

☛ Expression simplifiée faisant intervenir les puissances :

Débit massique D_m = 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 :

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

($kg.s^{-1}$) (kg) (s)

☛ Expression simplifiée en négligeant Δe_C et Δe_P : $\Delta h = w_D + q_D$ (J.kg⁻¹)

☛ Expression simplifiée faisant intervenir le débit massique :

Débit massique D_m = 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) (s) (kg.s⁻¹)

$$D_m \cdot \Delta h = \underbrace{D_m \cdot w_D}_{(J.s^{-1})} + \underbrace{D_m \cdot q_D}_{(J.s^{-1})}$$



$$D_m \cdot \Delta h = P_{\text{mécanique}} + P_{\text{transferts thermiques}}$$

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

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

☛ Expression simplifiée faisant intervenir le débit massique :

$$D_m \cdot \Delta h = \underbrace{D_m \cdot w_D}_{(J \cdot s^{-1})} + \underbrace{D_m \cdot q_D}_{(J \cdot s^{-1})}$$



$$D_m \cdot \Delta h = P_{\text{mécanique}} + P_{\text{transferts thermiques}}$$

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

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

2) Exploitation avec un diagramme (P, h)

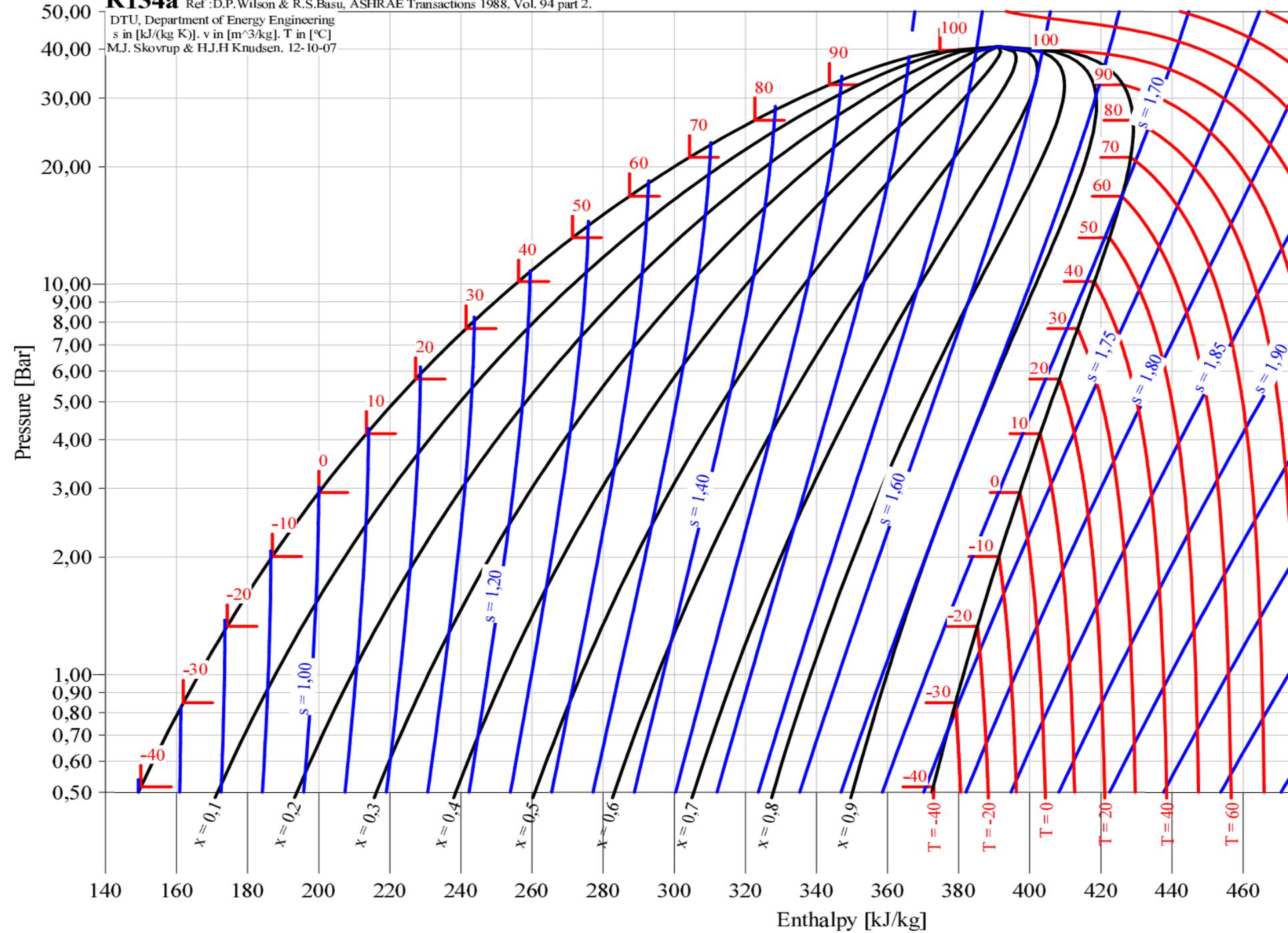
a/ Description du diagramme (P, h)

En abscisse : **h** (enthalpie massique du fluide)

En ordonnée : **P** (pression du fluide)

Chaque fluide a son propre diagramme

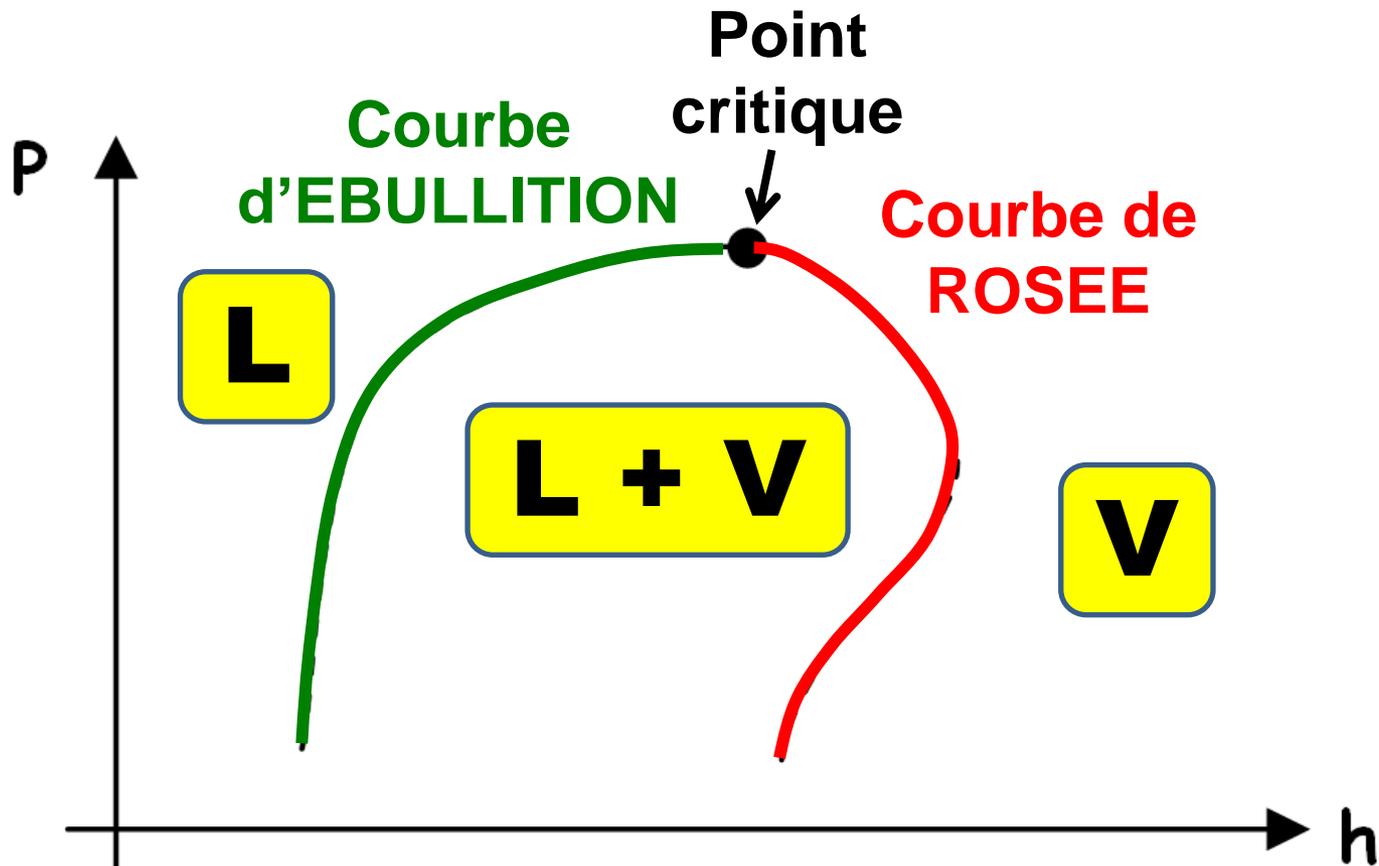
DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen. 12-10-07

