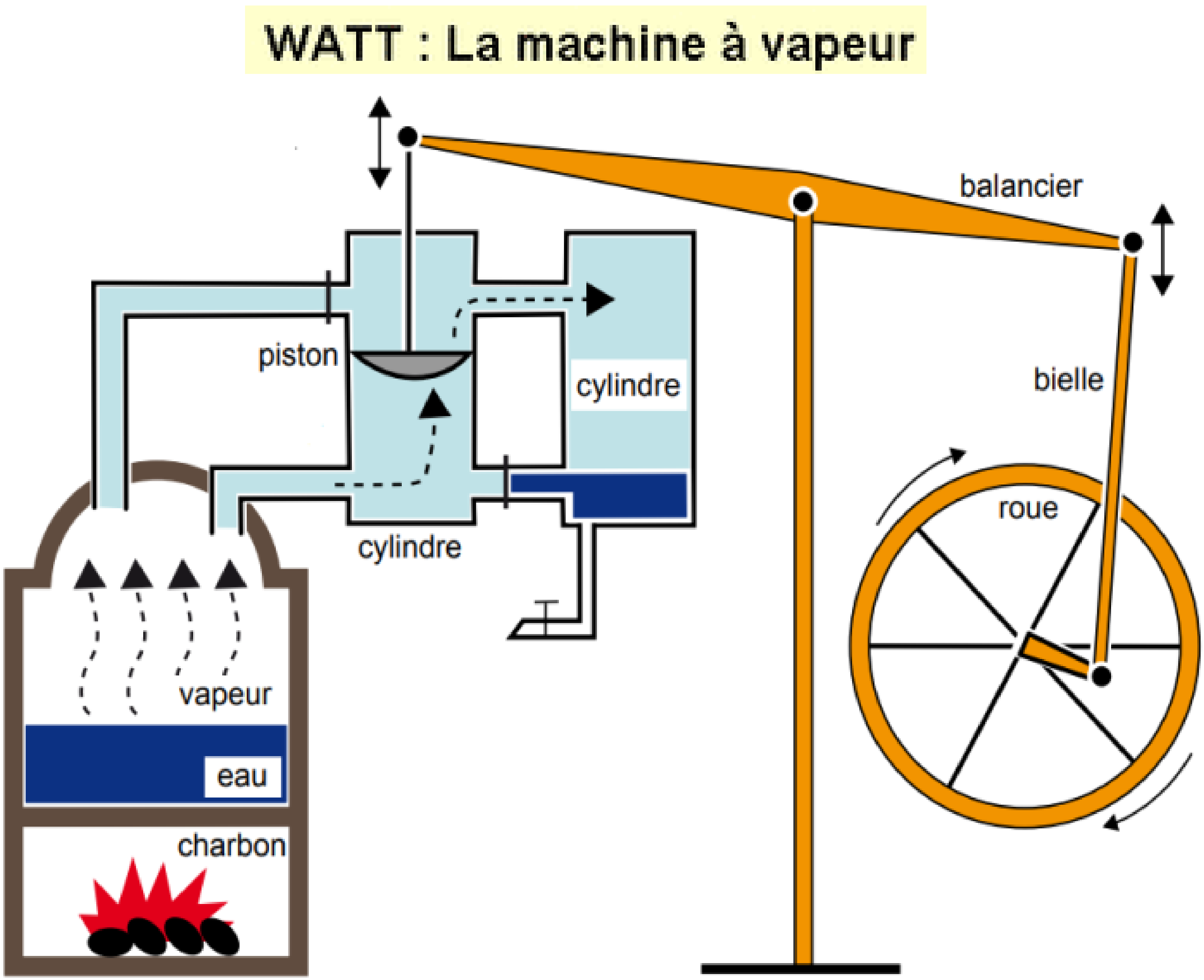
Cours Physique 12 **BCPST 1C**

- 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.*

- *Machines thermiques* -





I- Généralités sur les machines thermiques

1) Définition

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

- ***De l'énergie THERMIQUE en énergie MECANIQUE*** : on parle de **MOTEUR thermique**
- ***De l'énergie MECANIQUE 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 $T_F < T_C$.

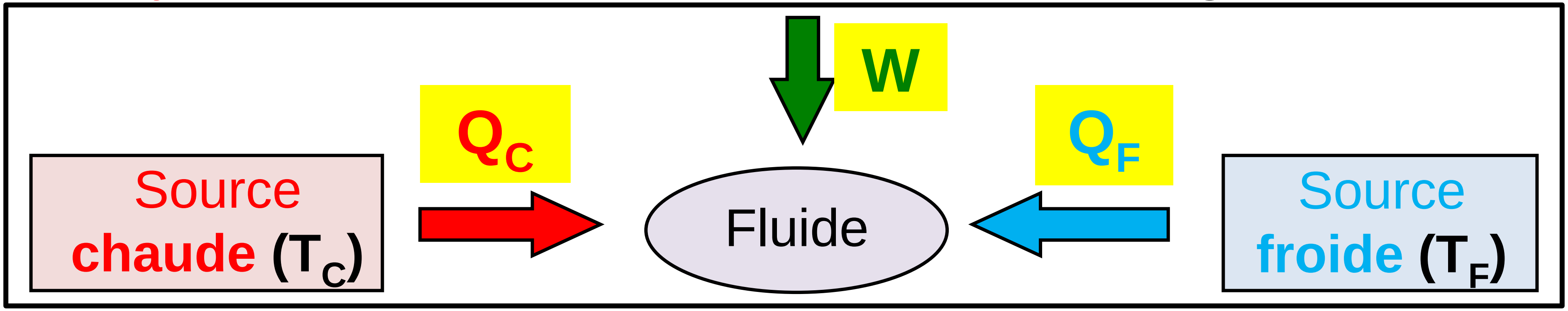
Dans la suite, on s'intéressera aux ***machines <u>DITHERMES</u>*** :

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

<u>Schématisation conventionnelle d'une machine ditherme</u> :

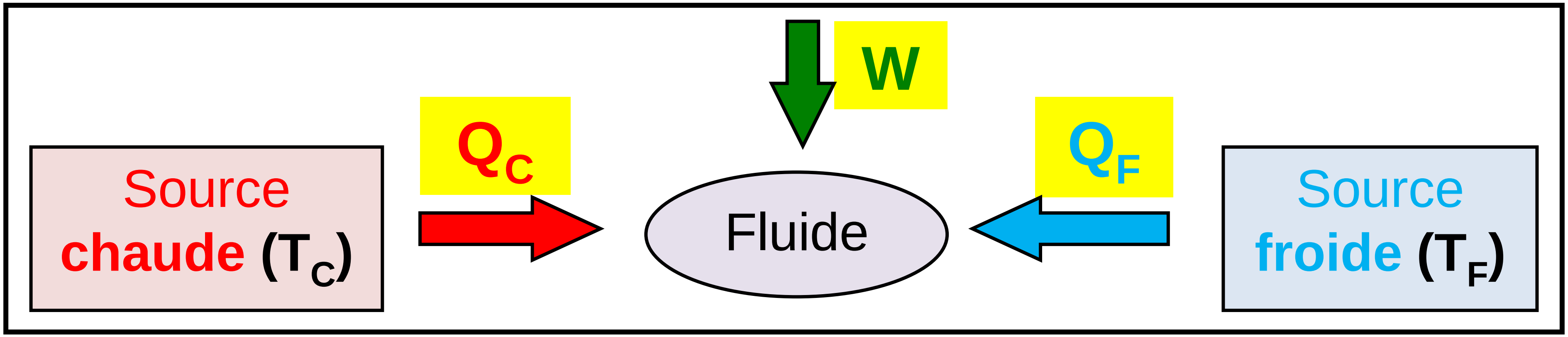
W, Q_C et Q_F = ***<u>grandeurs algébriquement</u>*** **<u>reçues</u>** par le système :

- ***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 **<u>MOTEUR thermique</u>** 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 **RECEPTEUR 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 1er principe de la thermodynamique

Lien entre **W**, Q_C, Q_F et ΔU

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

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

$$\boxed{W + Q_C + Q_F = 0}$$

b/ Inégalité de Clausius

Lien entre Q_C, Q_F, T_C et T_F

a/ Utilisation du 1er principe de la thermodynamique

Lien entre **W**, $\mathbf{Q_C}$, $\mathbf{Q_F}$ et $\mathbf{\Delta U}$

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

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

$$\boxed{W + Q_C + Q_F = 0}$$

b/ Inégalité de Clausius

Lien entre $\mathbf{Q_C}$, $\mathbf{Q_F}$, $\mathbf{T_C}$ et $\mathbf{T_F}$

en **Joule** **(J)**

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

en **Kelvin** **(K)**

*L'**EGALITE** correspond au **cas idéal d'une machine thermique fonctionnant de manière réversible**.*

c/ Rendement ou efficacité d'une machine ditherme

η

pour les **MOTEURS**

e

pour les **RECEPTEURS**

Lien entre $\mathbf{Q_C}$, $\mathbf{Q_F}$ et **W**

b/ Inégalité de Clausius

Lien entre $\mathbf{Q_C}$, $\mathbf{Q_F}$, $\mathbf{T_C}$ et $\mathbf{T_F}$

en **Joule** (J)

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

en **Kelvin** (K)

*L'**EGALITE** correspond au **<u>cas idéal d'une machine thermique fonctionnant de manière réversible</u>**.*

c/ Rendement ou efficacité d'une machine ditherme

η pour les **MOTEURS**

e pour les **RECEPTEURS**

Lien entre $\mathbf{Q_C}$, $\mathbf{Q_F}$ et **W**

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

Energie désirée, Energie à fournir : en **Joule** (J)

η ou e : **Sans unité** (pourcentage)

<u>Vocabulaire</u> :

*# Energie « **désirée** » = Energie « **utile** »*

*# Energie « **à fournir** » = Energie « **coûteuse** »*

c/ Rendement ou efficacité d'une machine ditherme

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

Sans unité (pourcentage)

en Joule (J)

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

II- Exemples de machines thermiques dithermes

1) Les moteurs thermiques

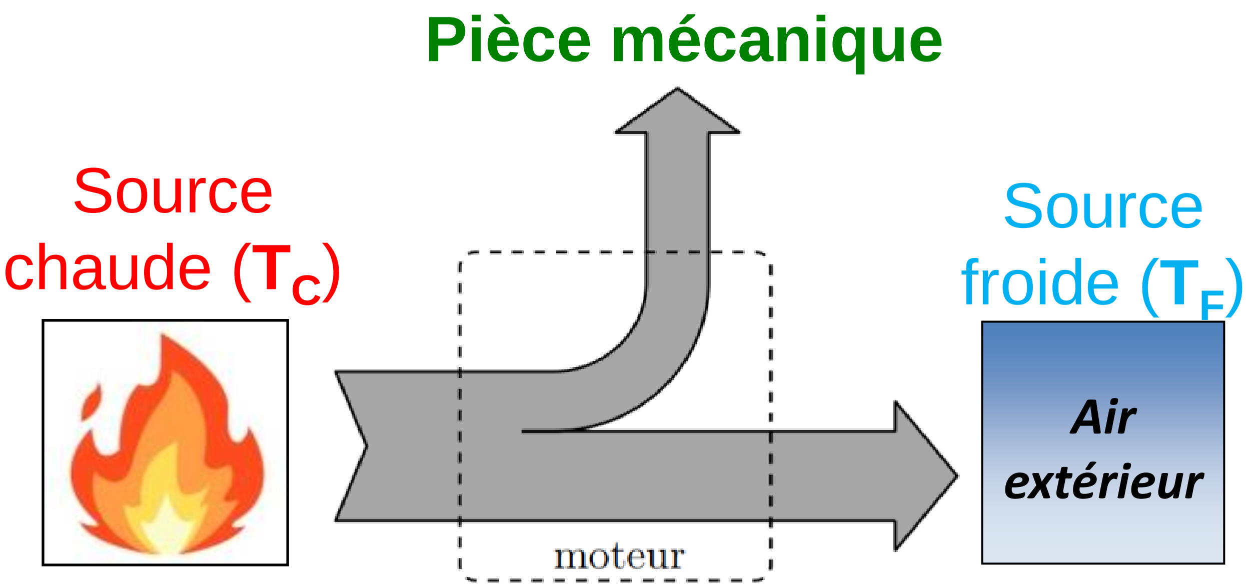
a/ Principe de fonctionnement

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

Mouvement d'une pièce mécanique

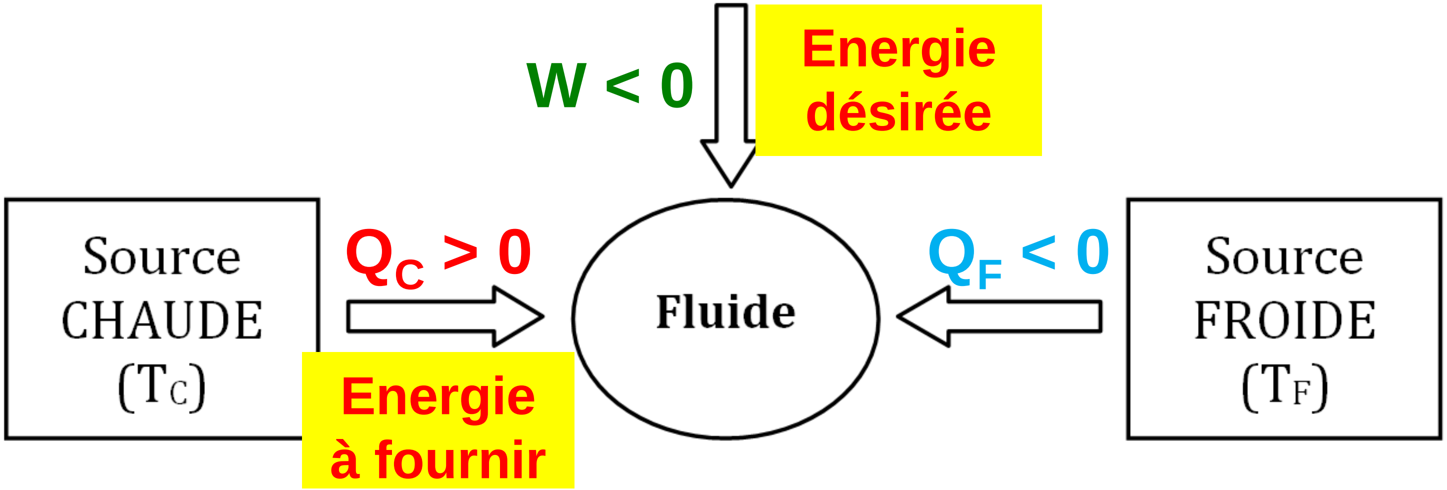
1) Les moteurs thermiques

a/ Principe de fonctionnement



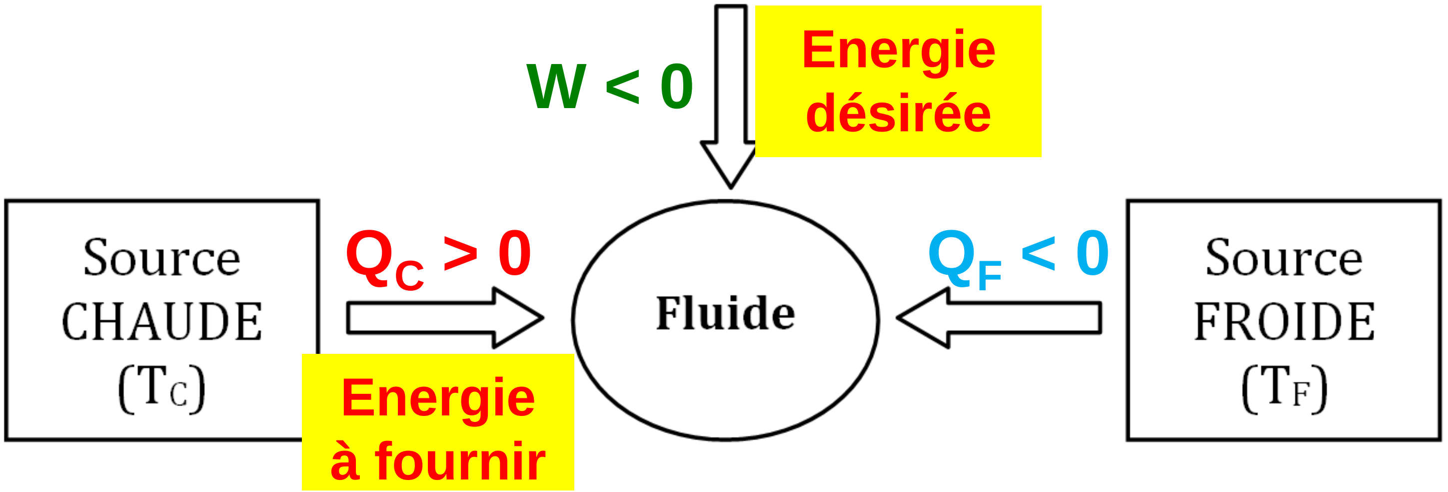
Schématisation conventionnelle d'un MOTEUR ditherme