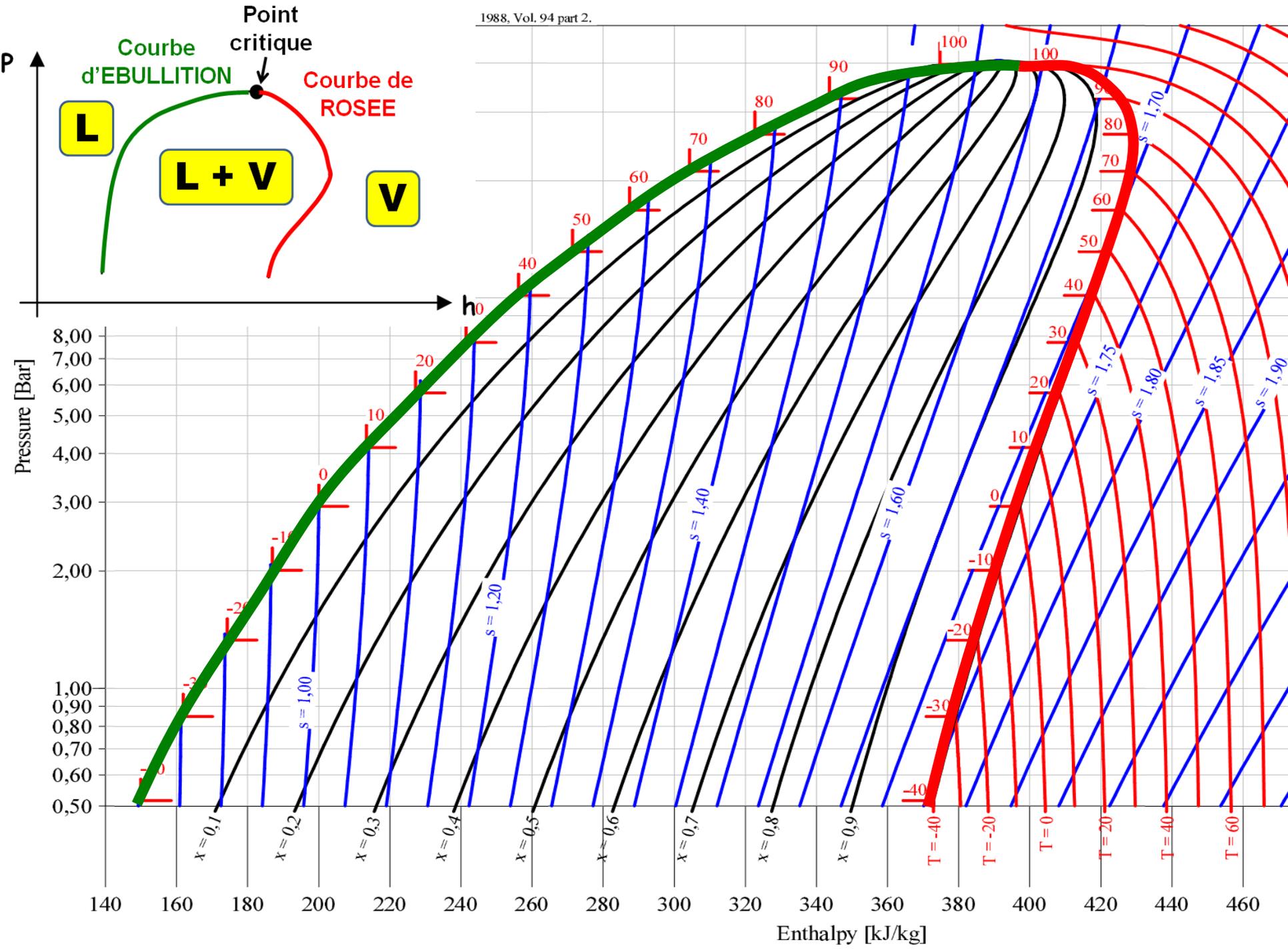


2) Exploitation avec un diagramme (P,h)

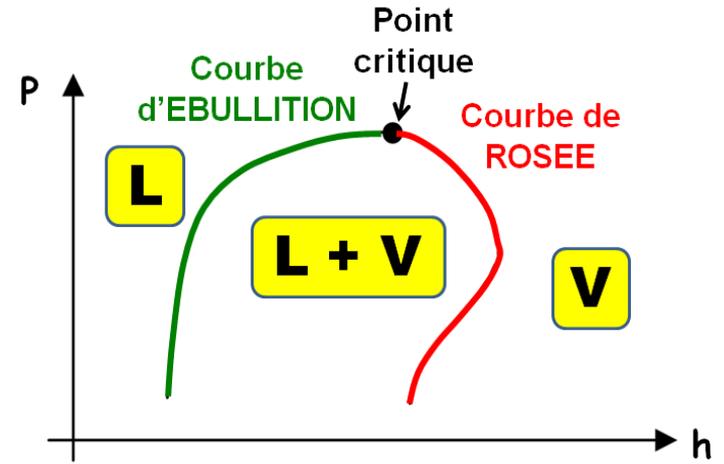
a/ Description du diagramme (P, h)

La courbe de SATURATION



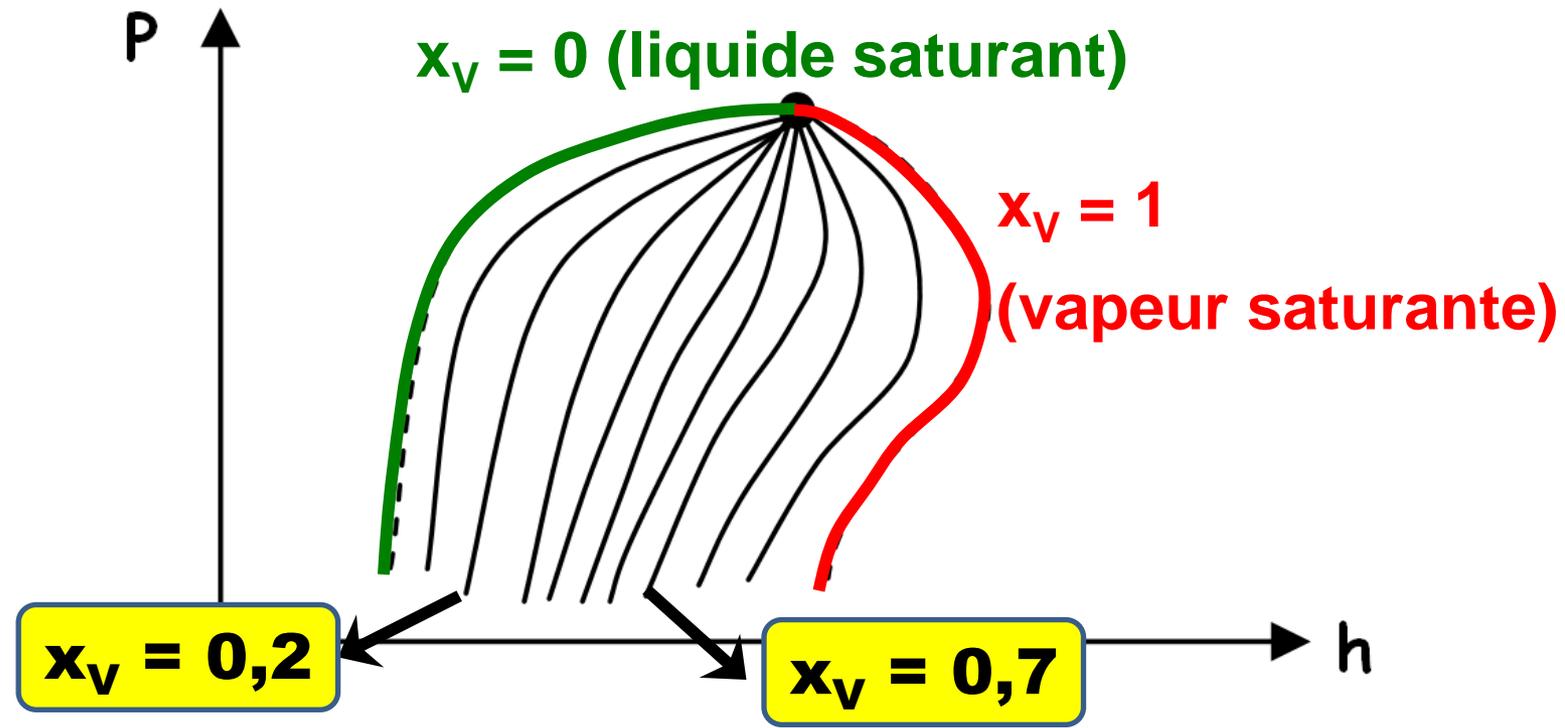


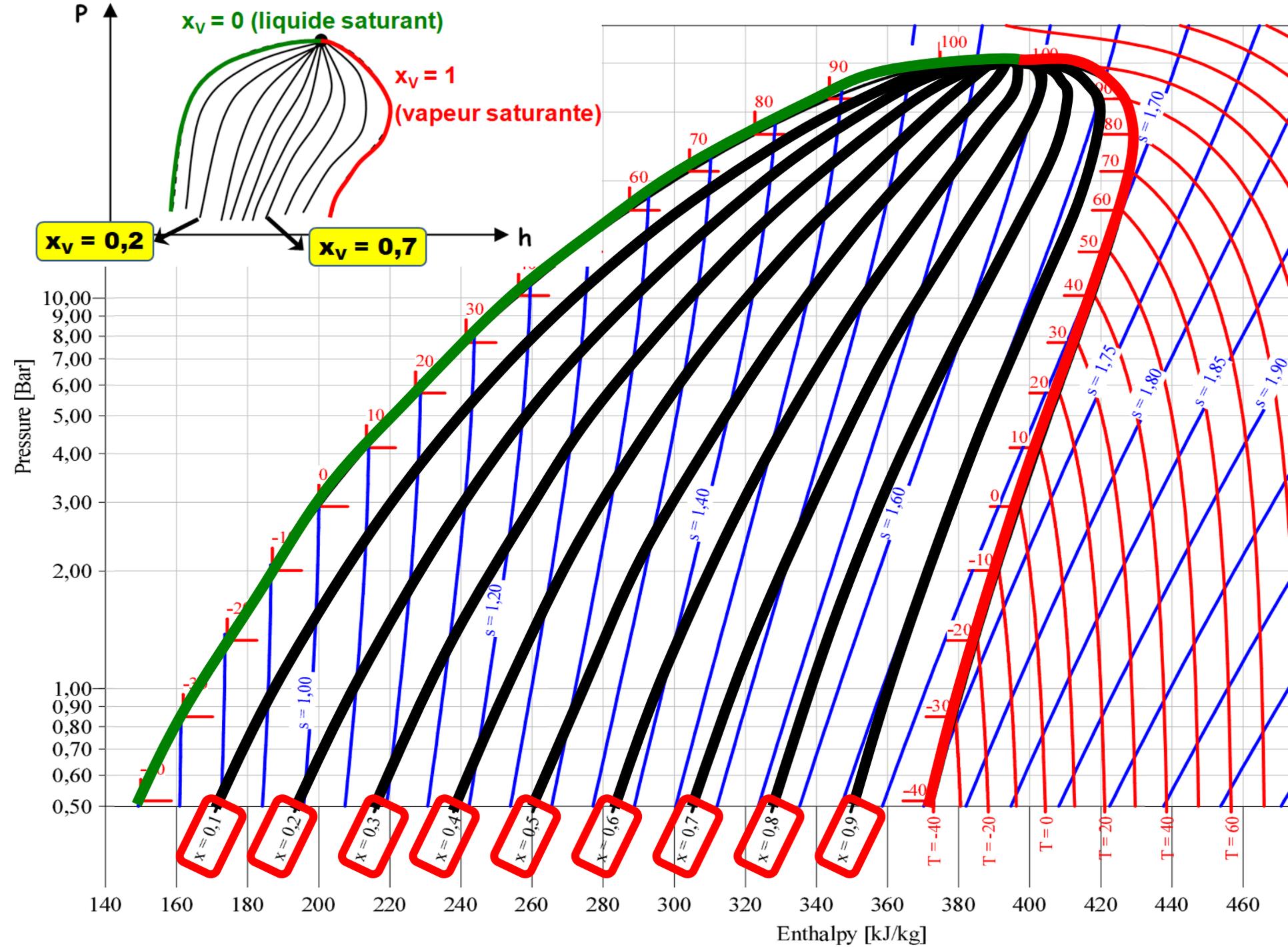
La courbe de SATURATION



Les ISOTITRES

Ce sont les courbes où le titre massique en vapeur (w_V ou x_V) est **CONSTANT**.