(signes indiqués du point de vue du fluide)



<u>Schématisation conventionnelle d'un MOTEUR ditherme</u>

(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* ***<u>TRAVAIL ELECTRIQUE</u>****.*

b/ Rendement d'un moteur ditherme

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

Par définition, $\eta = \dfrac{-W}{Q_C}$ et $W + Q_C + Q_F = 0$ $\Leftrightarrow \eta = \dfrac{Q_C + Q_F}{Q_C}$

$$\Leftrightarrow \boxed{\eta = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}}$$

☛ ***Utilisation du 1^er^ principe de la thermodynamique*** :

Par définition, $\eta = \dfrac{-W}{Q_C}$ et $W + Q_C + Q_F = 0$ $\Leftrightarrow \eta = \dfrac{Q_C + Q_F}{Q_C}$

$$\Leftrightarrow \boxed{\eta = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}}$$

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

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

$$\Leftrightarrow \boxed{\underbrace{1 + \frac{Q_F}{Q_C}}_{\eta} \leq \underbrace{1 - \frac{T_F}{T_C}}_{\eta_{MAX}}} < 1$$

☛ ***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**.

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

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

$$\Leftrightarrow \boxed{\underbrace{1 + \frac{Q_F}{Q_C}}_{\eta} \leq \underbrace{1 - \frac{T_F}{T_C}}_{\eta_{MAX}}} < 1$$

☛ ***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 °C *et* T_C = 500 °C.

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

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

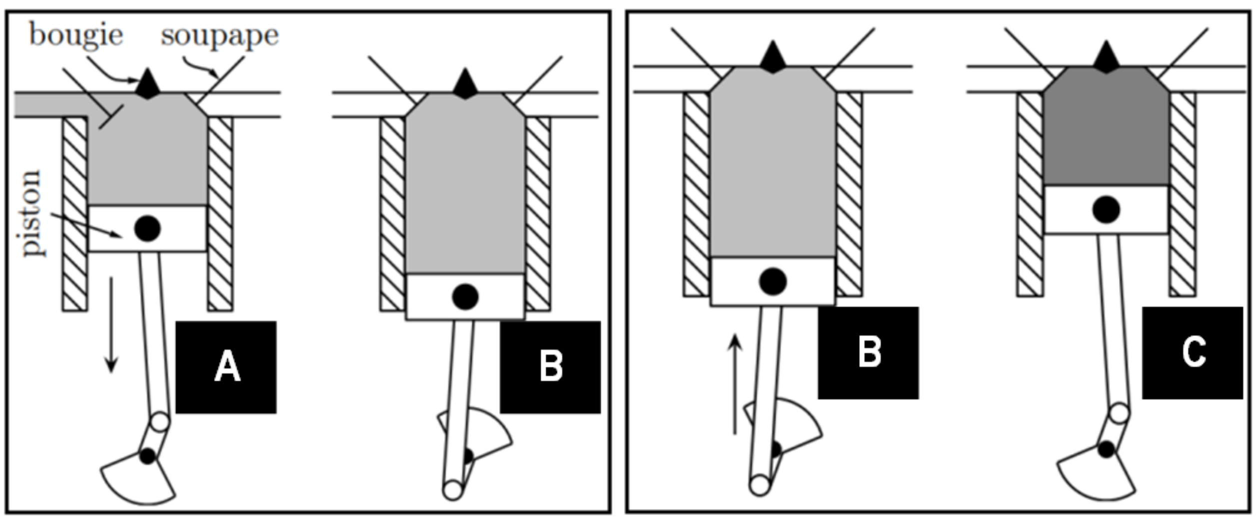
☛ ***Commentaires*** **:** Le **rendement maximal** η_{max} **d'un moteur ditherme fonctionnant de manière réversible** (appelé ***rendement de Carnot***) est **strictement inférieur à 100 %**. Il ne dépend que de T_F et de T_C et il est **d'autant plus grand que l'écart entre T_C et T_F est grand**.

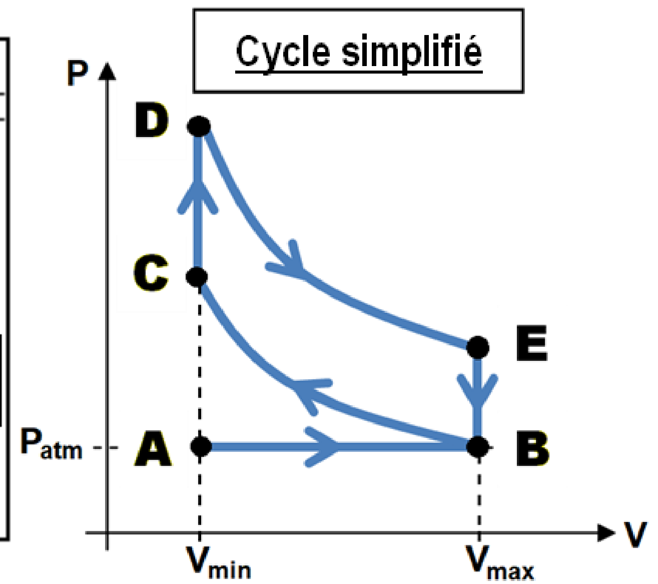
☛ ***Ordres de grandeurs* :** *Calculer le rendement maximal d'un moteur ditherme pour lequel* T_F = 20 °C *et* T_C = 500 °C.

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

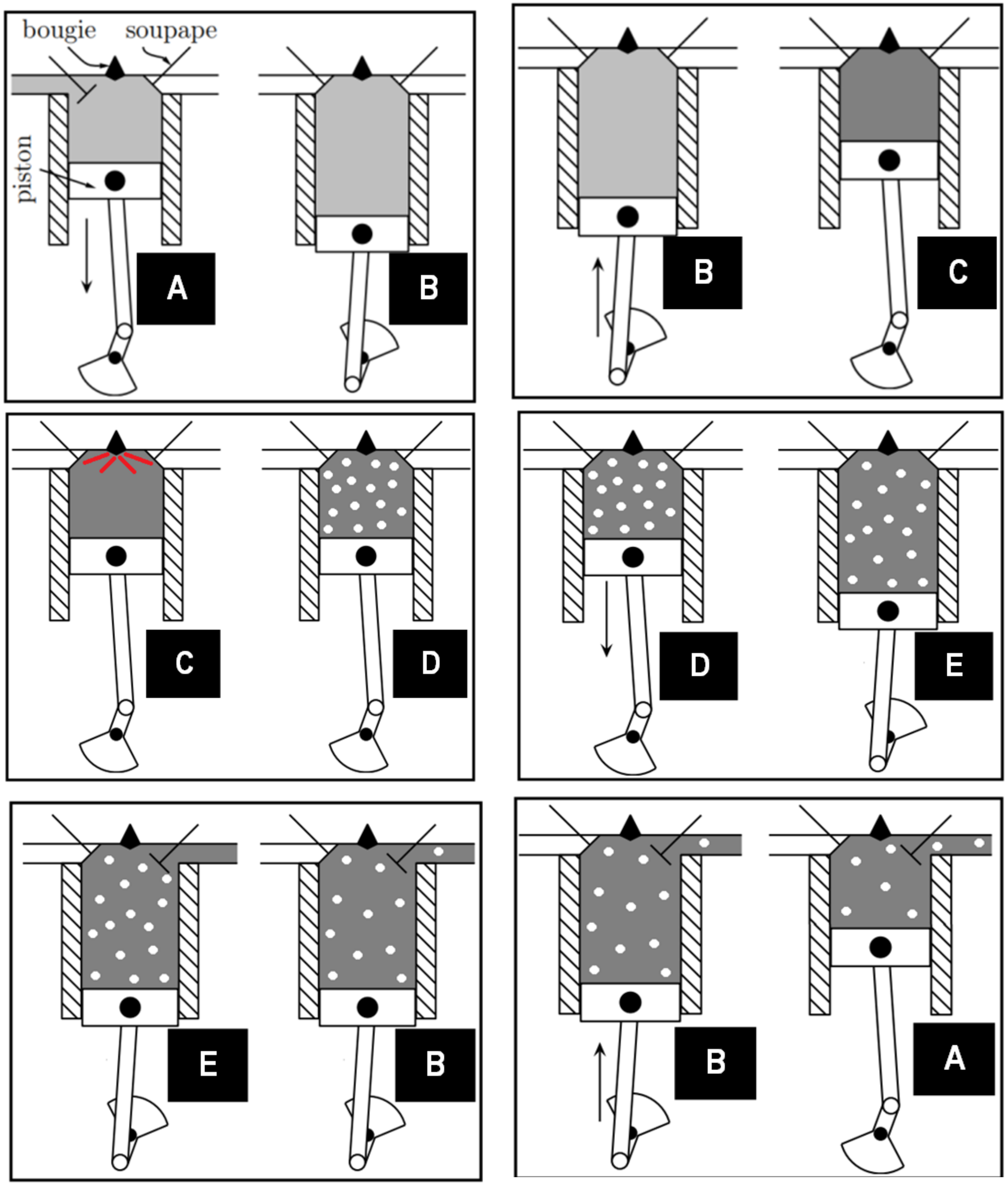
➡ En pratique, les **rendements REELS** sont compris **entre 20 % et 40 %**.

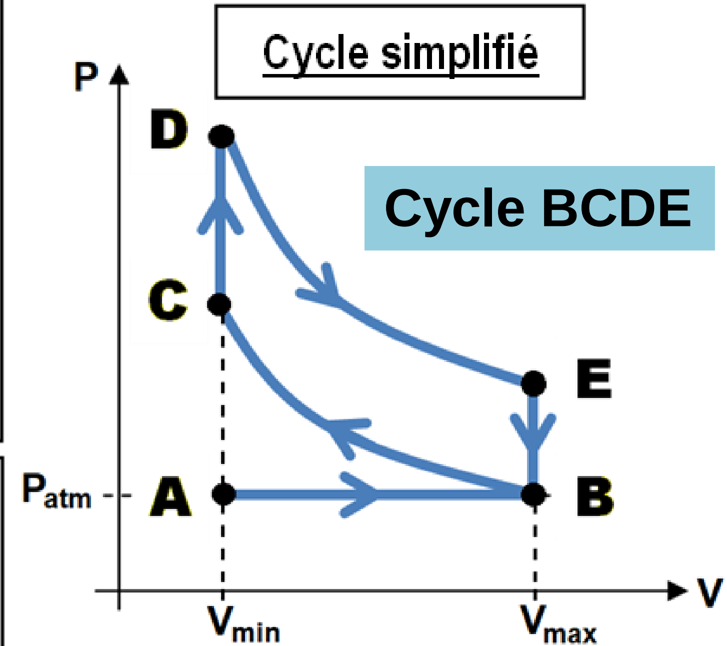
c/ Représentation du cycle dans un diagramme de Watt (P,V)

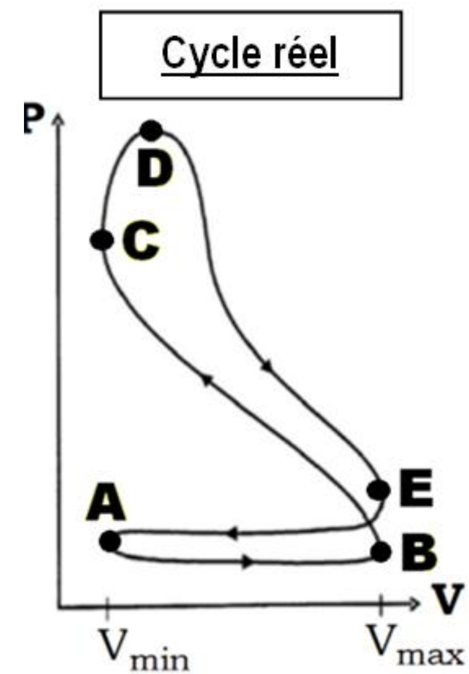




c/ Représentation du cycle dans un diagramme de Watt (P,V)





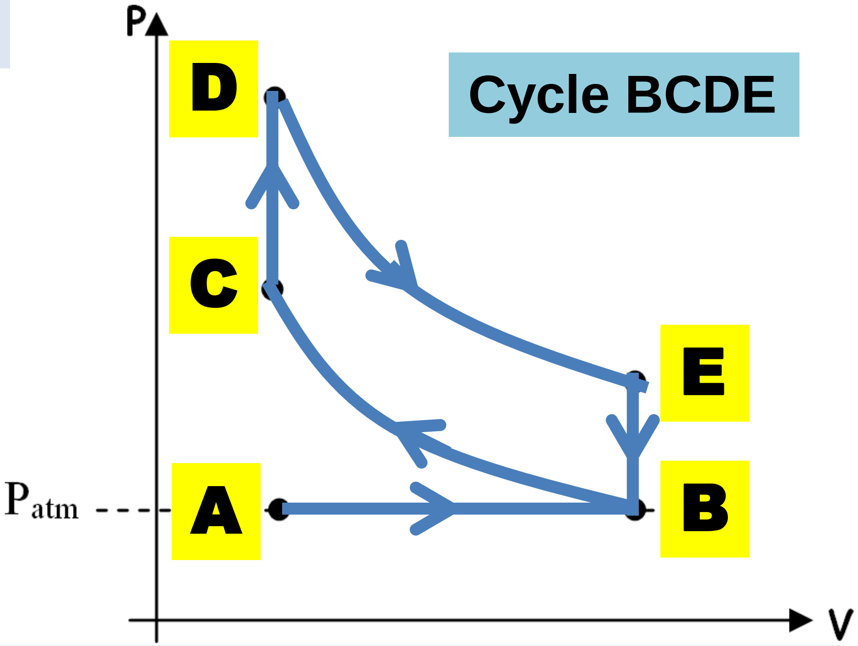


Rappel du Cours de PHYSIQUE 06 :