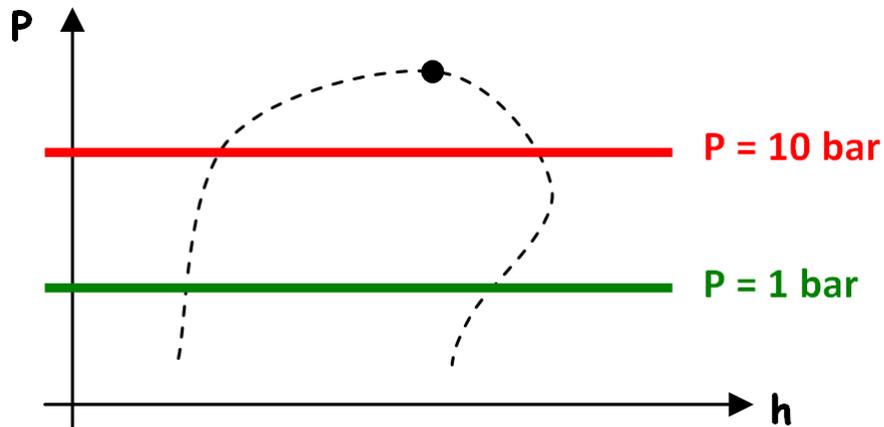
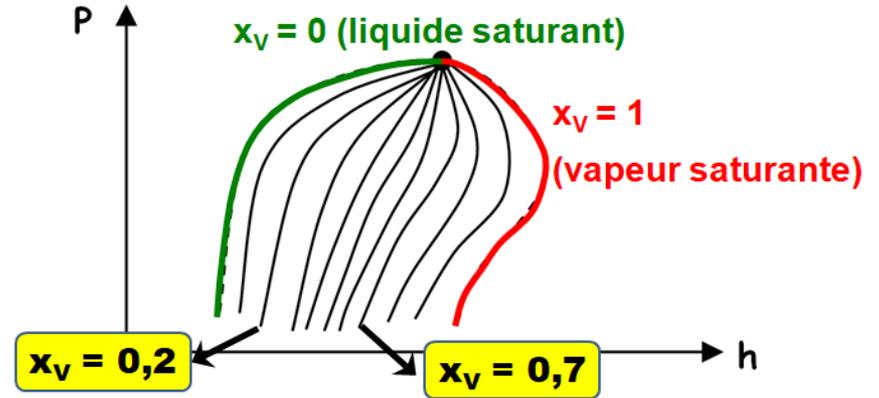


Les ISOTITRES

Ce sont les courbes où le titre massique en vapeur (w_v ou x_v) est **CONSTANT**.

Les ISOBARES

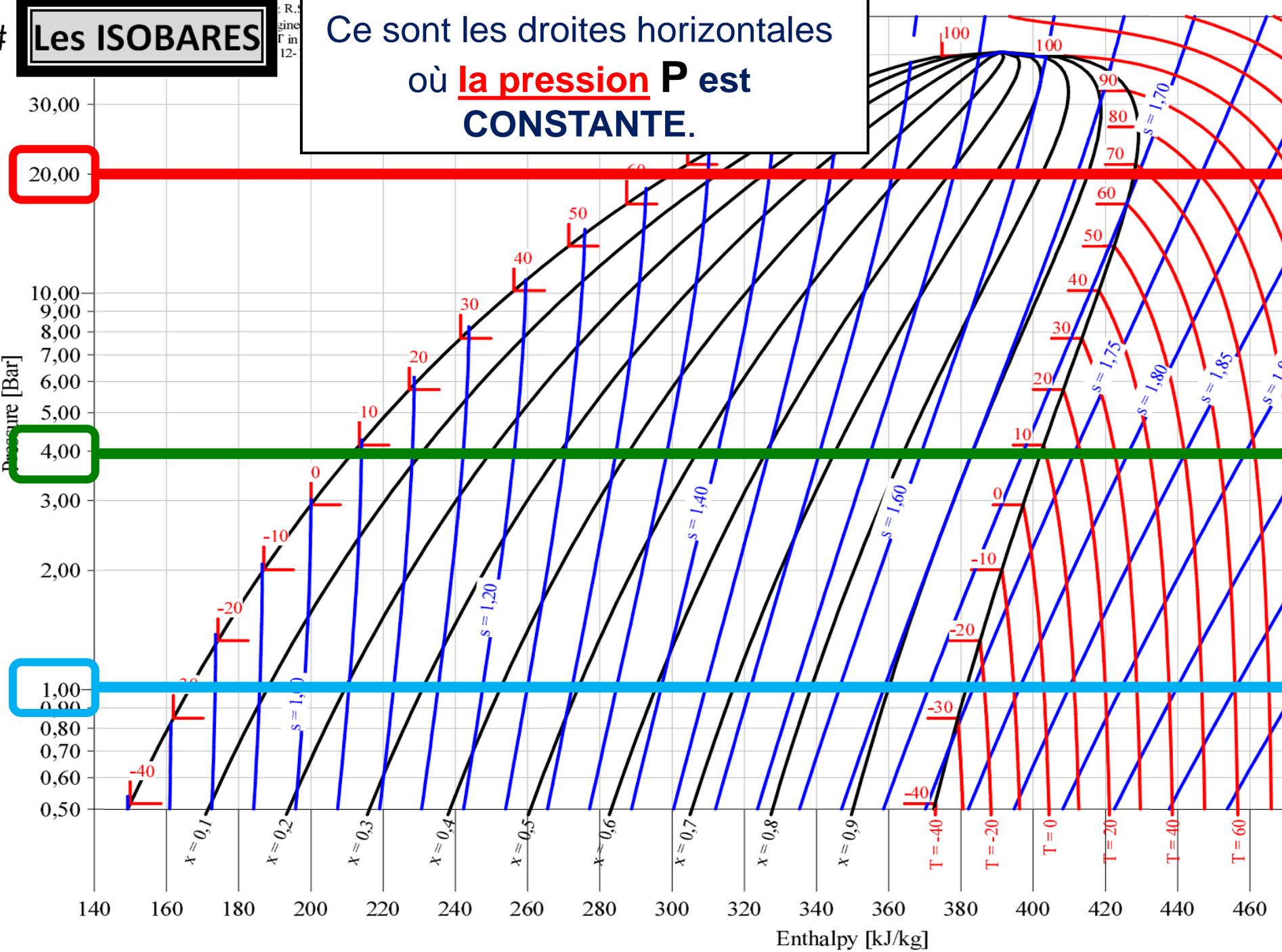
Ce sont les droites horizontales où la pression P est **CONSTANTE**.



#

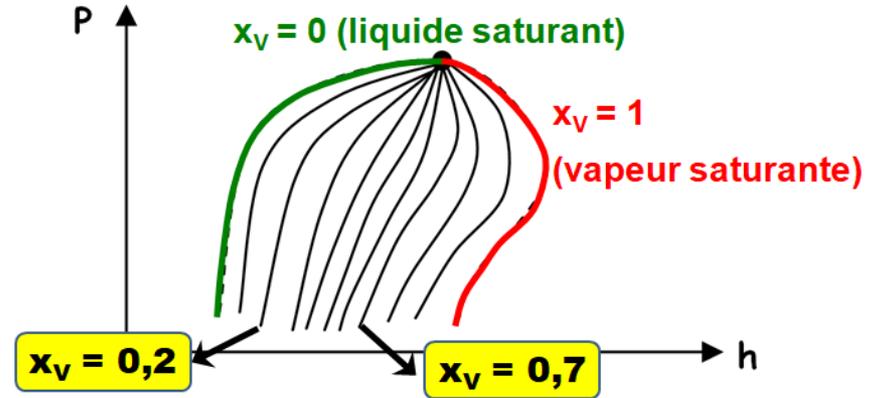
Les ISOBARES

Ce sont les droites horizontales où **la pression P est CONSTANTE.**



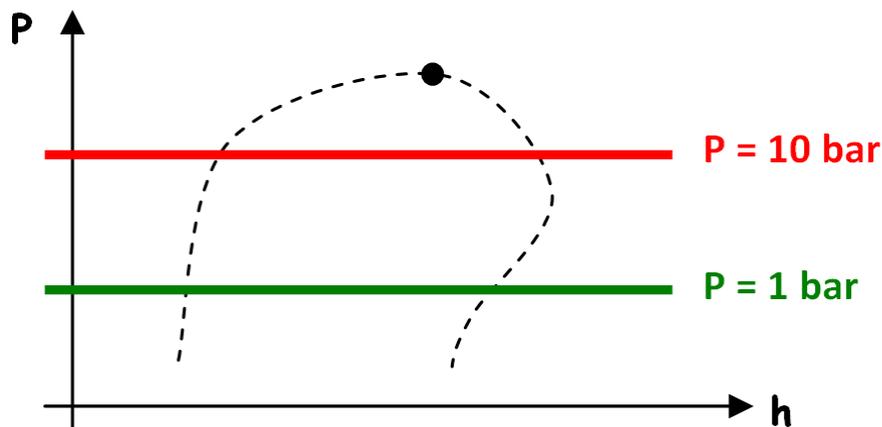
Les ISOTITRES

Ce sont les courbes où le titre massique en vapeur (w_v ou x_v) est **CONSTANT**.



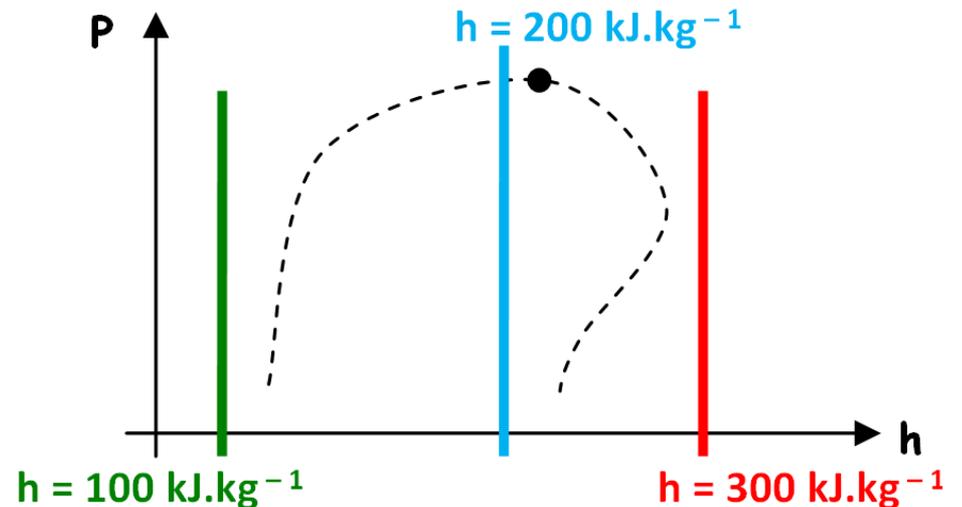
Les ISOBARES

Ce sont les droites horizontales où la pression P est **CONSTANTE**.



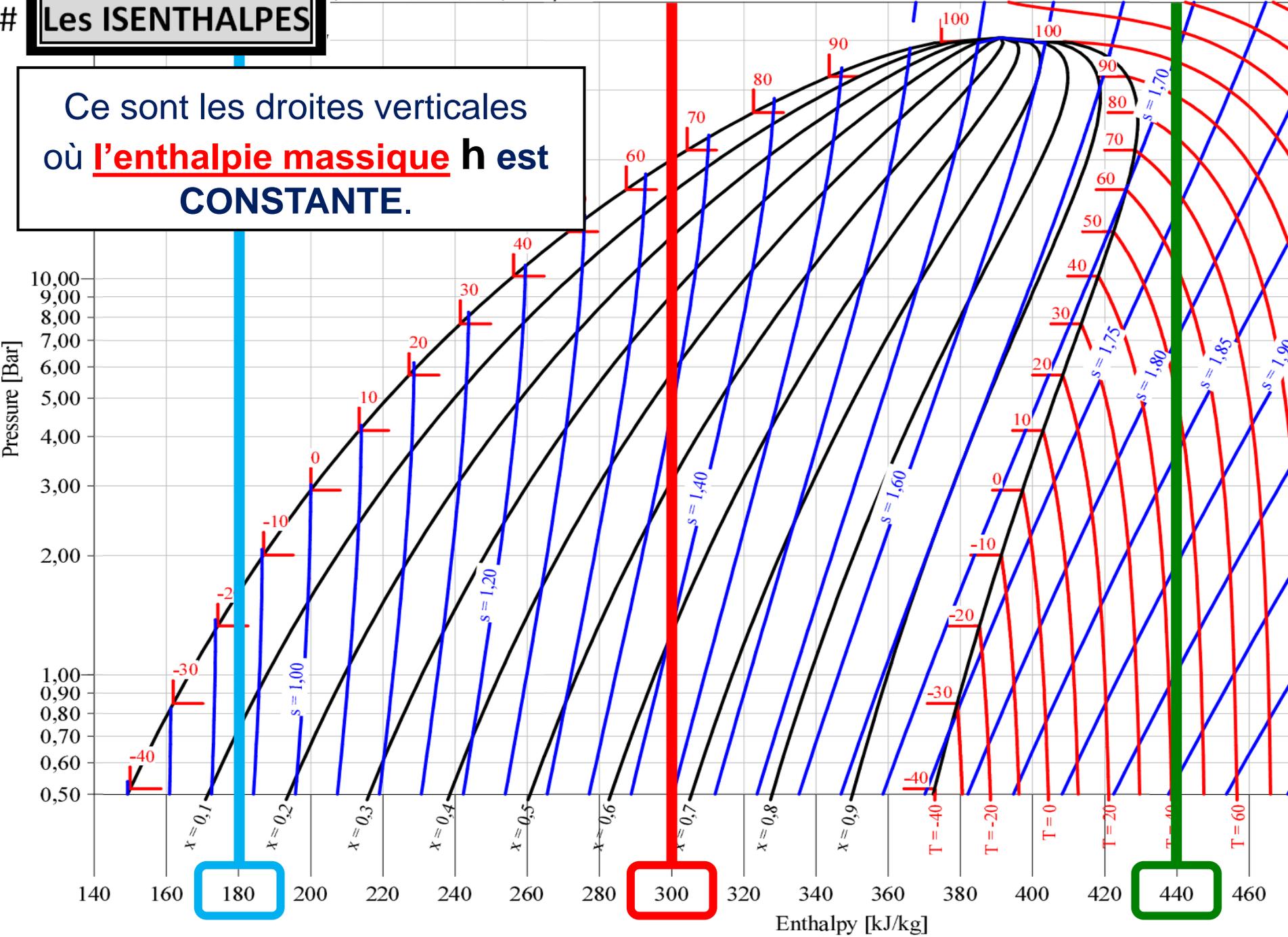
Les ISENTHALPES

Ce sont les droites verticales où l'enthalpie massique h est **CONSTANTE**.



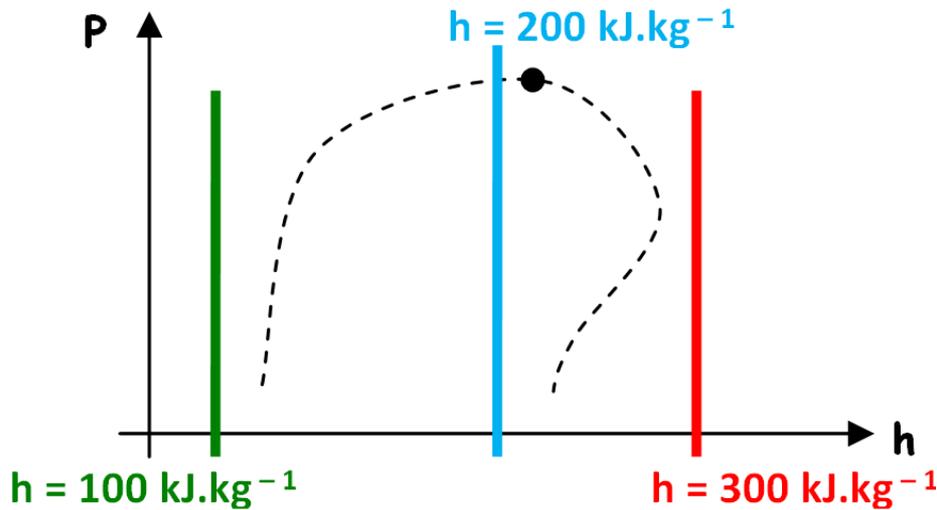
Les ISENTHALPES

Ce sont les droites verticales où l'enthalpie massique h est **CONSTANTE**.



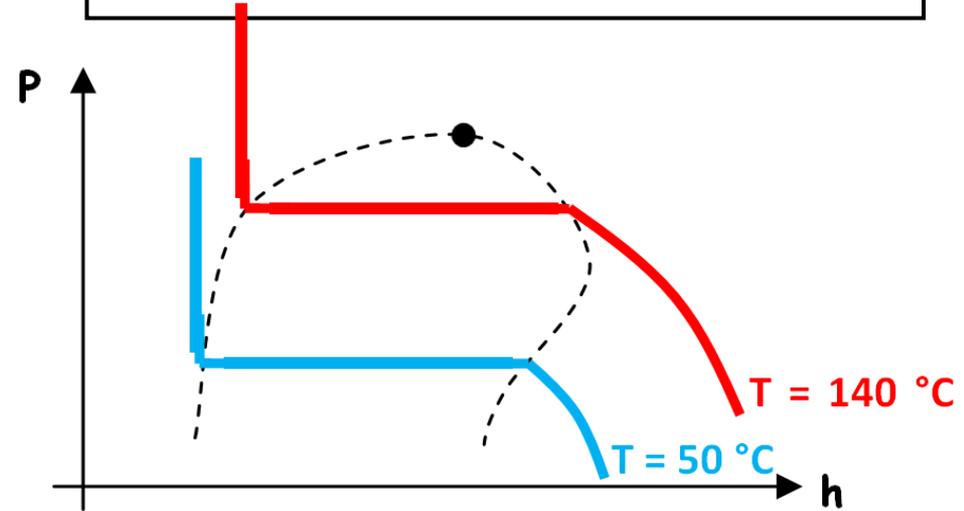
Les ISENTHALPES

Ce sont les droites verticales où l'enthalpie massique h est **CONSTANTE**.



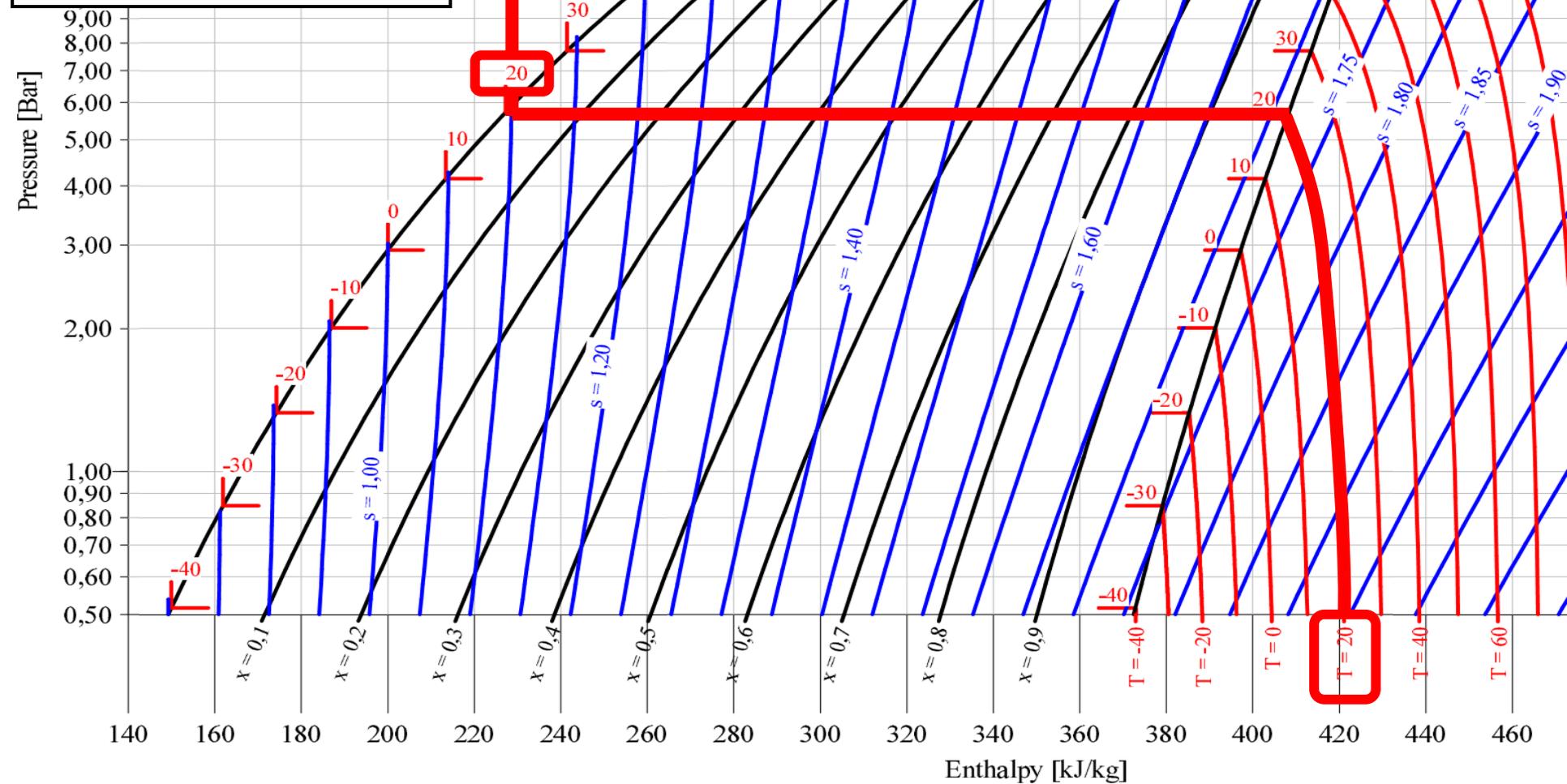
Les ISOTHERMES

Ce sont les courbes où la température T est **CONSTANTE**.