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

$$\boxed{W_{EI \to EF} = -\int_{V_{initial}}^{V_{final}} P.\,dV}$$

Aire sous la courbe



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

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

(Travail ***négatif*** 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**

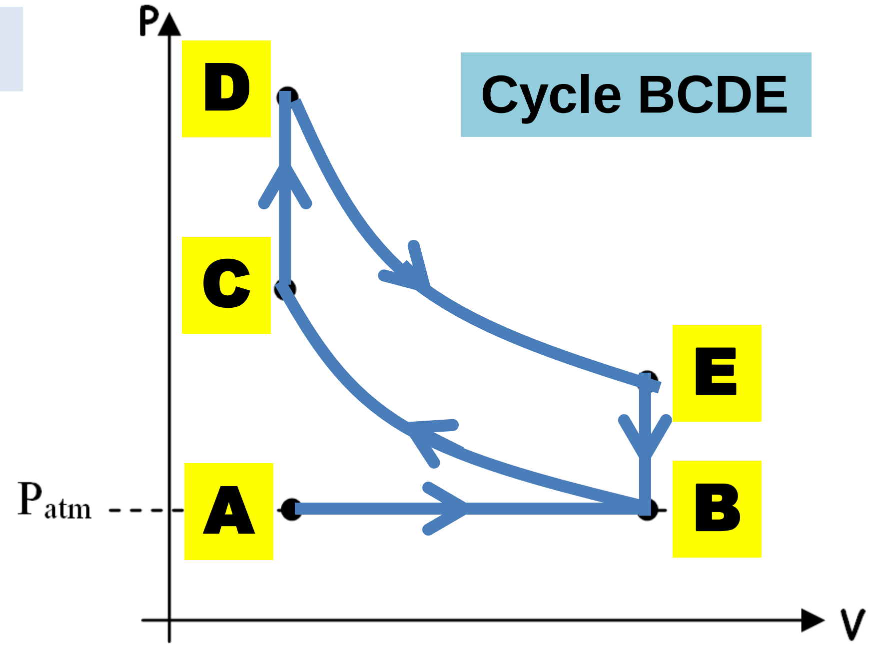
b) *Sur un cycle complet, le moteur reçoit-il ou fournit-il un travail à l'extérieur ?*

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

Rappel du Cours de PHYSIQUE 06 :

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

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



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 ?*

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

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

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

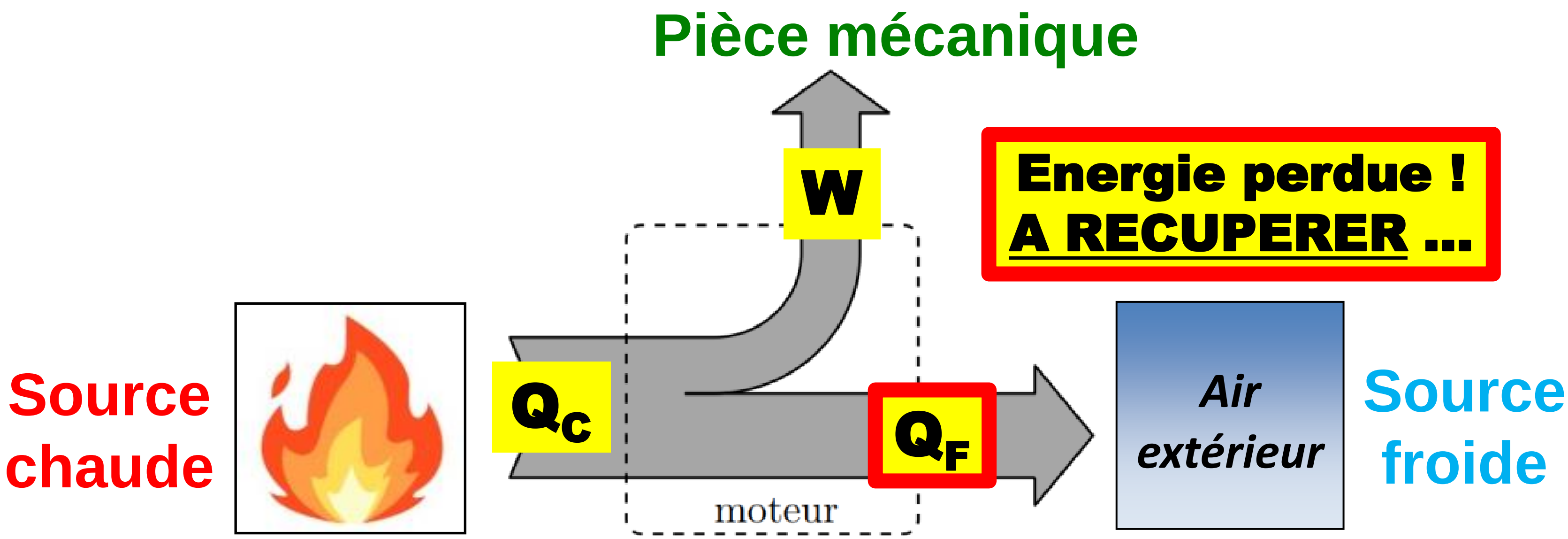
b) *Sur un cycle complet, le moteur reçoit-il ou fournit-il un travail à l'extérieur ?*

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

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

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

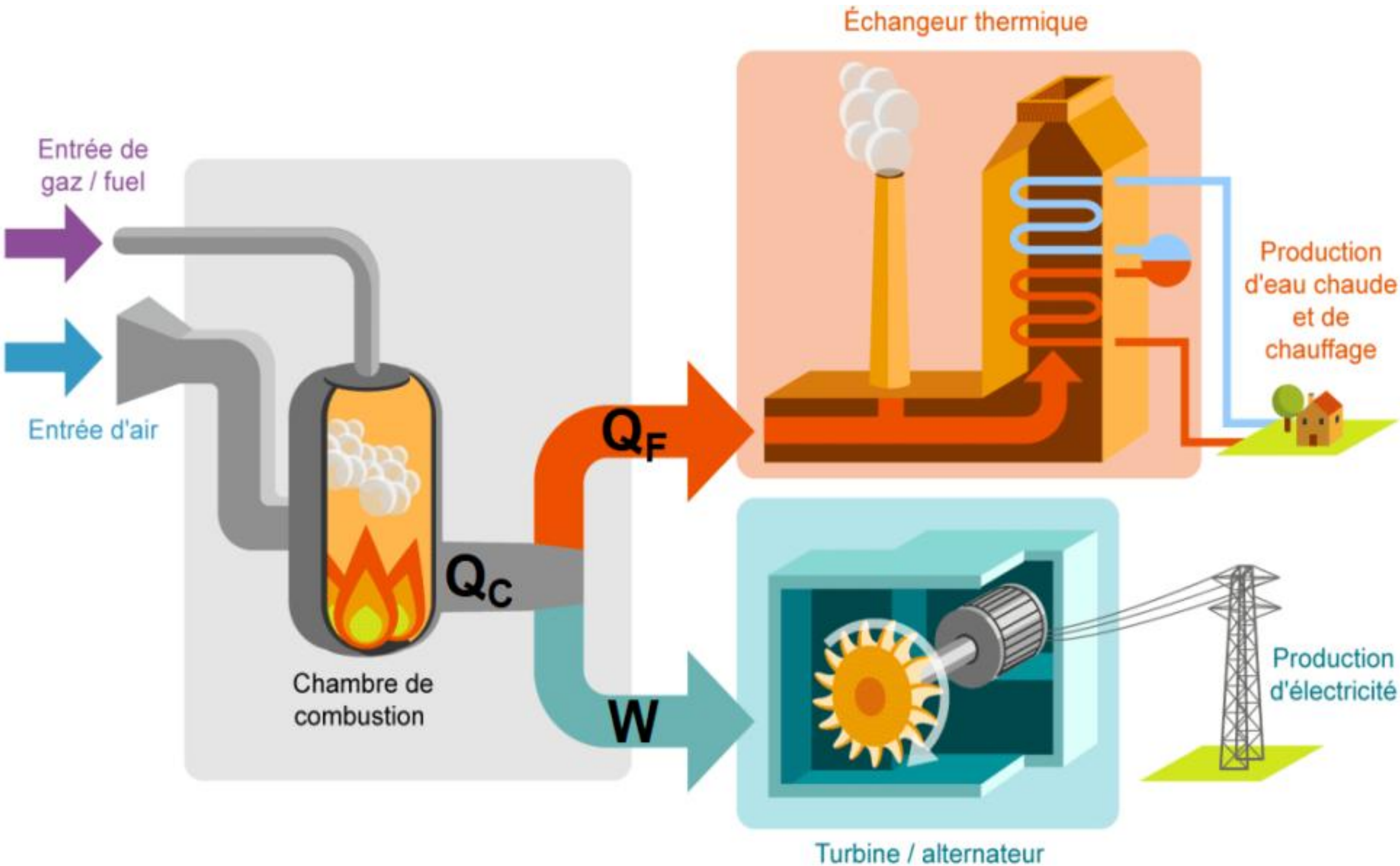
d/ Principe de la cogénération



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***.

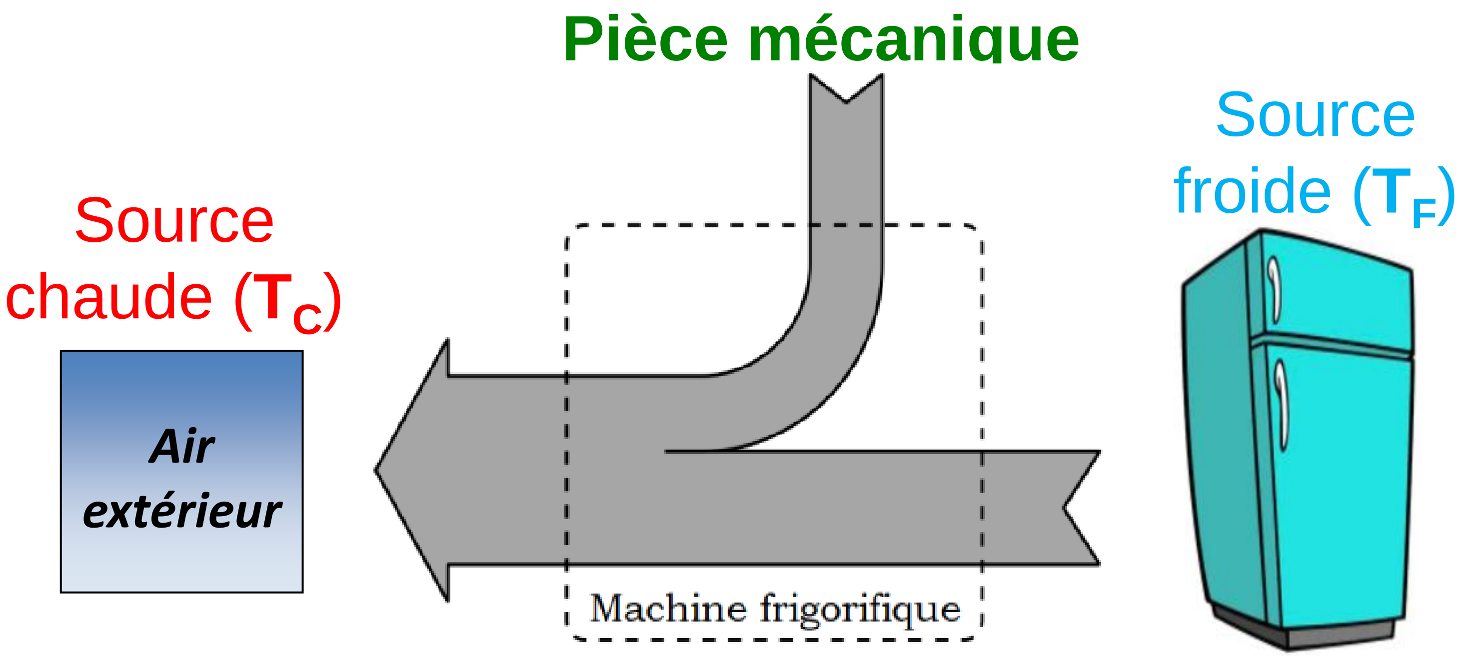


2) Les machines frigorifiques

a/ Principe de fonctionnement

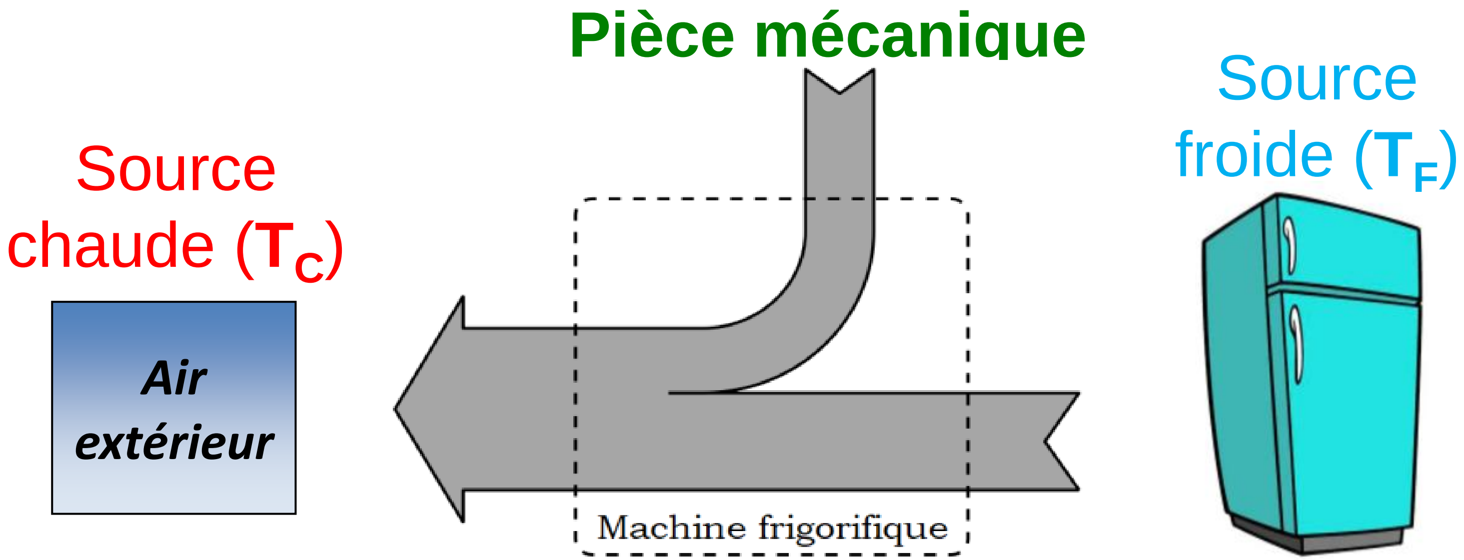
Apport d'énergie mécanique

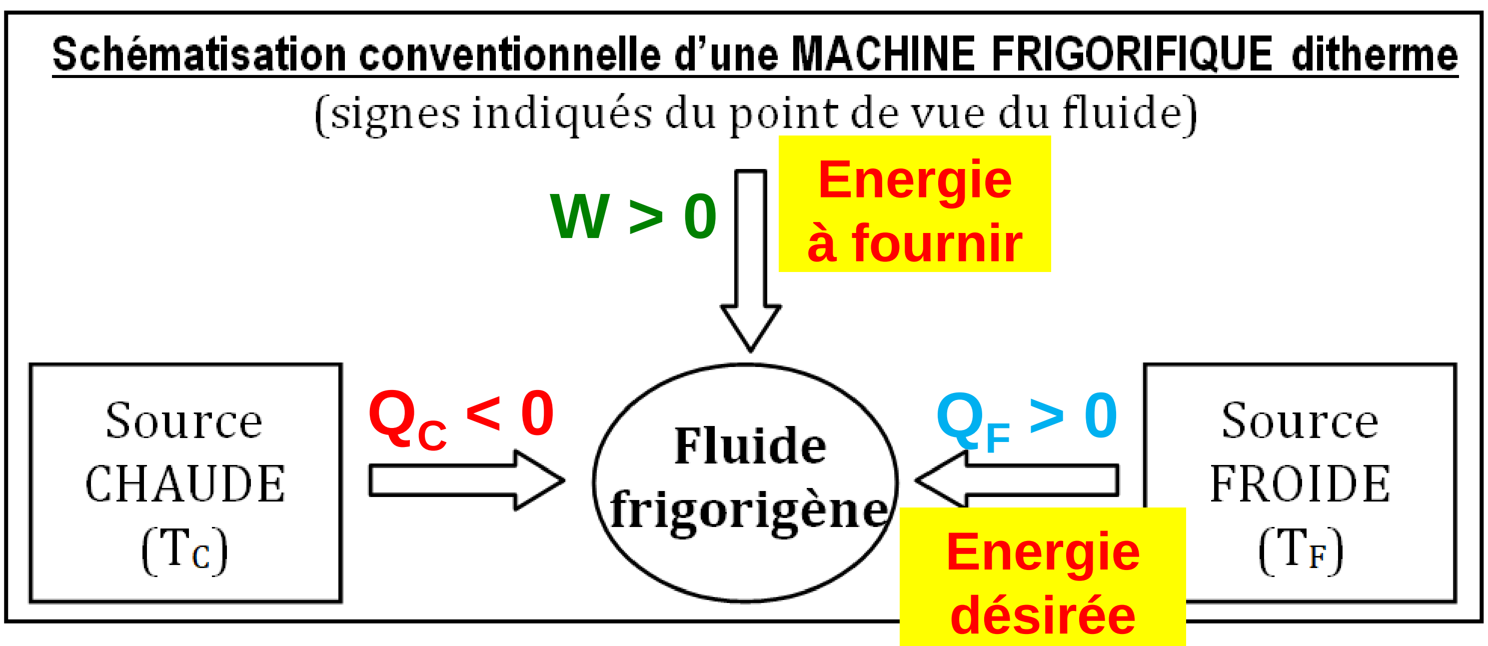
Transfert thermique NON NATUREL de la source froide (intérieur du frigo) **vers la source chaude** (air extérieur)