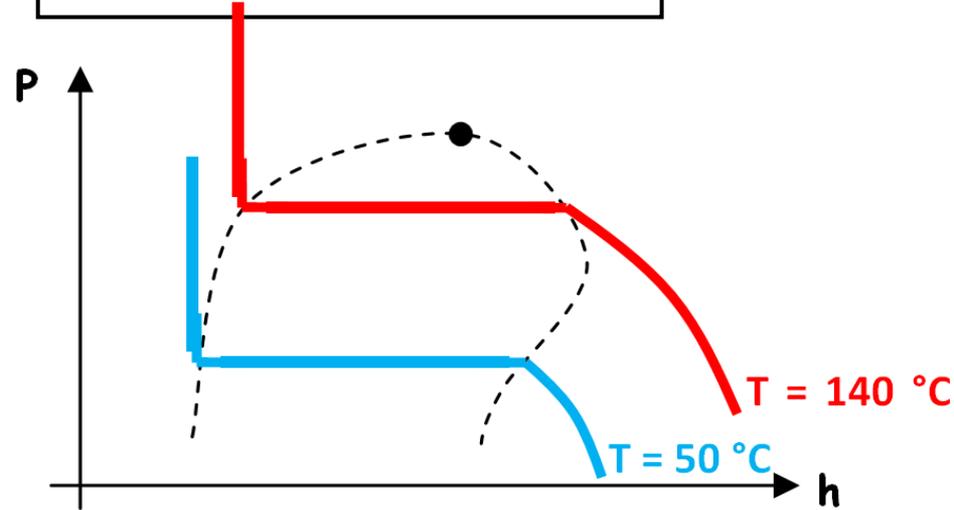
Les ISOTHERMES

Ce sont les courbes où
la température T
est **CONSTANTE**.



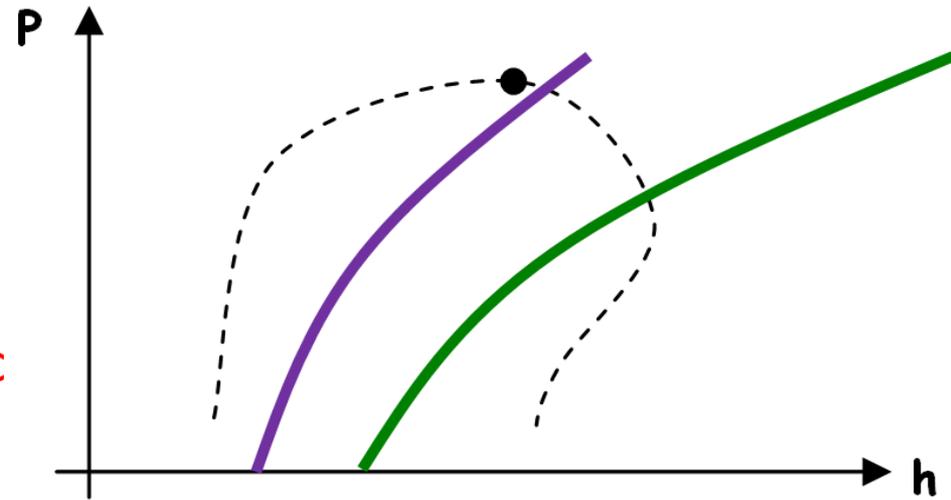
Les ISOTHERMES

Ce sont les courbes où la température T est **CONSTANTE**.



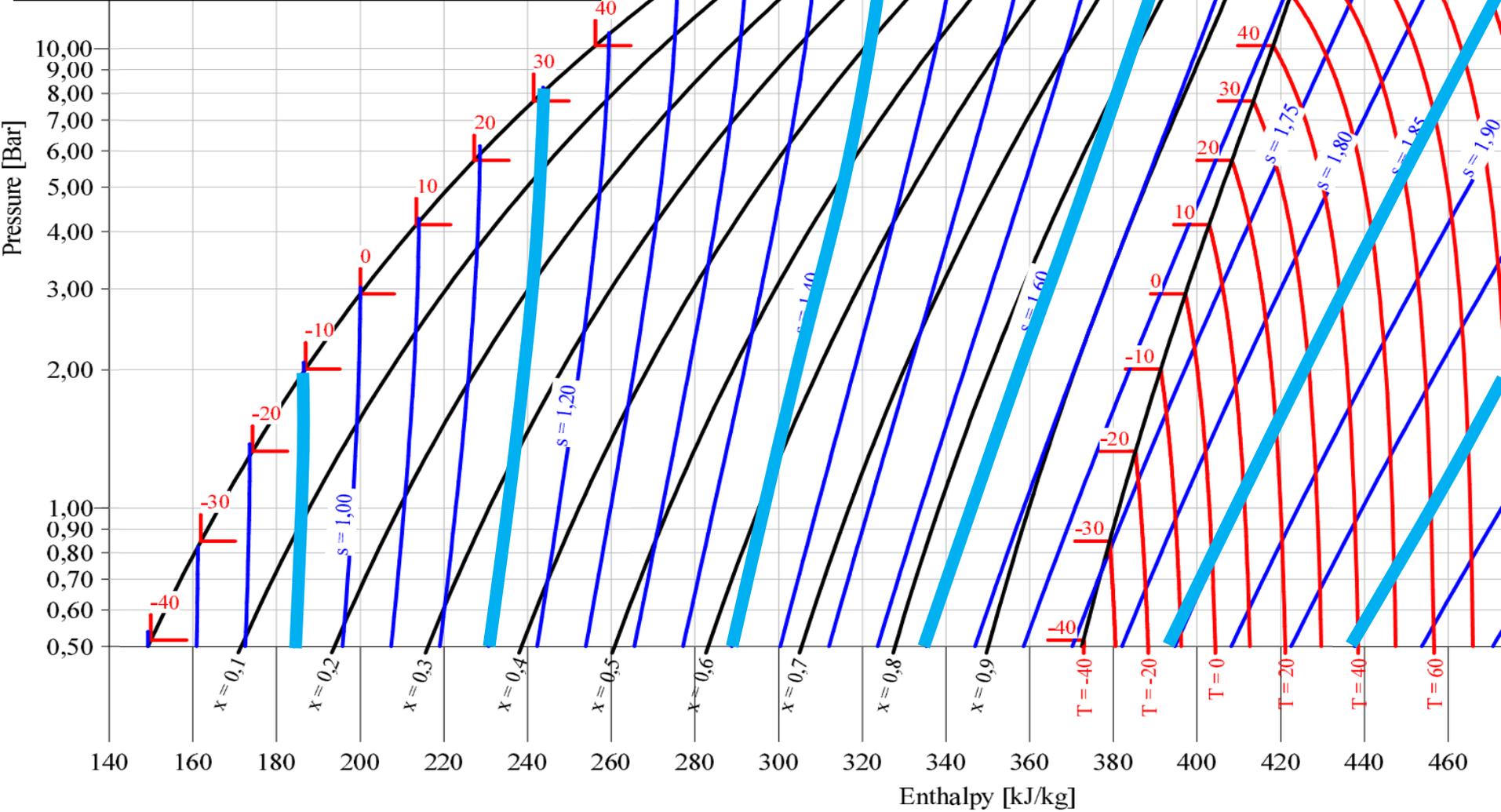
Les ADIABATIQUES réversibles = isentropes

Ce sont les courbes pour lesquelles $Q = 0$. Elles ont une pente positive



Les ADIABATIQUES réversibles = isentropes

Ce sont les courbes pour lesquelles $Q = 0$. Elles ont une pente positive

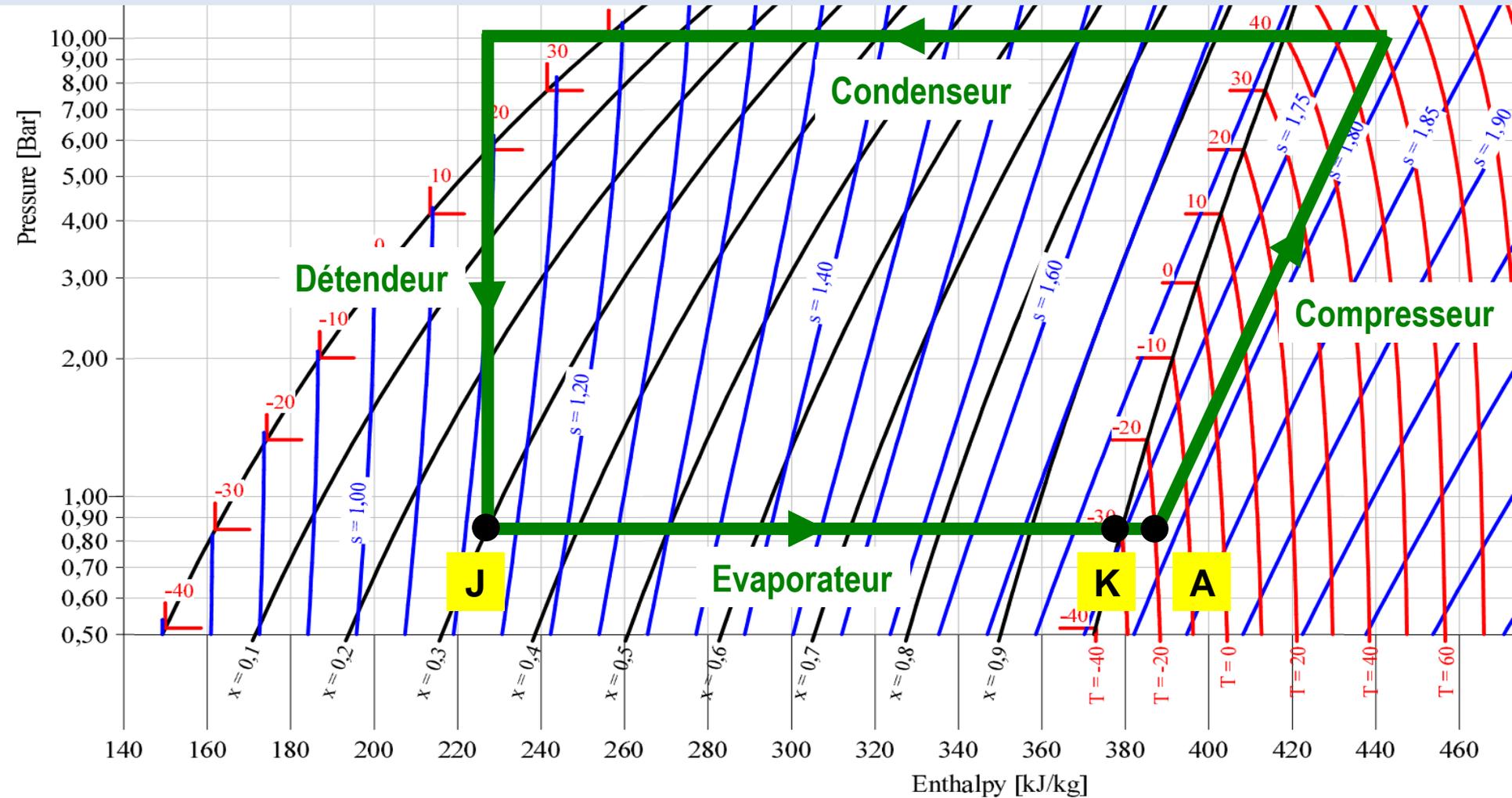


b/ Exemple d'utilisation

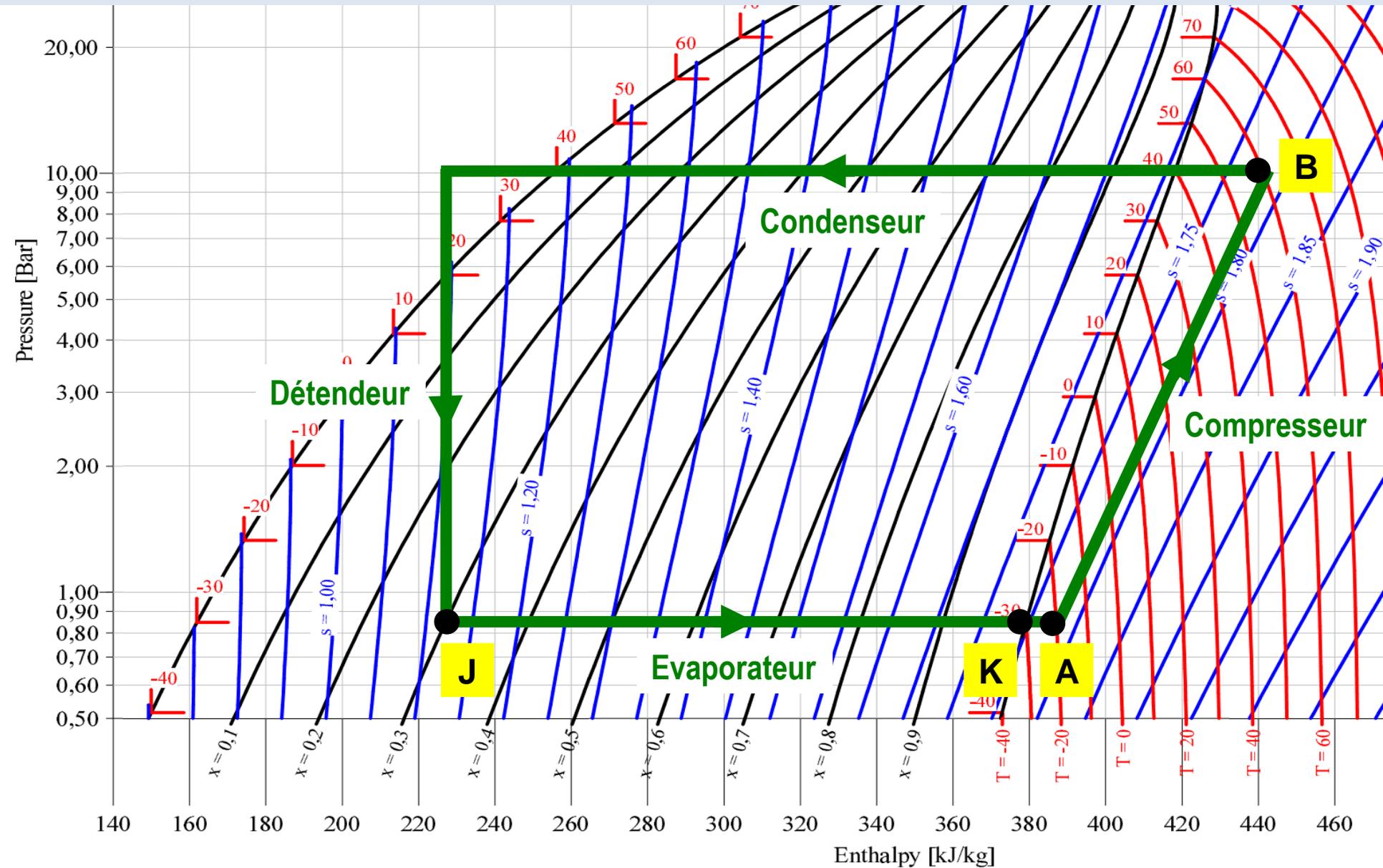
✎ Application 5 : Un frigoriste veut concevoir un congélateur à compression en utilisant comme fluide frigorigène le R134a. Il veut réaliser le cycle suivant :

- **Transformation isobare J → K → A (Evaporateur)** : En **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 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, supposée réversible, dans le compresseur 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** où la température atteint $T_G = 20 \text{ °C}$.
- **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 vaporisation commence au point **H**.

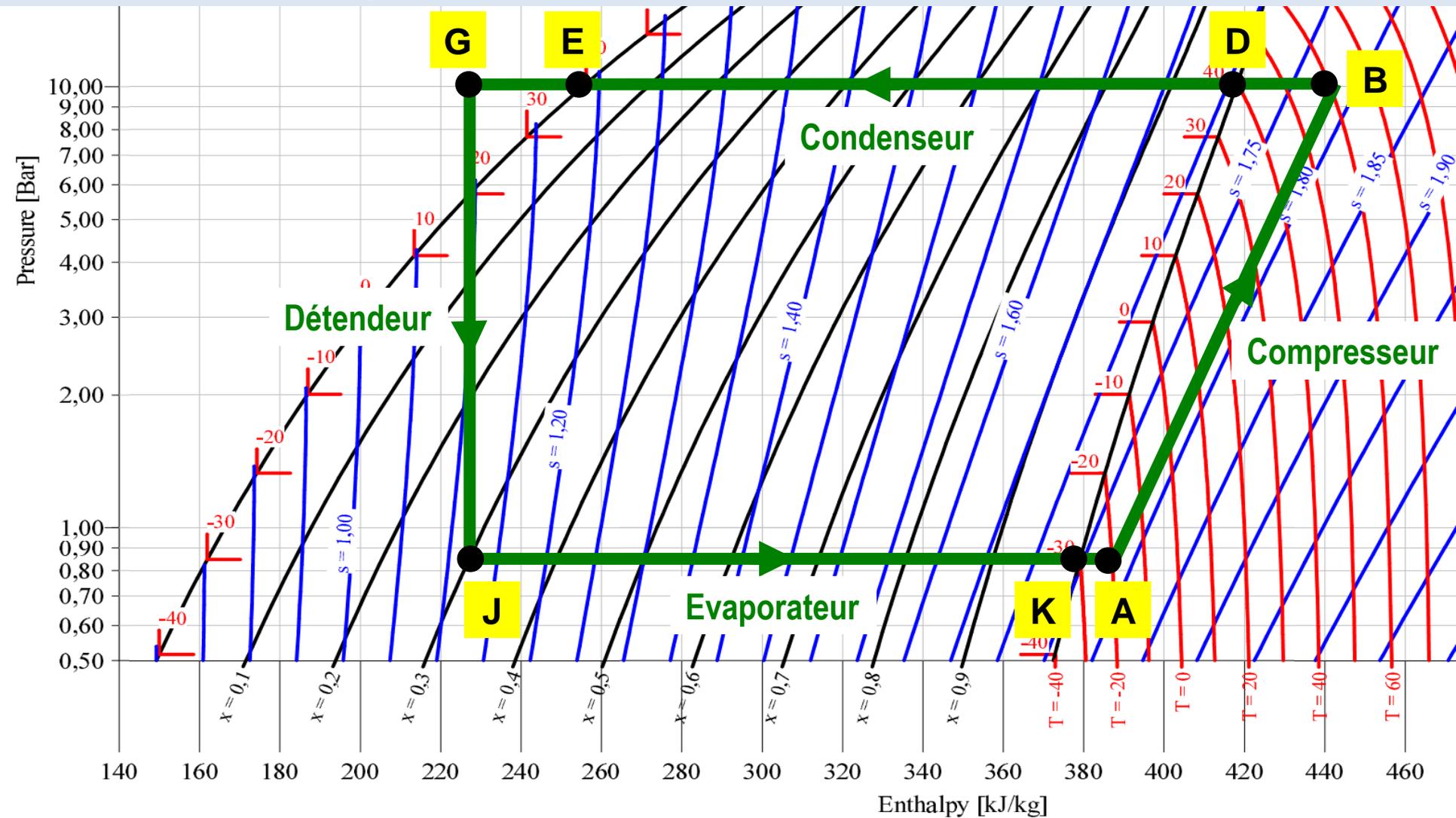
• **Transformation isobare $J \rightarrow K \rightarrow A$ (Evaporateur)** : En **J**, le fluide est sous forme diphasée (70 % de liquide et 30 % de gaz) à la température $T_J = -30^\circ\text{C}$ et à la pression de vapeur saturante P_J . Il est alors complètement vaporisé suivant une transformation 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 $T_A = -20^\circ\text{C}$.