2) Les machines frigorifiques

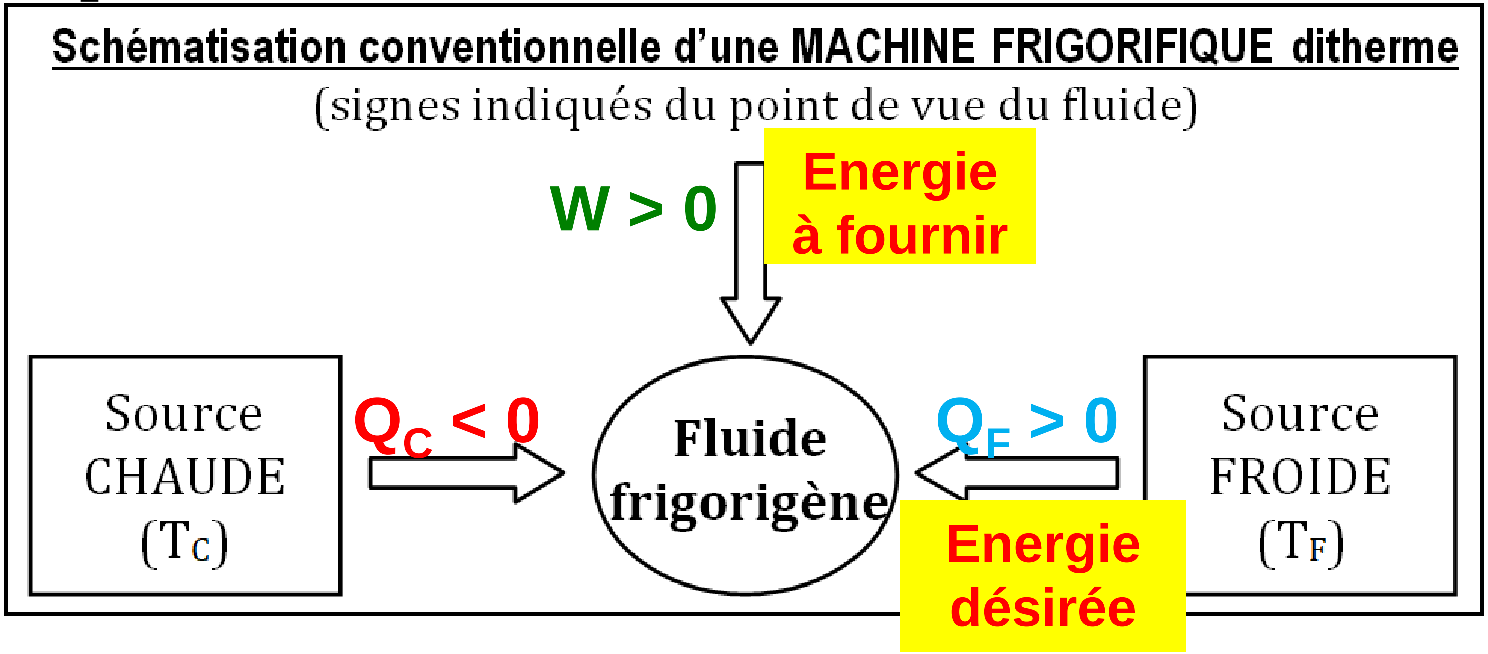
a/ Principe de fonctionnement





2) Les machines frigorifiques

a/ Principe de fonctionnement



b/ Efficacité d'une machine frigorifique ditherme

☛ *Utilisation du 1er principe de la thermodynamique* :

Par définition, $\mathbf{e} = \dfrac{Q_F}{W}$ et $W + Q_C + Q_F = 0$ $\Leftrightarrow$ $\mathbf{e} = -\dfrac{Q_F}{Q_C + Q_F}$

$$\Leftrightarrow \boxed{\mathbf{e} = -\dfrac{1}{\dfrac{Q_C}{Q_F} + 1}}$$

☛ ***Utilisation du 1er principe de la thermodynamique*** **:**

Par définition, $\mathbf{e} = \dfrac{Q_F}{W}$ et $W + Q_C + Q_F = 0$ $\Leftrightarrow$ $\mathbf{e} = -\dfrac{Q_F}{Q_C + Q_F}$

$$\Leftrightarrow \boxed{\mathbf{e} = -\dfrac{1}{\dfrac{Q_C}{Q_F} + 1}}$$

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

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

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

$$\Leftrightarrow \frac{1}{\dfrac{Q_C}{Q_F} + 1} \geq \frac{1}{-\dfrac{T_C}{T_F} + 1} \Leftrightarrow \boxed{\underbrace{\frac{-1}{\dfrac{Q_C}{Q_F} + 1}}_{e} \leq \underbrace{\frac{T_F}{T_C - T_F}}_{e_{MAX}}}$$

☛ ***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 grande que l'écart entre T_C et T_F est **FAIBLE**.

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

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

$$\Leftrightarrow \frac{1}{\frac{Q_C}{Q_F} + 1} \geq \frac{1}{-\frac{T_C}{T_F} + 1} \Leftrightarrow \boxed{\overbrace{\frac{-1}{\frac{Q_C}{Q_F} + 1}}^{e} \leq \overset{e_{MAX}}{\frac{T_F}{T_C - T_F}}}$$

☛ ***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 grande que l'écart entre T_C et T_F est **FAIBLE**.

☛ ***Ordres de grandeurs* :** *Calculer l'efficacité maximale d'un réfrigérateur maintenant la température interne à* **4 °C** *pour une température extérieure de* **20 °C**.

$$e_{MAX} = \frac{4 + 273}{20 - 4}$$

Soit **e_{MAX} = 17** (donc **e_{MAX} = 1700 % !!!**)

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

☛ ***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 grande que l'écart entre T_C et T_F est **faible**.

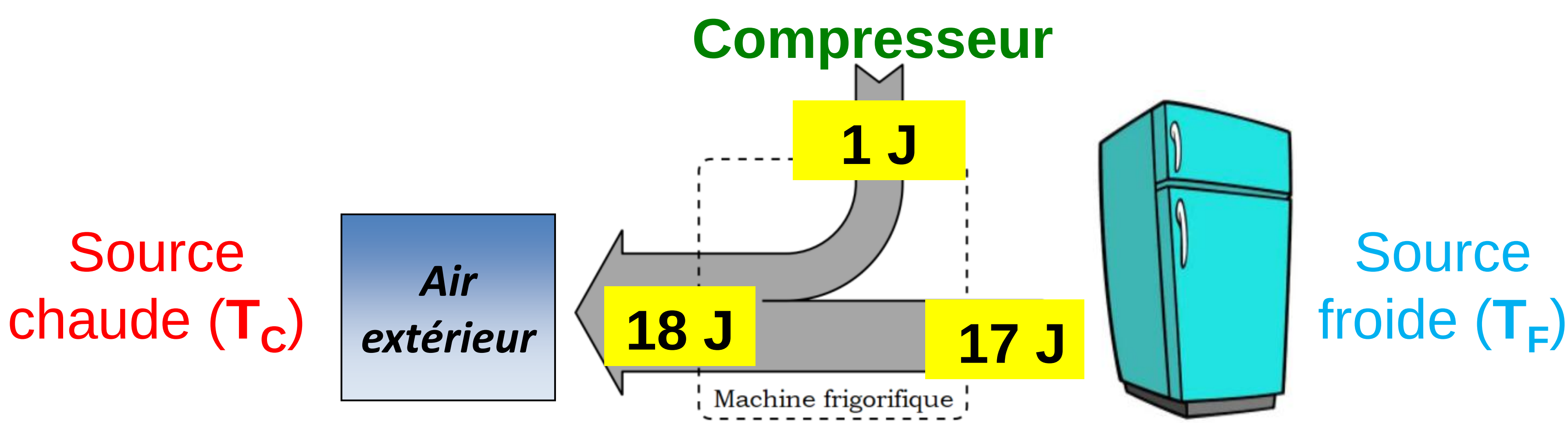
☛ ***Ordres de grandeurs*** **:** *Calculer l'efficacité maximale d'un réfrigérateur maintenant la température interne à* **4 °C** *pour une température extérieure de* **20 °C.**

$$e_{MAX} = \frac{4 + 273}{20 - 4}$$

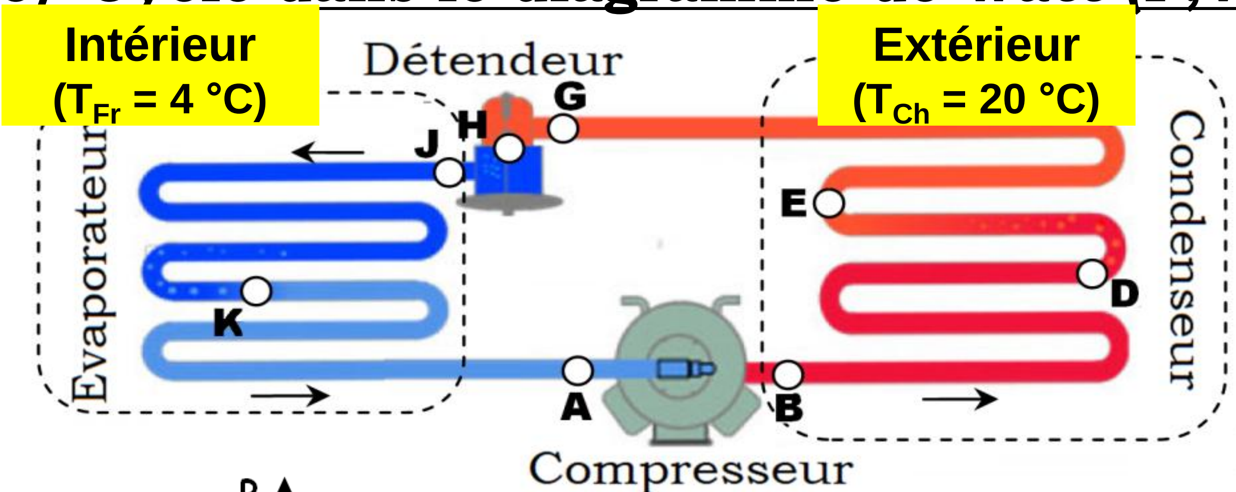
Soit $e_{MAX} = 17$ (donc e_{MAX} = **1700 % !!!**)

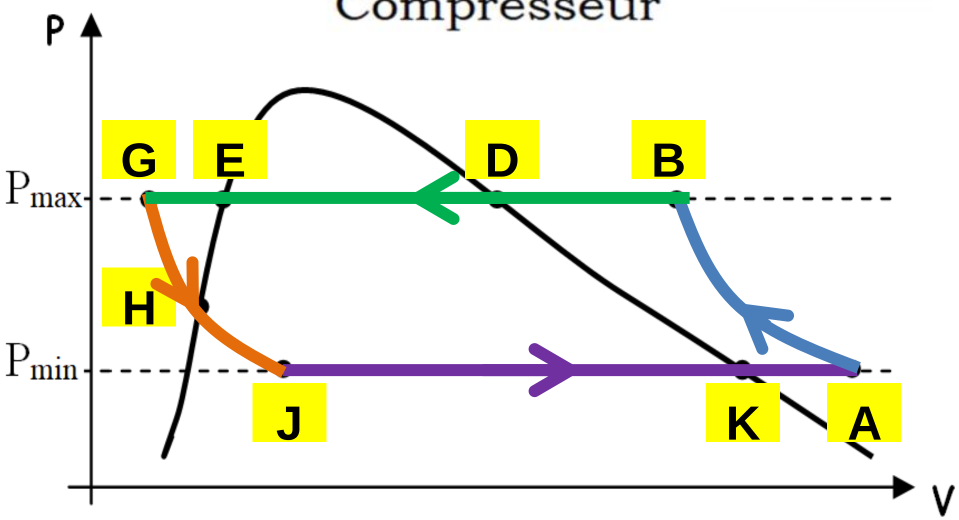
➡ En pratique, les **efficacités REELLES** sont comprises **entre 200 % et 500 %**.

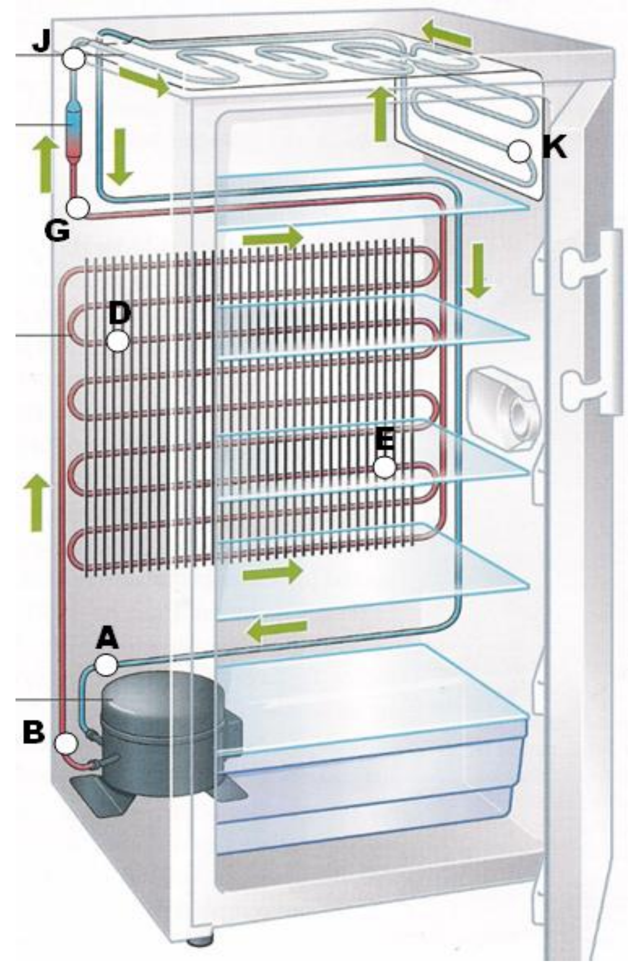
Ce résultat peut paraître surprenant et en contradiction avec la conservation de l'énergie, mais il n'en est rien …



c/ Cycle dans le diagramme de Watt (P,V)







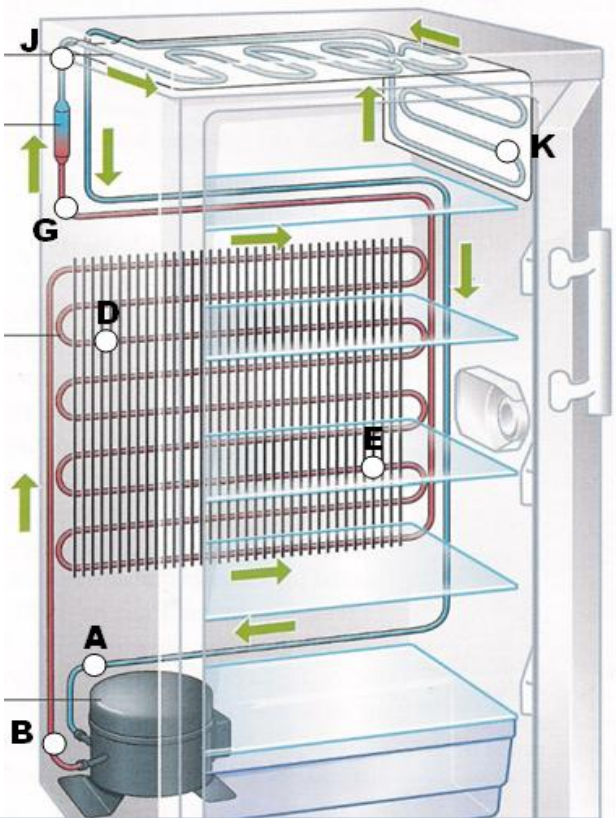
Le Compresseur : A → B

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

Fluide à l'état .gazeux.. ; La pression augmente.

Le volume ..diminue.. ; La température augmente

c/ Cycle dans le diagramme de Watt (P,V)



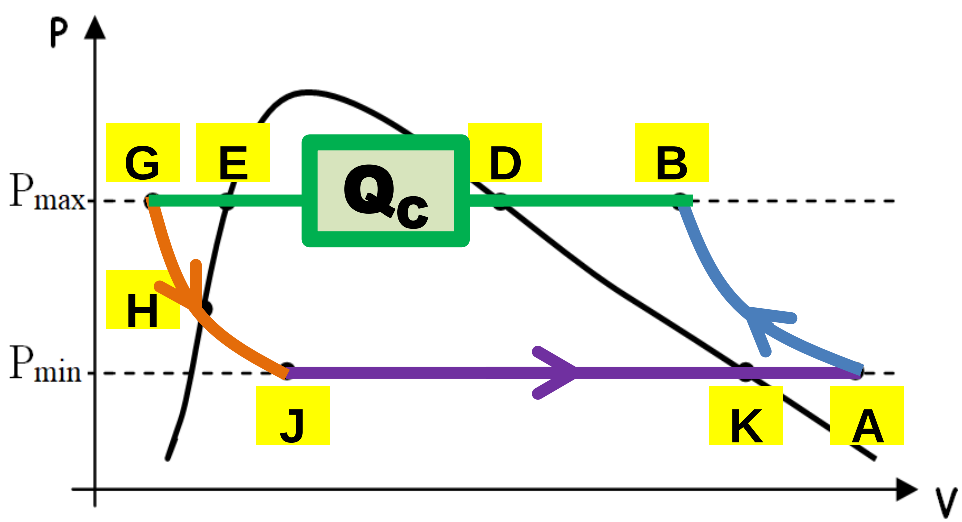
Le Condenseur : B → D → E → G

De **B** à **G**, le fluide passe de l'état ..gazeux.... à l'état liquide. (condensation à l'état liquide) avec :

la 1[ère] goutte de liquide..qui apparaît en **D** ;

la dernière goutte de liquide..qui apparaît en **E** ;

Lors de ce changement d'état, le fluide ..cède.. de l'énergie à la **source chaude** (ici l'air) : donc Q_C < 0..



Le Compresseur : A → B

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

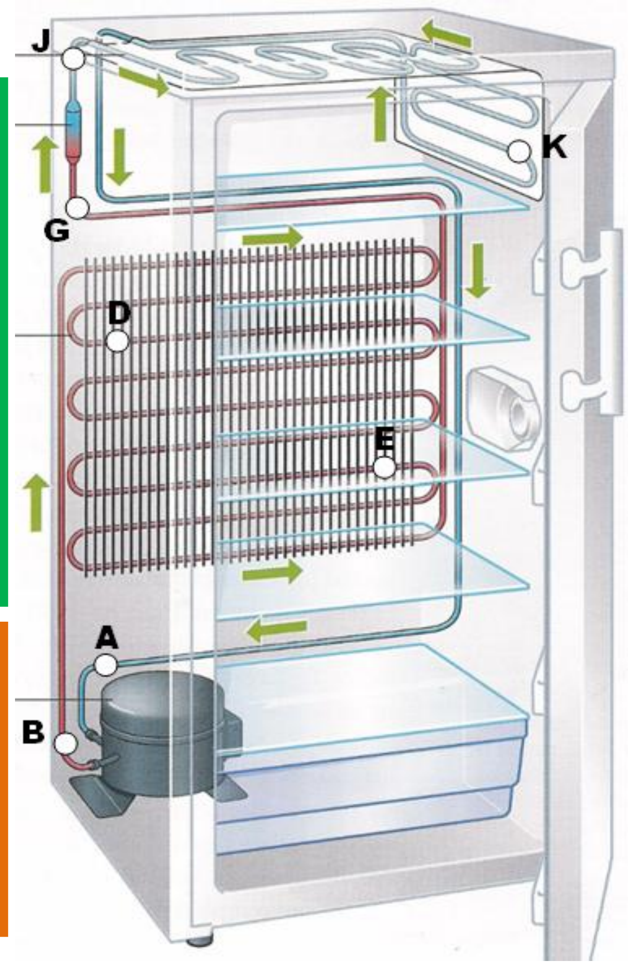
Fluide à l'état .gazeux..

La pression ..augmente..

Le volume ...diminue..

La température augmente.

c/ Cycle dans le diagramme de Watt (P,V)



Le Condenseur : B → D → E → G

De **B** à **G**, le fluide passe de l'état ..gazeux.... à l'état liquide. (condensation à l'état liquide) avec :

la 1ère goutte de liquide..qui apparaît en **D** ;

la dernière goutte de liquide..qui apparaît en **E** ;

Lors de ce changement d'état, le fluide cède. de l'énergie à la **source chaude** (ici l'air) : donc $Q_C < 0$..

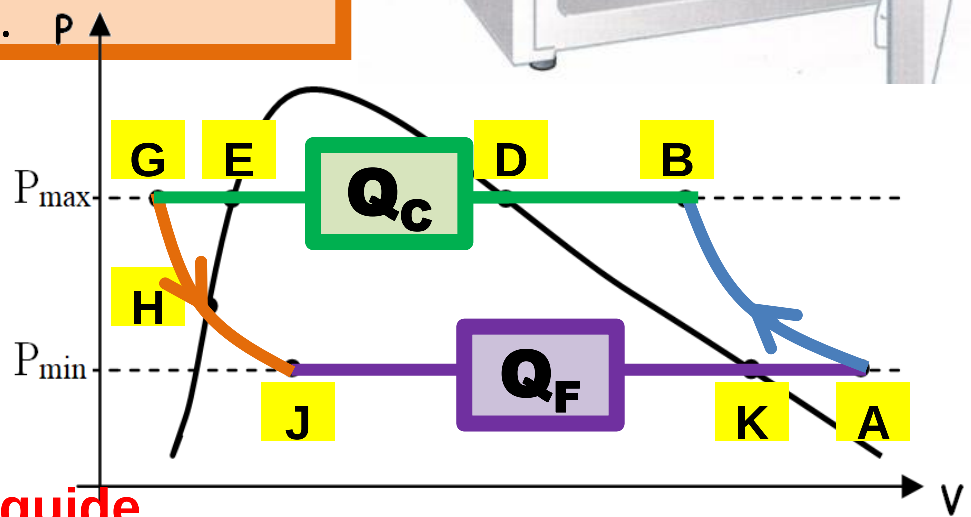
Le Détendeur : G → H → J

De **G** à **J**, la pression du fluide diminue (= détente) ce qui le fait passer de l'état liquide à l'état diphasé avec apparit° de la 1ère bulle de gaz en **H**.

L'Evaporateur : J → K → A

De **J** à **K**, le fluide se vaporise : pour cela, il reçoit de l'énergie de la **source froide** (qui en perd, ce qui maintient le froid l'intérieur). Donc $Q_F > 0$..

En **K** disparaît la dernière goutte de liquide



c/ Cycle dans le diagramme de Watt (P,V)

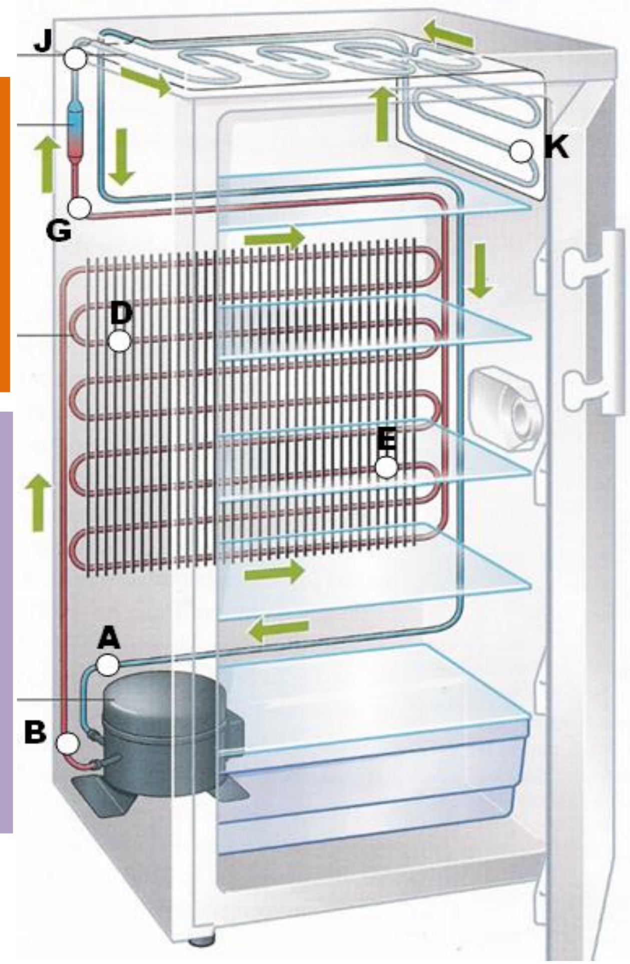
Le Détendeur : G → H → J

De **G** à **J**, la pression du fluide ....diminue.... (= détente) ce qui le fait passer de l'état ...liquide... à l'état ...diphasé... avec apparit° de la 1ère ...bulle de gaz... en **H**.

L'Evaporateur : J → K → A

De **J** à **K**, le fluide se ...vaporise... : pour cela, il ...reçoit... de l'énergie de la **source froide** (qui en perd, ce qui maintient le froid à l'intérieur). Donc Q_F ...> 0...

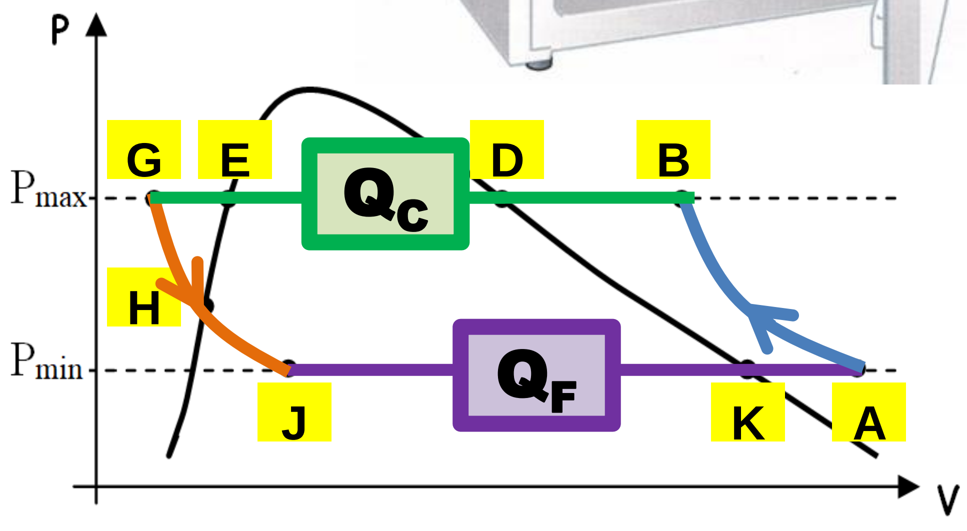
En **K** disparaît la dernière ...goutte de liquide...



✍ ***Application 3*** : *Comment l'allure du cycle confirme-t-elle le caractère « **récepteur** » des machines frigorifiques ?*

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

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



✍ ***Application 3*** : *Comment l'allure du cycle confirme-t-il le caractère « **récepteur** » des machines frigorifiques ?*