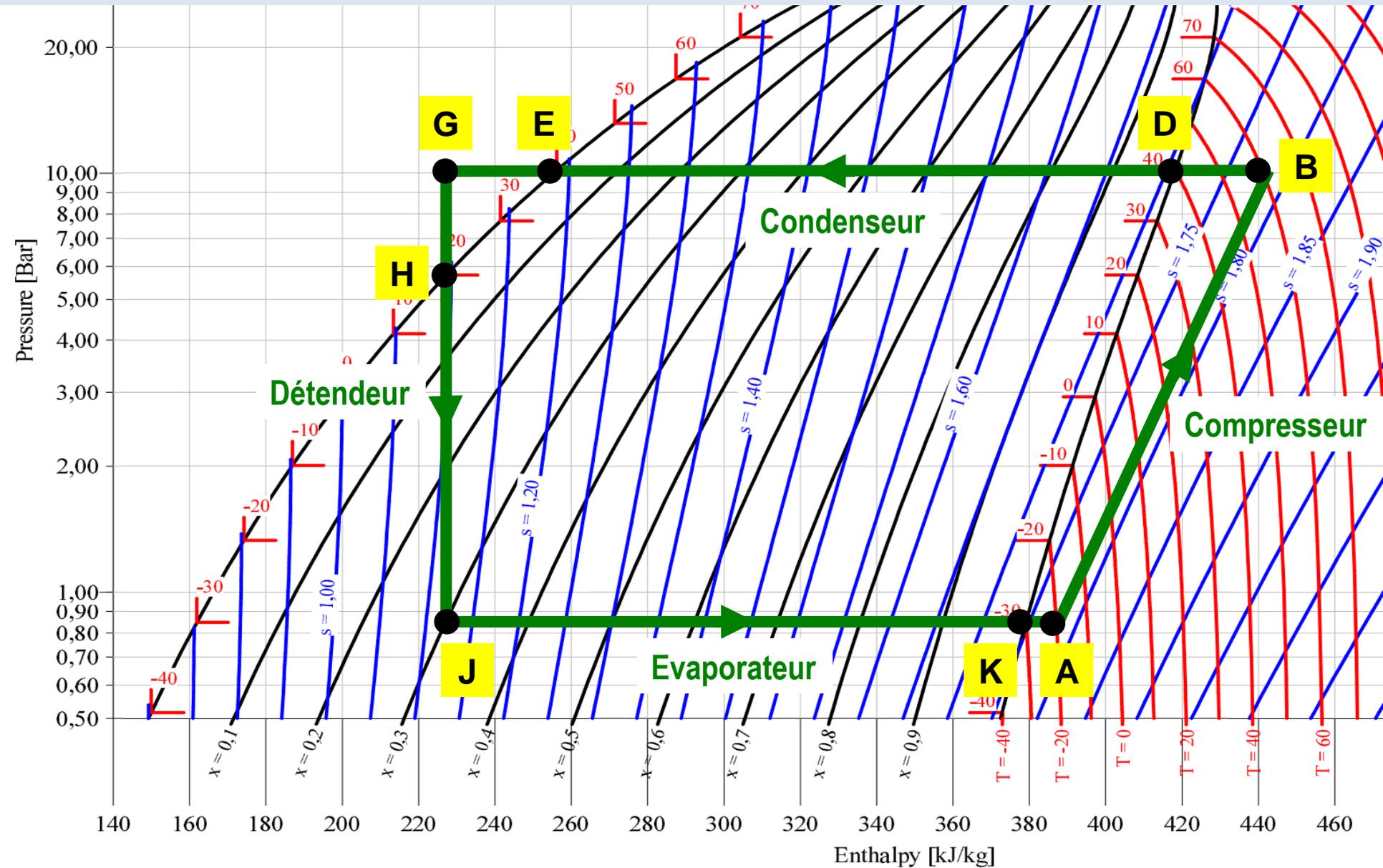
• **Transformation isentropique A → B (Compresseur)** : la vapeur sèche subit une compression adiabatique, supposée réversible, dans le compresseur calorifugé ; il passe ainsi de l'état **A** à l'état **B** où la pression est maximale et vaut $P_B = 10$ bar.



• **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** où la température atteint $T_G = 20\text{ °C}$.



• **Transformation isenthalpique $G \rightarrow H \rightarrow J$ (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 vaporisation commence au point **H**.



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

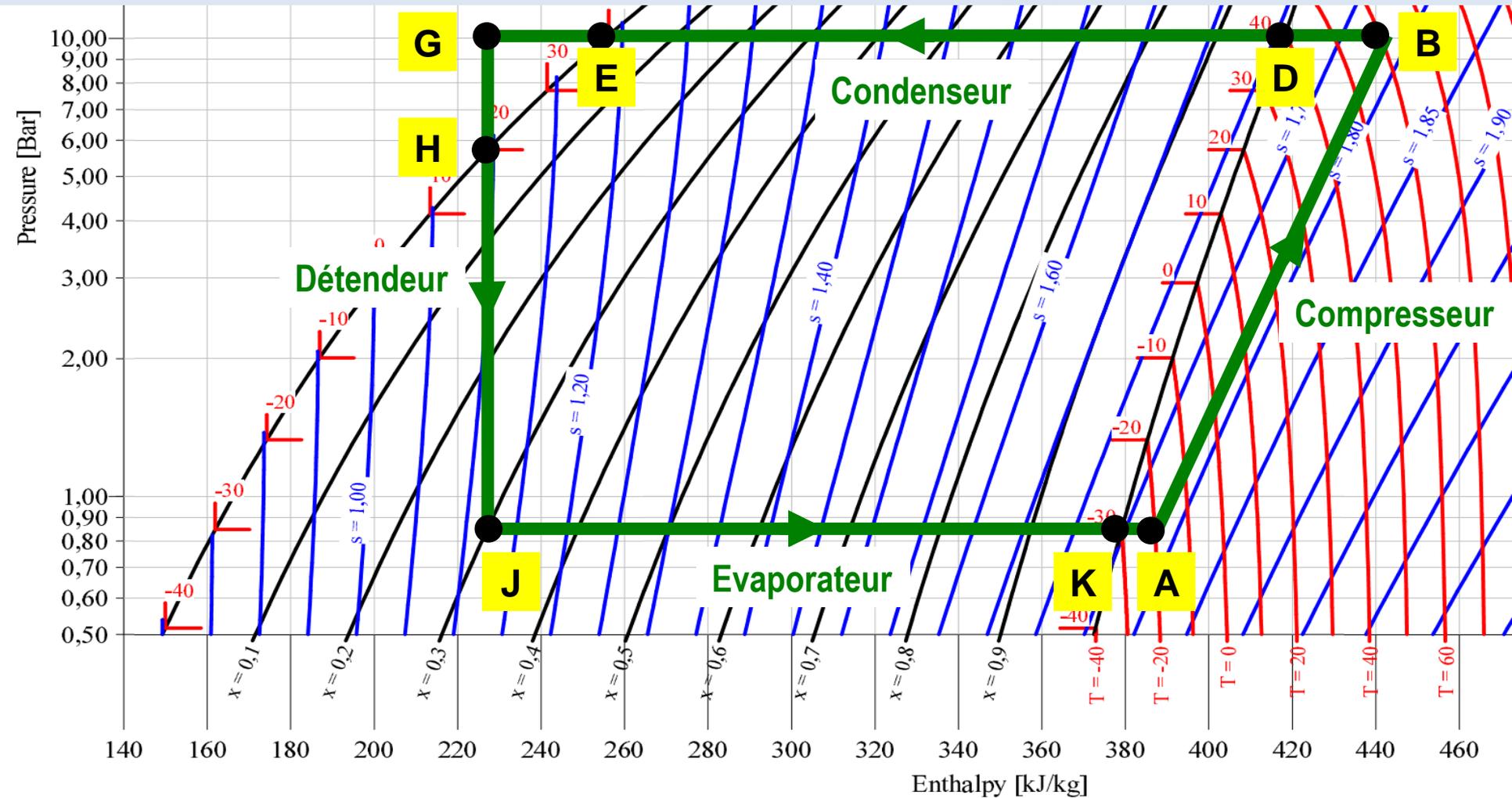
a- la pression de l'évaporateur : $P_{\text{év}} = 0,85 \text{ bar}$

b- la pression du condenseur : $P_{\text{cond}} = 10 \text{ bar}$

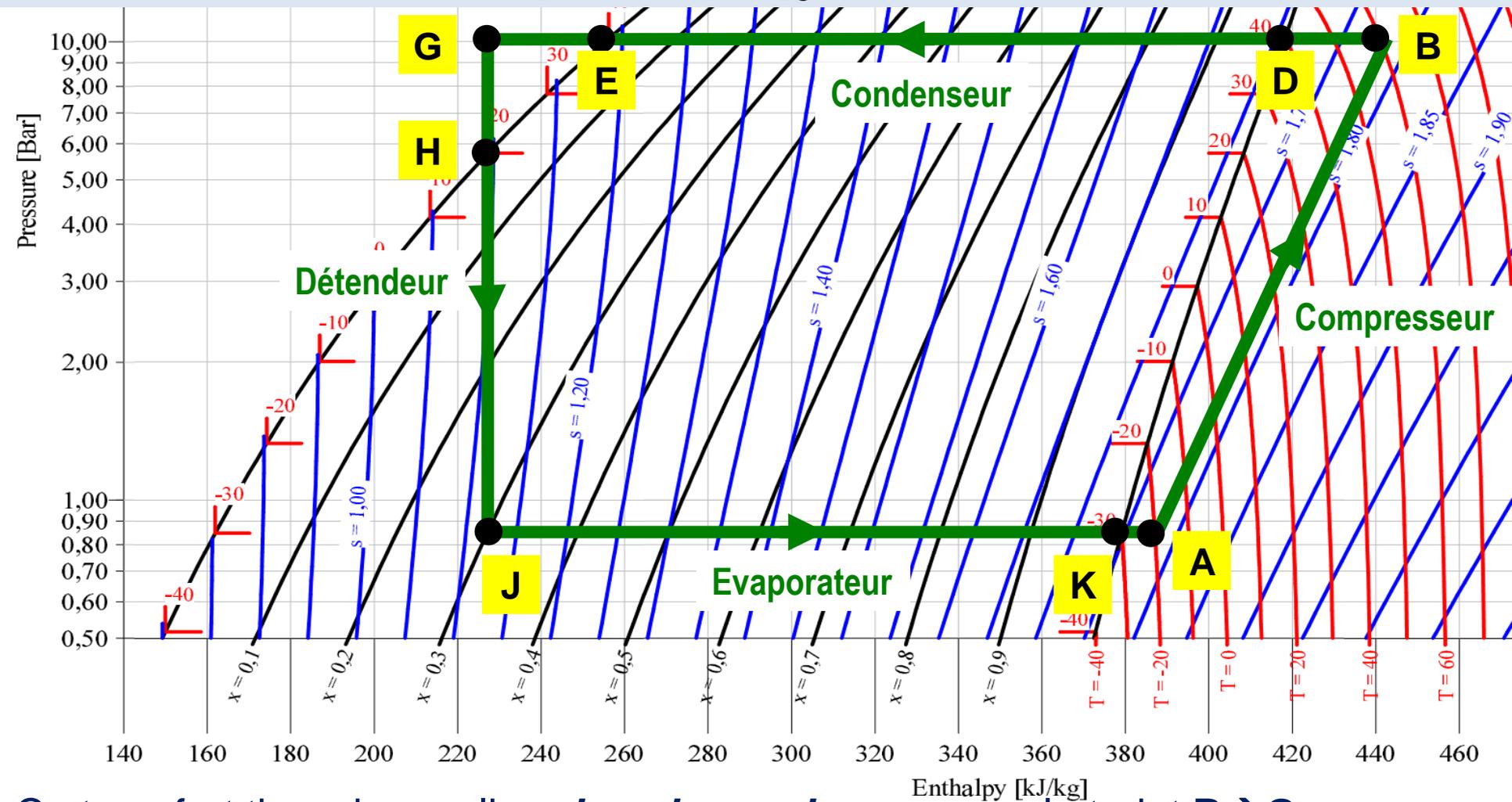
c- le titre en vapeur à l'entrée de l'évaporateur : $x_V = 0,3$

d- la température à la sortie du compresseur : $T_{\text{MAX}} = 60 \text{ °C}$

e- la température à laquelle la condensation a lieu : $T_{\text{COND}} = 40 \text{ °C}$

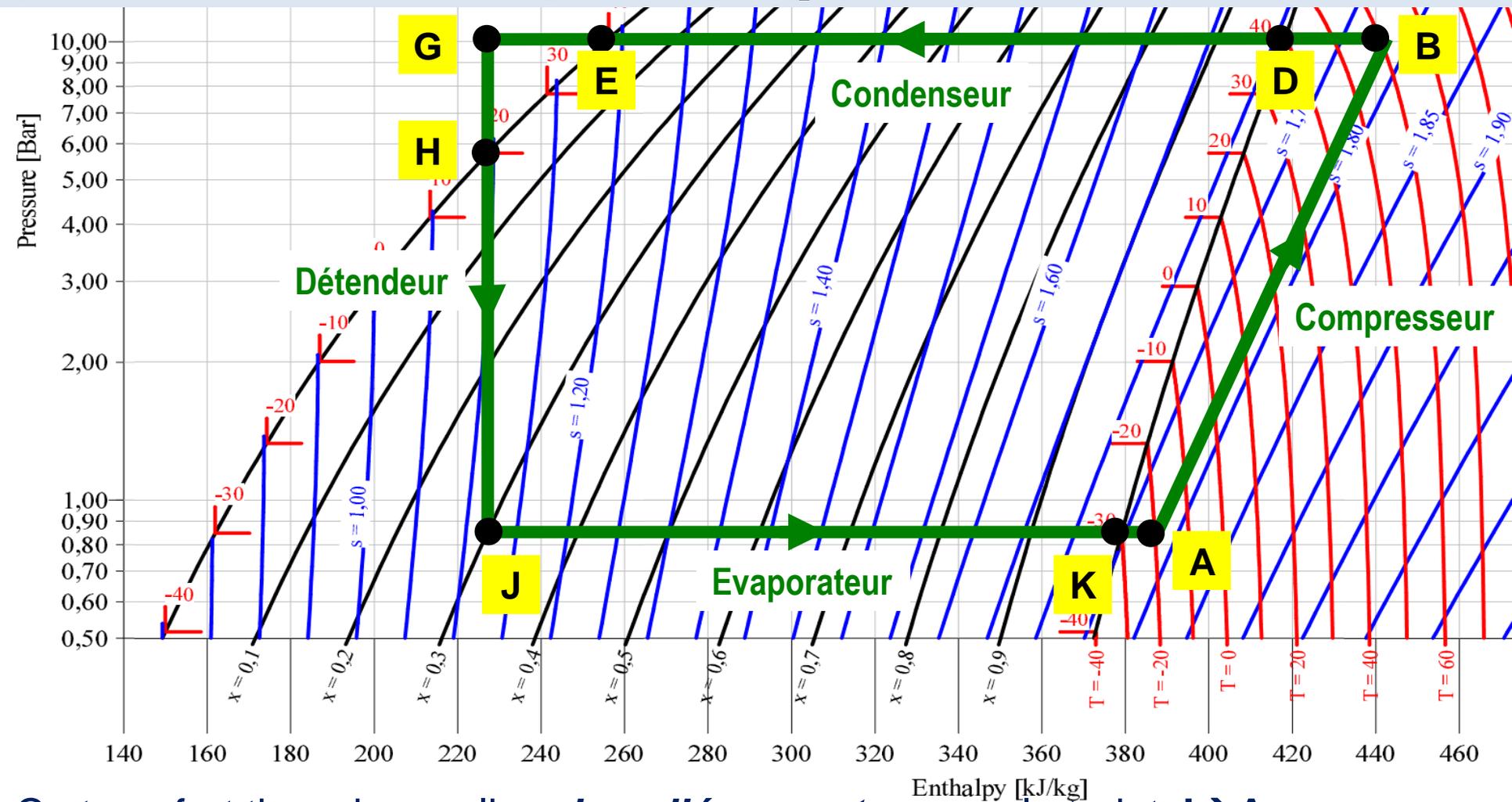


f- la valeur du transfert thermique massique q_c réalisé avec la source chaude :



Ce transfert thermique a lieu dans le condenseur, sur le trajet **B→G**.
 L'application du 1^{er} principe pour un fluide en écoulement stationnaire entre **B** et **G** conduit à la relation : $\Delta h_{B \rightarrow G} = w_{\text{condenseur}} + q_{\text{condenseur}}$.
 Or, il n'y a aucune pièce mobile dans le condenseur, donc $w_{\text{condenseur}} = 0$.
 Donc $q_{\text{condenseur}} = h_G - h_B = 227 - 445 = \underline{\underline{-218 \text{ kJ.kg}^{-1}}} = q_c$

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



Ce transfert thermique a lieu dans l'évaporateur, sur le trajet J→A.

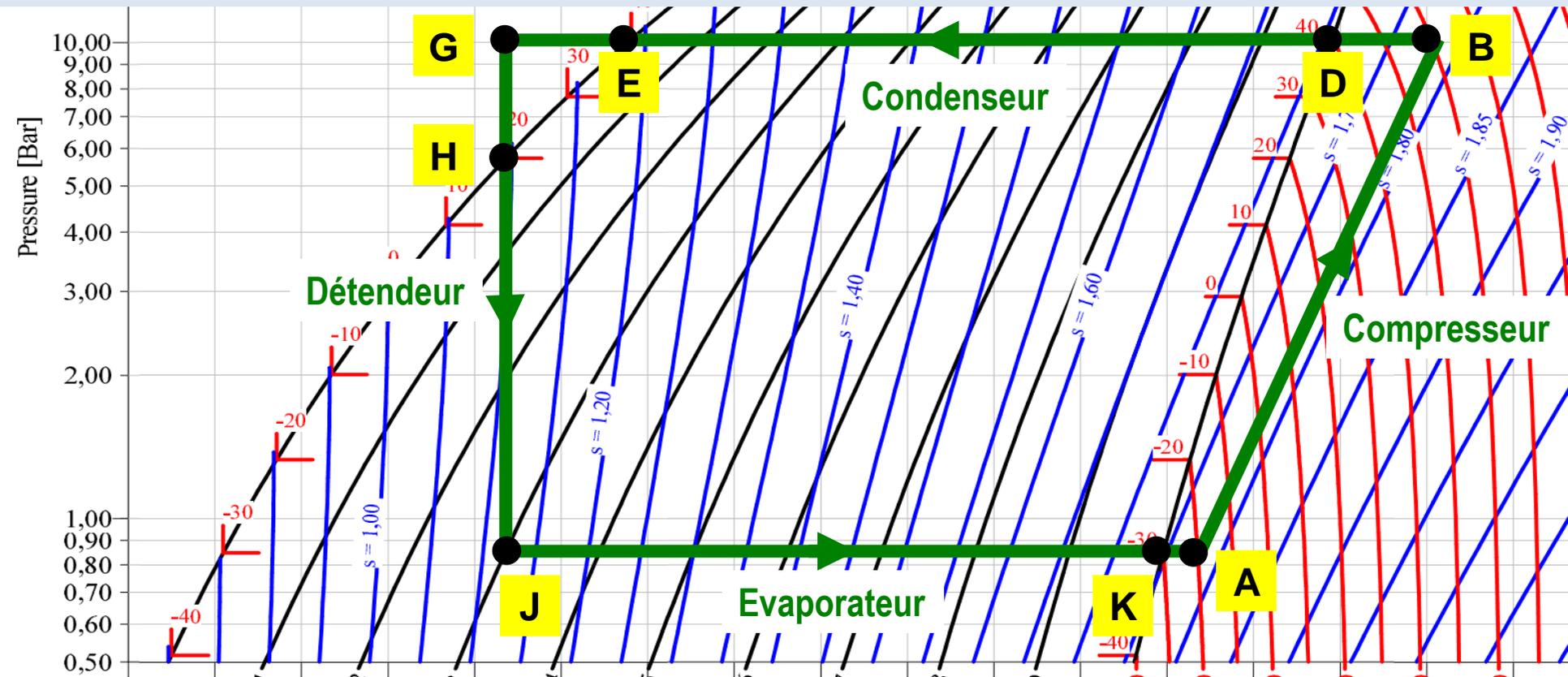
L'application du 1^{er} principe pour un fluide en écoulement stationnaire entre J et

A conduit à la relation : $\Delta h_{J \rightarrow A} = w_{\text{évaporateur}} + q_{\text{évaporateur}}$

Or, il n'y a aucune pièce mobile dans l'évaporateur, donc $w_{\text{évaporateur}} = 0$.

Donc $q_{\text{évaporateur}} = h_A - h_J = 387 - 227 = \underline{160 \text{ kJ.kg}^{-1}} = q_F$

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



- Ce travail n'a lieu que dans le compresseur, qui est le seul organe possédant une pièce mobile. Donc sur le trajet $A \rightarrow B$.
- L'application du 1^{er} principe pour un fluide en écoulement stationnaire entre **A** et **B** conduit à la relation : $\Delta h_{A \rightarrow B} = w_{\text{compresseur}} + q_{\text{compresseur}}$
- La compression étant adiabatique, $q_{\text{compresseur}} = 0$.
- Donc $w_{\text{compresseur}} = h_B - h_A = 445 - 387 = \underline{58 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

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

- Ce travail n'a lieu que **dans le compresseur**, qui est le seul organe possédant une pièce mobile. Donc sur le trajet **A→B**.
- L'application du 1^{er} principe pour un fluide en écoulement stationnaire entre **A** et **B** conduit à la relation : $\Delta h_{A \rightarrow B} = w_{\text{compresseur}} + q_{\text{compresseur}}$.
- La compression étant adiabatique, $q_{\text{compresseur}} = 0$.
- Donc $w_{\text{compresseur}} = h_B - h_A = 445 - 387 = \underline{58 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

i- l'efficacité e de ce congélateur :

$$e = \frac{Q_F}{W}$$

$$e = \frac{160}{58}$$

$$\text{Soit } e = \underline{2,8}$$

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

$$e_{\text{MAX}} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

$$e_{\text{MAX}} = \frac{255}{293 - 255}$$

$$\text{Soit } e_{\text{MAX}} = \underline{6,7} \quad (\text{On a bien } e < e_{\text{MAX}})$$