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

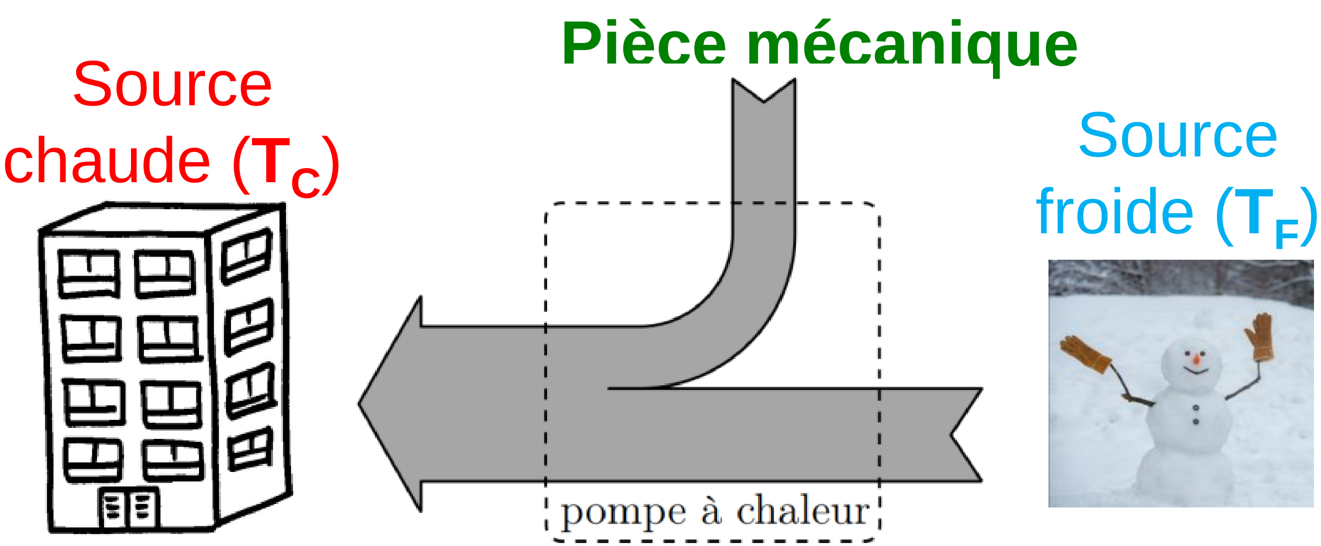
$$\boxed{W_{cycle} > 0}$$

3) Les pompes à chaleur

a/ Principe de fonctionnement

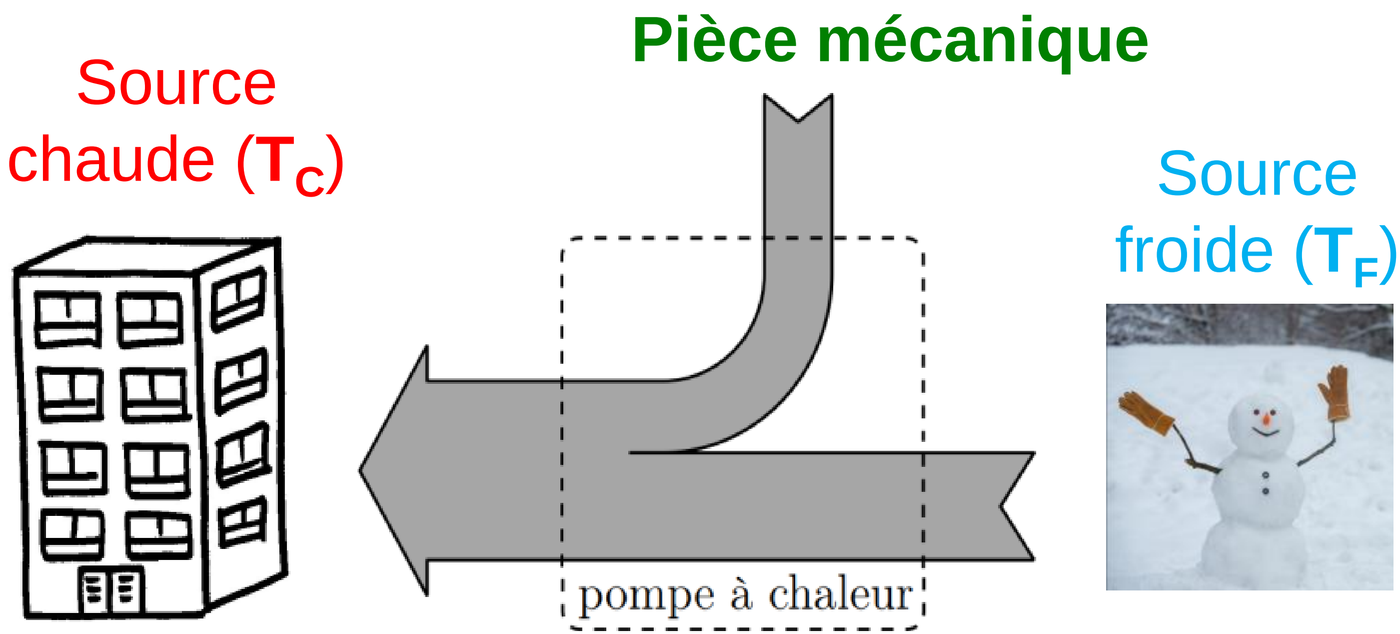
Apport d'énergie mécanique

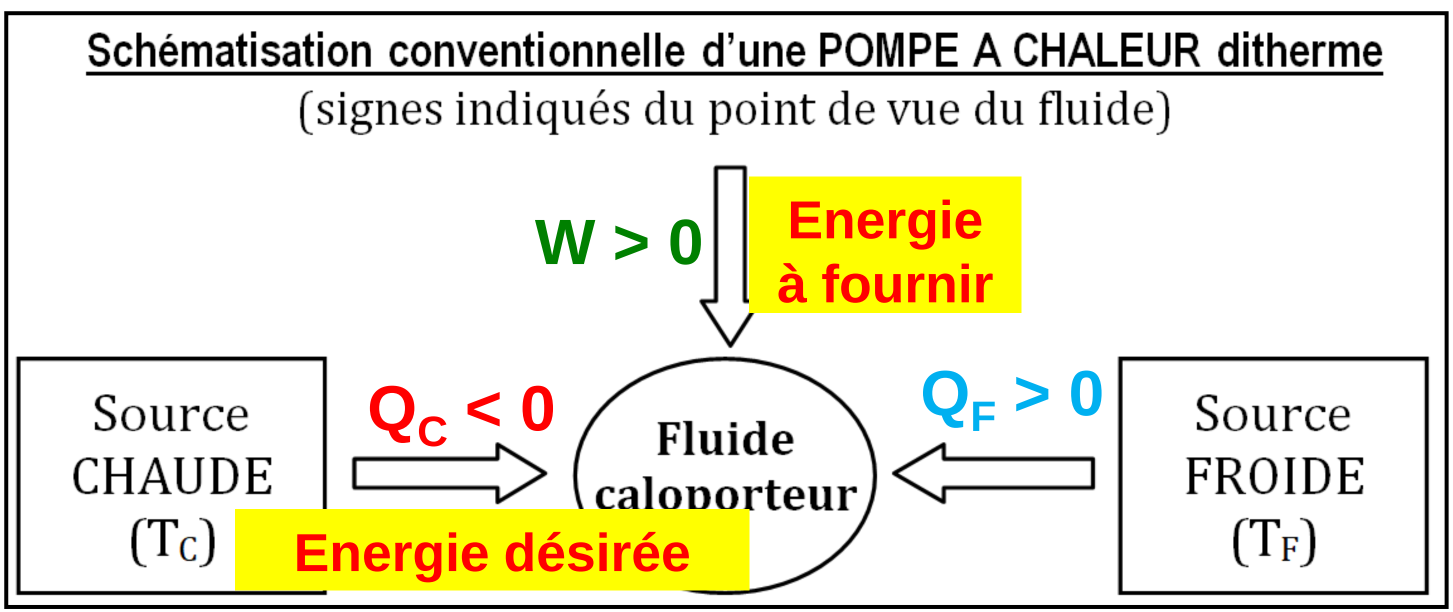
Transfert thermique NON NATUREL de la source froide (l'extérieur d'une maison) **vers la source chaude** (l'intérieur)



3) Les pompes à chaleur

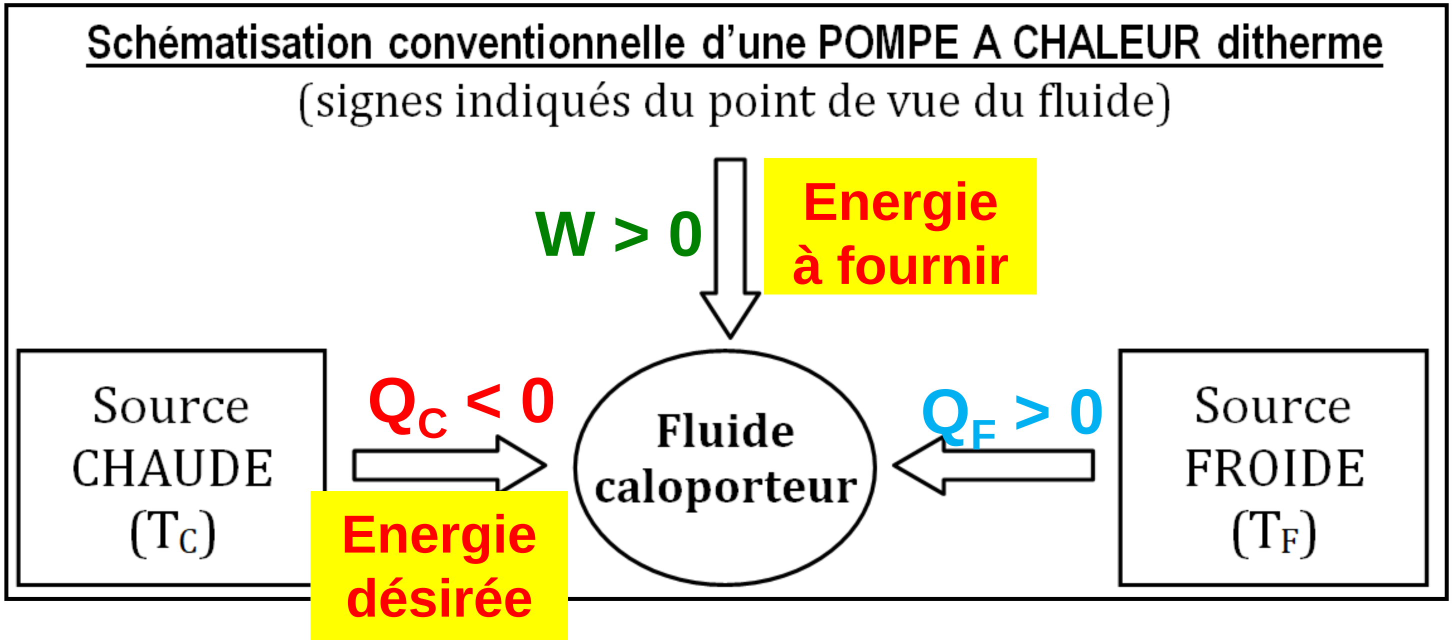
a/ Principe de fonctionnement





3) Les pompes à chaleur

a/ Principe de fonctionnement



b/ Efficacité d'une pompe à chaleur ditherme

☛ ***Utilisation du 1er principe de la thermodynamique*** **:**

Par définition, $\mathbf{e} = -\dfrac{Q_C}{W}$ et $W + Q_C + Q_F = 0$ $\Leftrightarrow$ $\mathbf{e} = \dfrac{Q_C}{Q_C + Q_F}$

$$\Leftrightarrow \boxed{\mathbf{e} = \dfrac{1}{1 + \dfrac{Q_F}{Q_C}}}$$

☛ ***Utilisation du 1er principe de la thermodynamique*** **:**

Par définition, $\mathbf{e} = -\dfrac{Q_C}{W}$ et $W + Q_C + Q_F = 0$ $\Leftrightarrow$ $\mathbf{e} = \dfrac{Q_C}{Q_C + Q_F}$

$$\Leftrightarrow \boxed{\mathbf{e} = \dfrac{1}{1 + \dfrac{Q_F}{Q_C}}}$$

☛ ***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

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

(Q_C négatif)

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

$$\Leftrightarrow \boxed{\underbrace{\frac{1}{1 + \dfrac{Q_F}{Q_C}}}_{e} \leq \underbrace{\frac{T_C}{T_C - T_F}}_{e_{MAX}}}$$

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

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

(Q_C négatif)

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

$$\Leftrightarrow \quad \boxed{\underbrace{\frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}}}_{\mathbf{e}} \leq \underbrace{\frac{T_C}{T_C - T_F}}_{\mathbf{e_{MAX}}}}$$

☛ ***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 grande que l'écart entre T_C et T_F est **FAIBLE**.

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

☛ ***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 grande que l'écart entre T_C et T_F est **FAIBLE**.

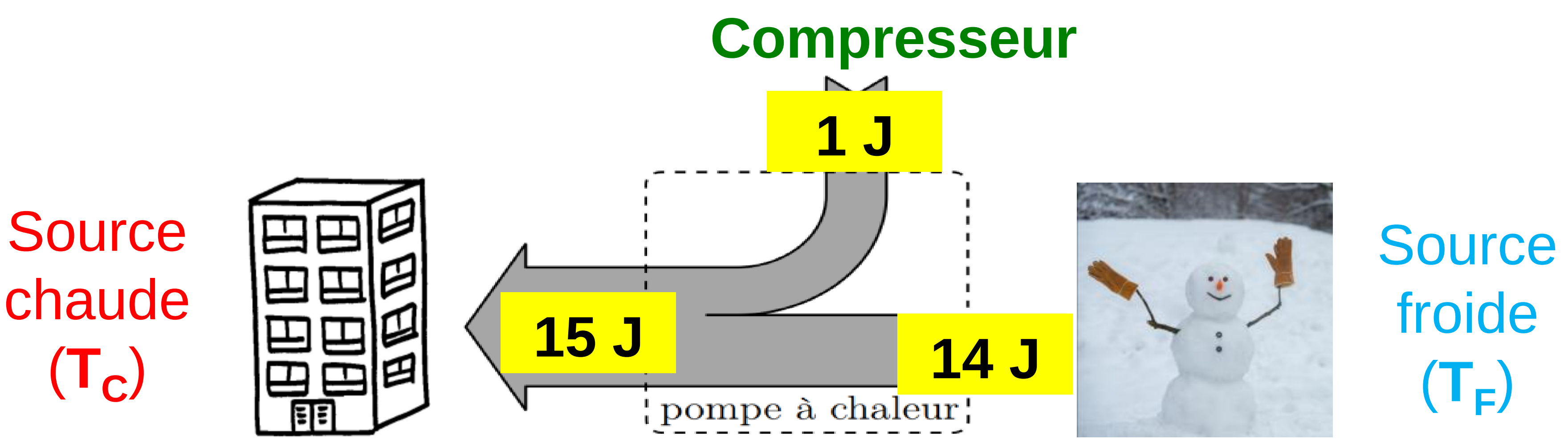
☛ ***Ordres de grandeurs :*** *Calculer le* e_{MAX} *d'une pompe à chaleur maintenant la température d'un appartement à* **20 °C** *pour une température extérieure de* **0 °C**.

$$e_{MAX} = \frac{273+20}{20-0}$$

Soit **e_{MAX} = 15** (donc **e_{MAX} = 1500 % !!!**)

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

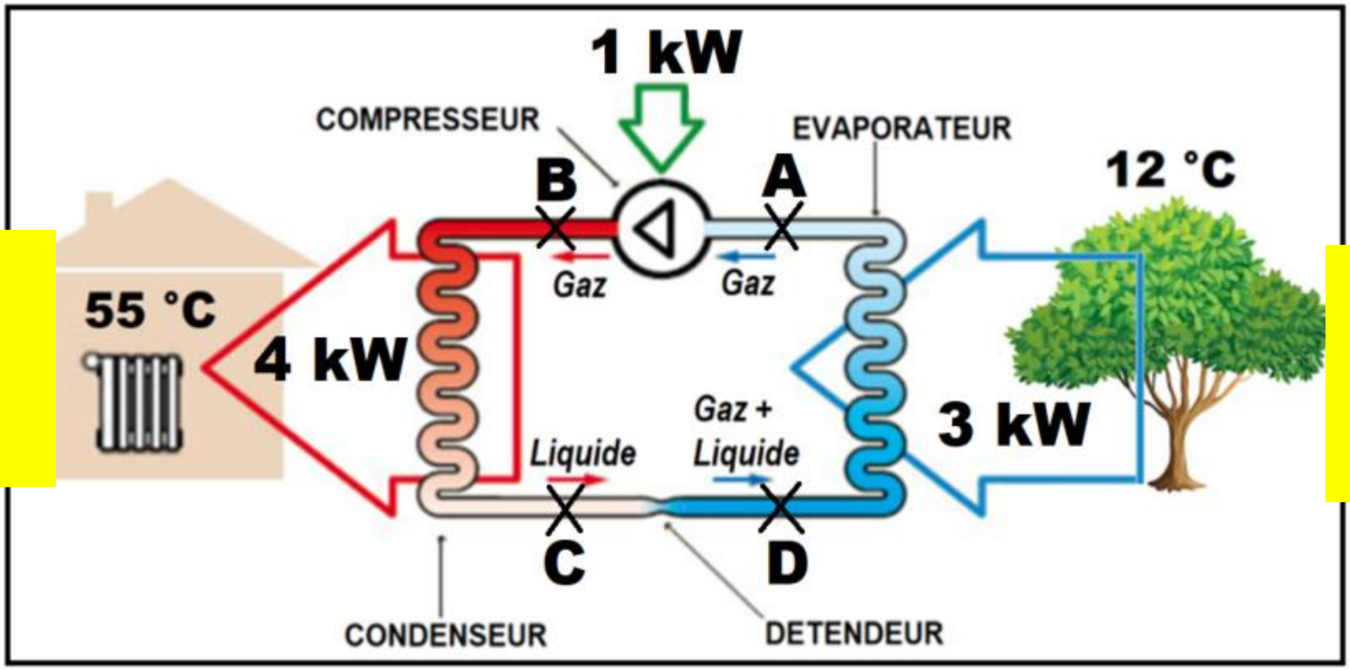
Ce résultat peut paraître surprenant et en contradiction avec la conservation de l'énergie, mais il n'en est rien …



c/ Le cycle d'une pompe à chaleur ditherme

Même fonctionnement que les machines frigorifiques

Source chaude (T_C)



Source froide (T_F)

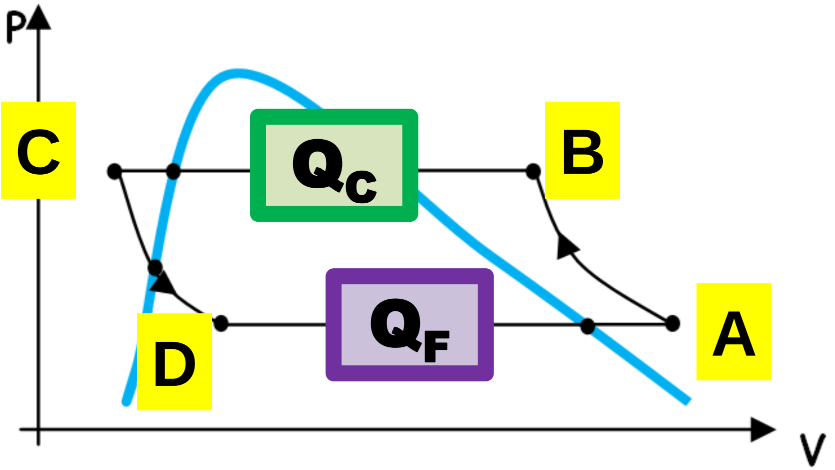
✍ ***Application 4*** :

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

Puissance désirée = P_1 = 4 kW

Puissance à fournir = P_2 = 1 kW

$$e = \frac{P_1}{P_2} = 4$$ soit **e = 400 %**



b) *Indiquer où se trouvent les points* **A**, **B**, **C** *et* **D** *sur le diagramme de Watt ci-contre.*

✍ ***Application 4*** :

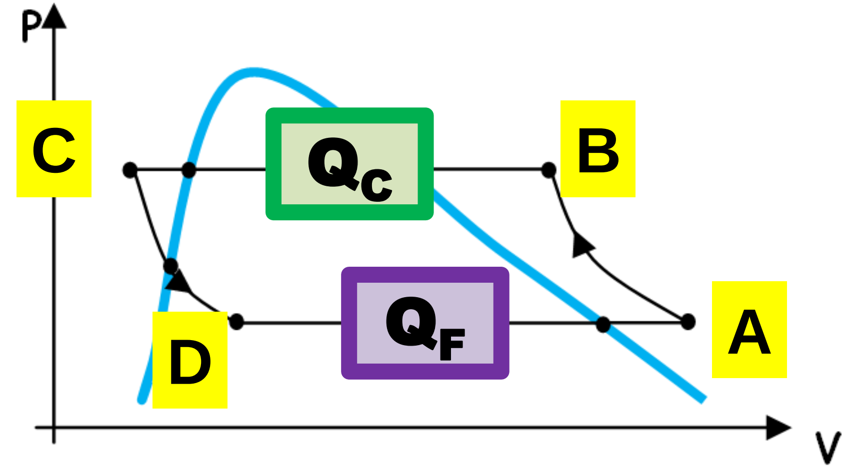
a) *Calculer l'efficacité de cette pompe à chaleur.*

Puissance désirée = P_1 = 4 kW

Puissance à fournir = P_2 = 1 kW

$$e = \frac{P_1}{P_2} = 4$$

soit **e = 400 %**



b) *Indiquer où se trouvent les points* **A**, **B**, **C** *et* **D** *sur le diagramme de Watt ci-contre.*

II- Les machines thermiques à écoulement de fluide stationnaire

Compresseur

Condenseur

Détendeur

Evaporateur

Systèmes OUVERTS

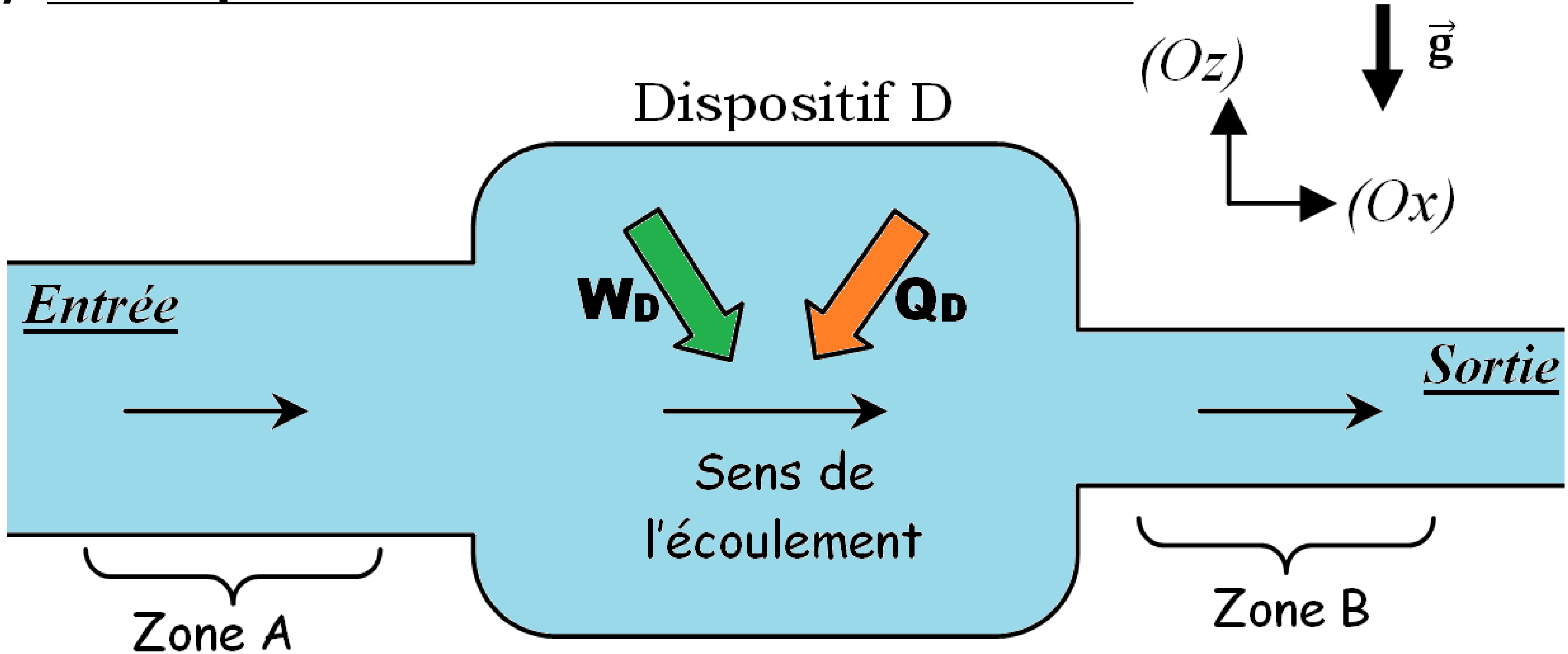
L'énoncé

$\Delta Em + \Delta U = W + Q$

du 1er principe ne s'applique pas

1) Le 1er principe en écoulement stationnaire

a/ Description de l'écoulement stationnaire



- Pression P_A
- Température T_A
- Vitesse du fluide $\vec{v}_A$

- Pression P_B
- Température T_B
- Vitesse du fluide $\vec{v}_B$

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.

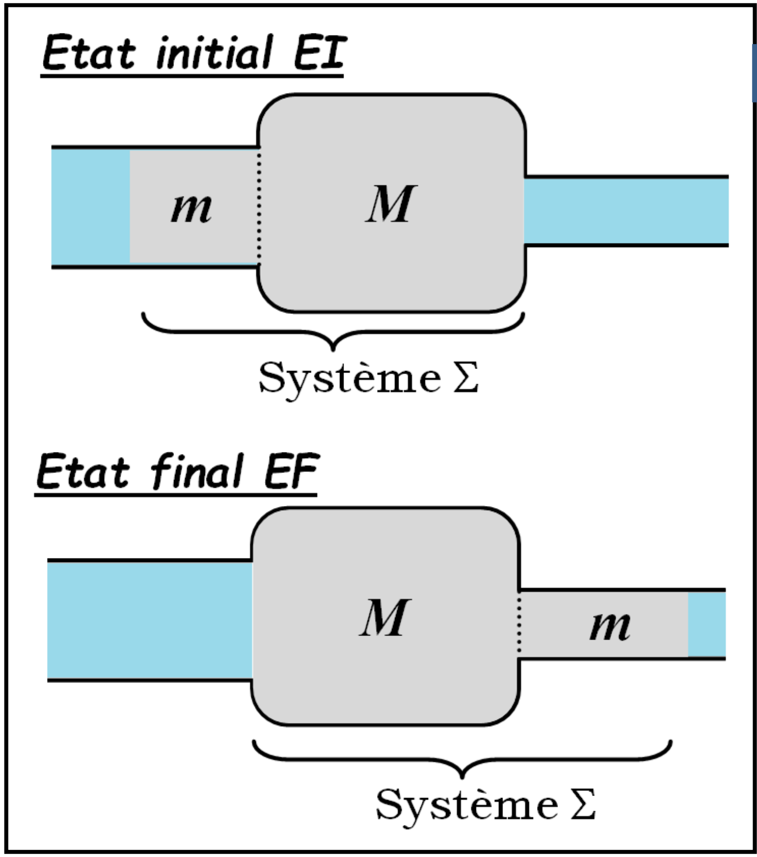
1) Le 1^er principe en écoulement stationnaire

a/ Description de l'écoulement stationnaire

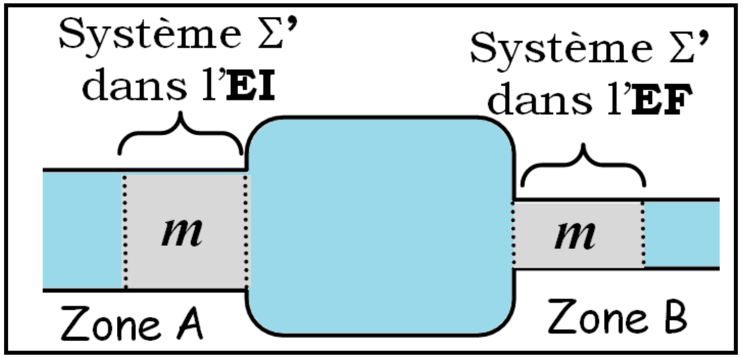
Un écoulement est dit ***STATIONNAIRE*** (ou permanent) si **l'état du fluide en un point donné de la canalisation est le même à chaque instant**.

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' …

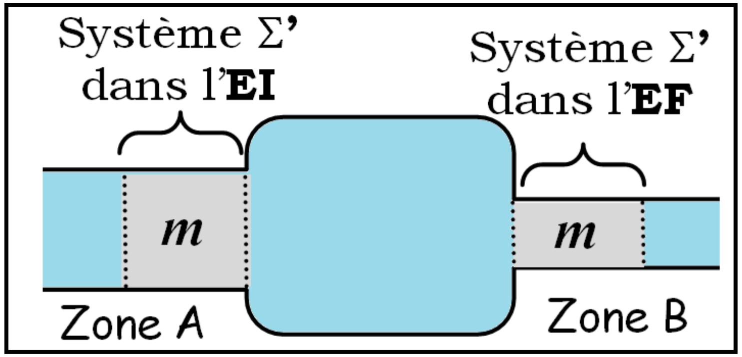


P_A, T_A, $\vec{v}_A$, z_A et V_A

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

Rappel : $$W_{pression} = -\int_{EI}^{EF} P_{ext}.\, dV$$

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

$$W_{pression,B} = -\int_{0}^{V_B} P_B.\, dV = -P_B(V_B - 0) = \boxed{-P_B.\, V_B}$$

☛ ***Application du 1er principe au système fermé Σ' de masse m*** :

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

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

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

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

$$W_{pression,B} = -\int_{0}^{V_B} P_B . dV = -P_B(V_B - 0) = \boxed{-P_B . V_B}$$

☛ ***Application du 1er principe au système fermé Σ' de masse m*** :

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

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

☛ ***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*** :

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

$$\boxed{\Delta h + \Delta e_C + \Delta e_P = w_D + q_D}$$

Variation d'**enthalpie massique** (J.kg^{-1})

1er principe en écoulement stationnaire

Variation d'**énergie cinétique massique** (J.kg^{-1})

Variation d'**énergie potentielle massique** (J.kg^{-1})

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

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

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

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

☛ ***Diviser par la masse m pour faire apparaître les grandeurs massiques*** :

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

$$\boxed{\Delta h \quad + \quad \Delta e_C \quad + \quad \Delta e_P \quad = \quad w_D \quad + \quad q_D}$$

1er principe en écoulement stationnaire

Variation d'**enthalpie massique** (J.kg^{-1})

Variation d'**énergie cinétique massique** (J.kg^{-1})

Variation d'**énergie potentielle massique** (J.kg^{-1})

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

☛ ***Expression simplifiée en négligeant Δe_C et Δe_P*** : $\boxed{\Delta h = w_D + q_D}$ (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** :

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

D_m (kg.s^{-1}), m (kg), Δt (s)

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

☛ ***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** :

$$\boxed{\underbrace{D_m}_{(kg.s^{-1})} = \frac{\overbrace{m}^{(kg)}}{\underbrace{\Delta t}_{(s)}}}$$

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

$$\Leftrightarrow \quad \boxed{D_m.\Delta h = P_{mécanique} + P_{transferts\ thermiques}}$$

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*** :

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

$$\Leftrightarrow \quad \boxed{D_m.\Delta h = P_{mécanique} + P_{transferts\ thermiques}}$$

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**)

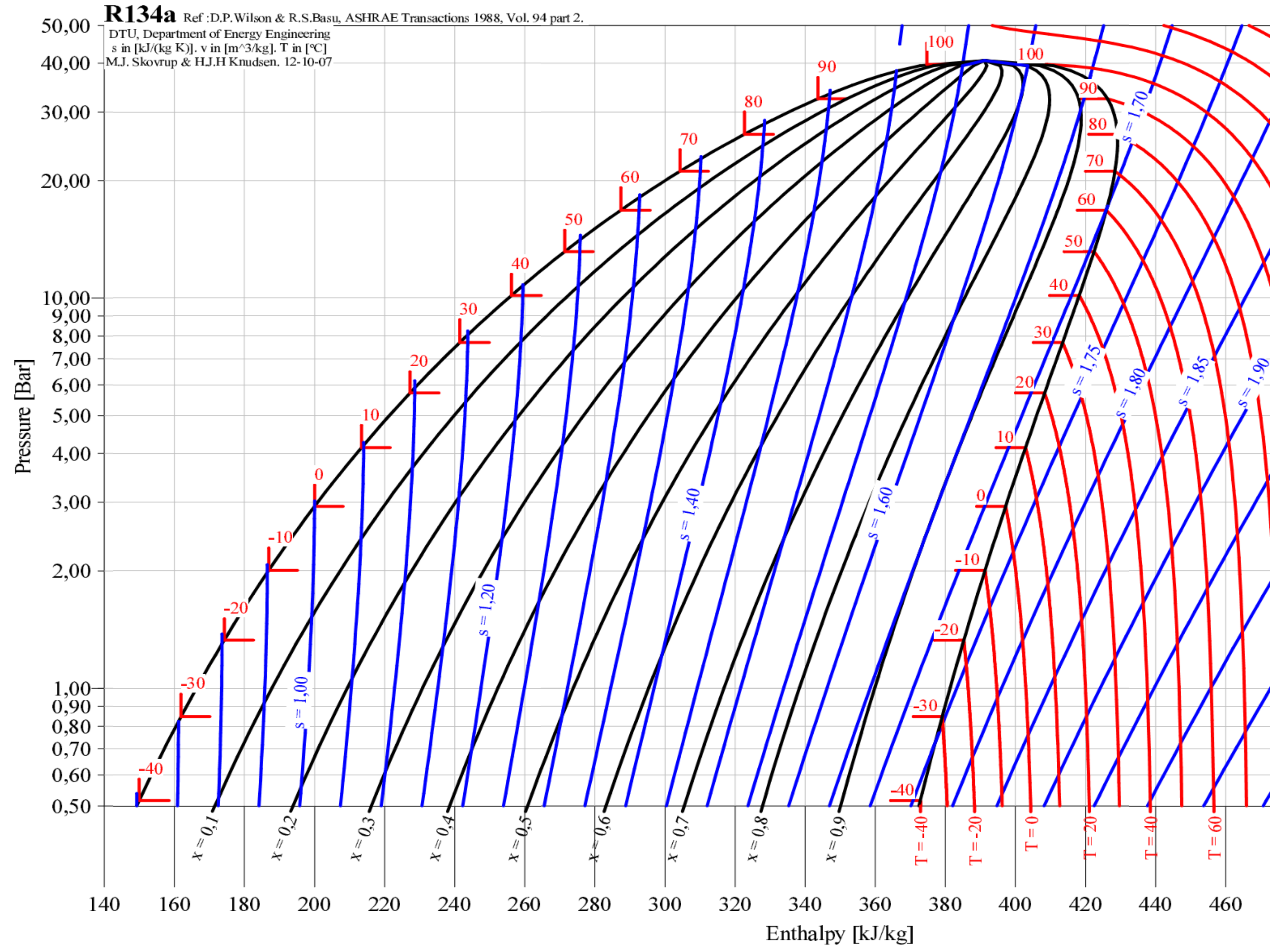
2) Exploitation avec un diagramme (P,h)

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

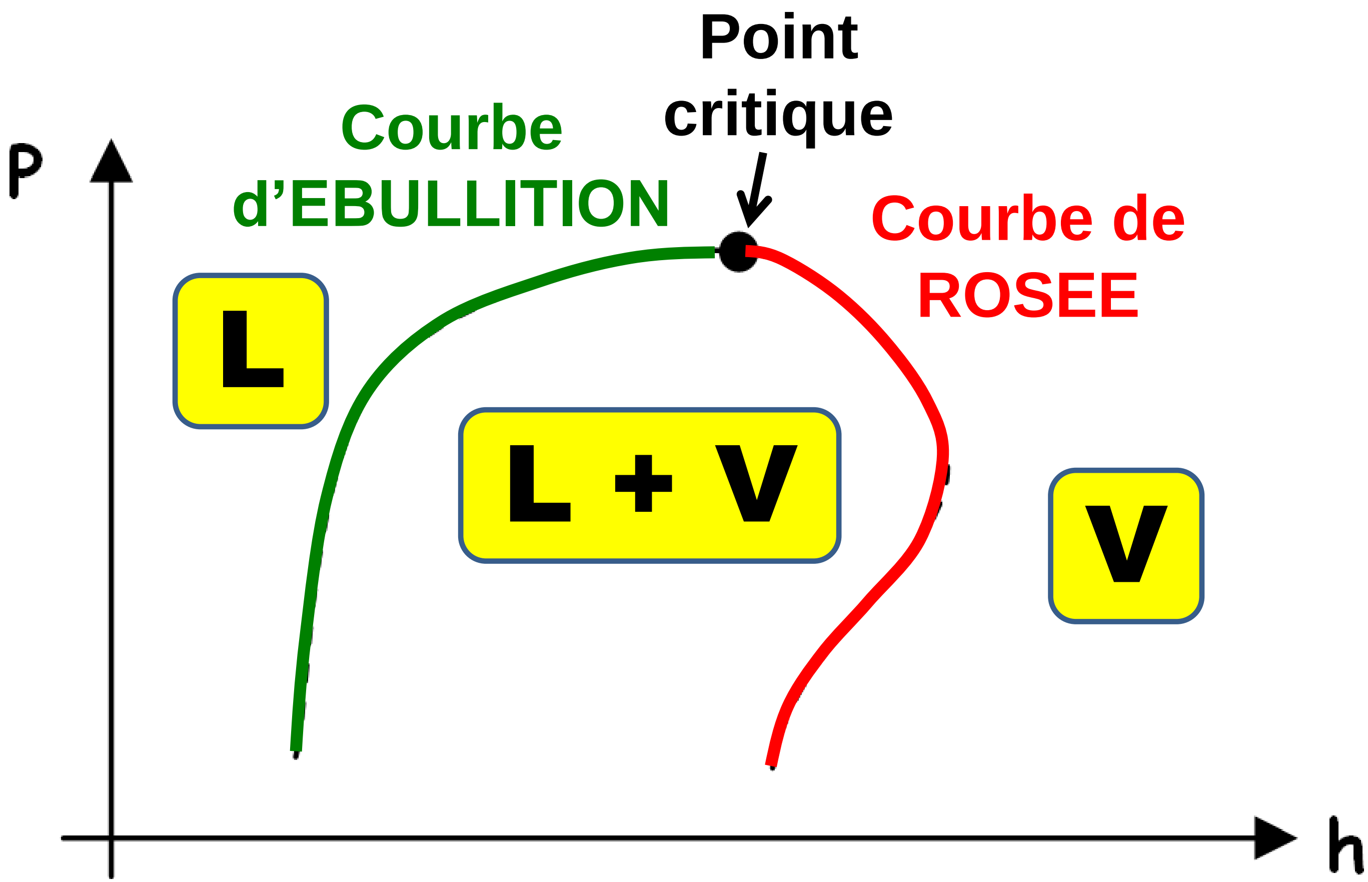


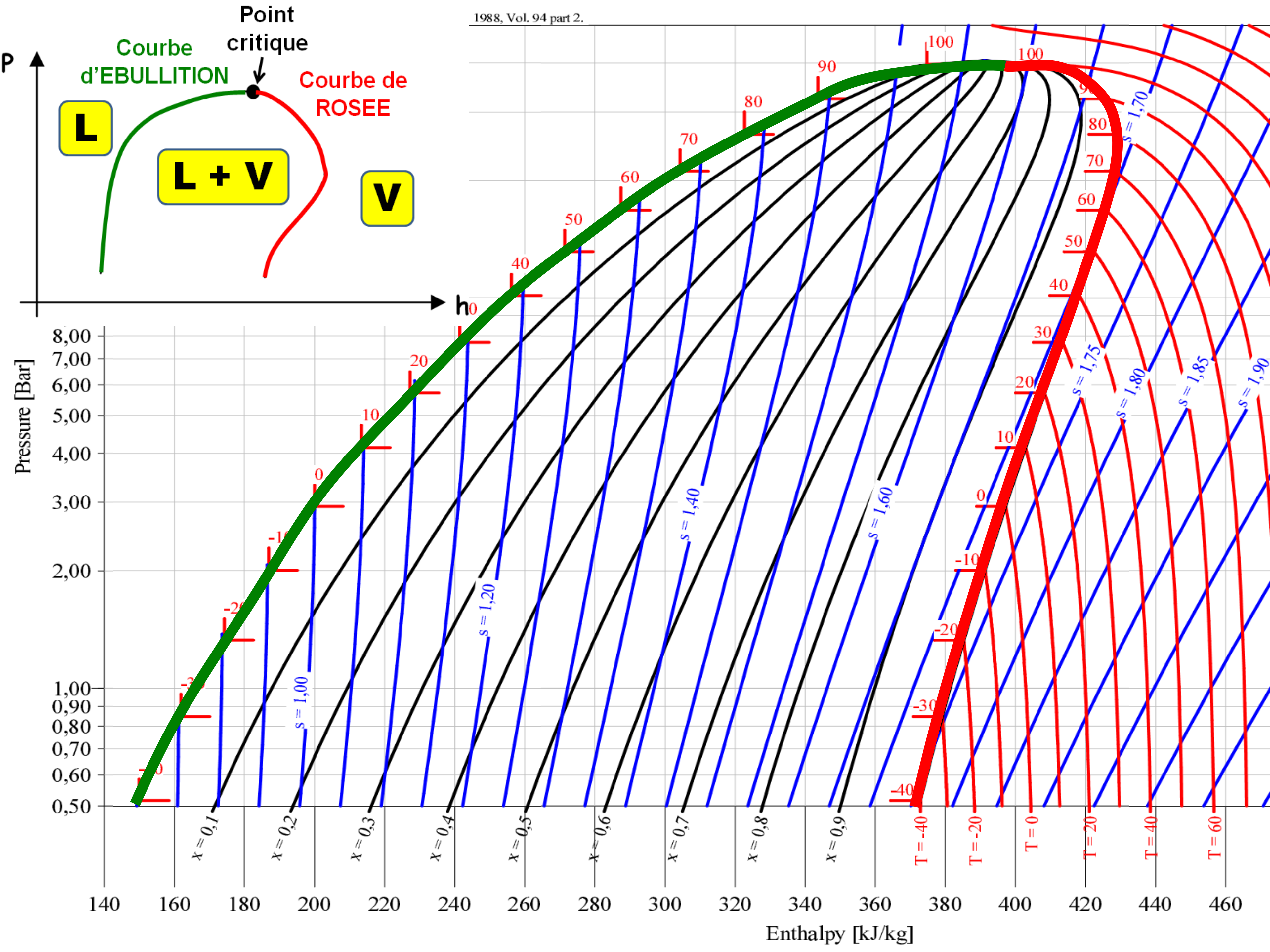
R134a
Ref :D.P.Wilson & R.S.Basu, ASHRAE Transactions 1988, Vol. 94 part 2.
DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)]. v in [m^3/kg]. T in [ºC]
M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen. 12-10-07
Pressure [Bar]
Enthalpy [kJ/kg]

2) Exploitation avec un diagramme (P,h)

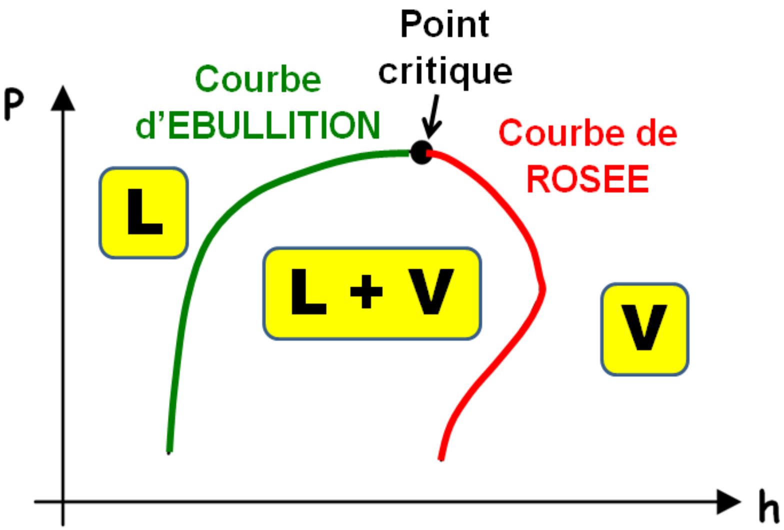
a/ Description du diagramme (P, h)

La courbe de SATURATION



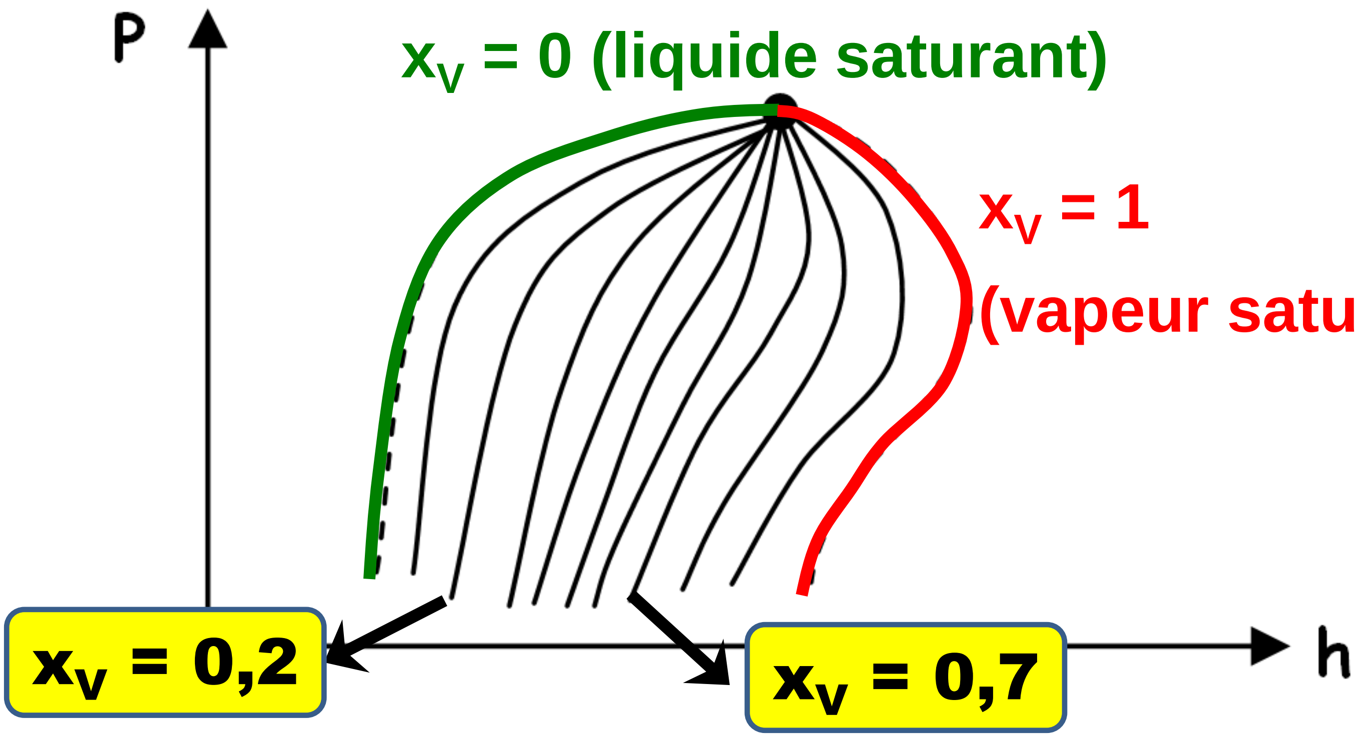

Point critique
Courbe d'EBULLITION
Courbe de ROSEE
P
h
L
L + V
V
1988, Vol. 94 part 2.
Pressure [Bar]
Enthalpy [kJ/kg]
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
140
160
180
200
220
240
260
280
300
320
340
360
380
400
420
440
460
x = 0,1
x = 0,2
x = 0,3
x = 0,4
x = 0,5
x = 0,6
x = 0,7
x = 0,8
x = 0,9
T = -40
T = -20
T = 0
T = 20
T = 40
T = 60
s = 1,00
s = 1,20
s = 1,40
s = 1,60
s = 1,70
s = 1,75
s = 1,80
s = 1,85
s = 1,90
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40

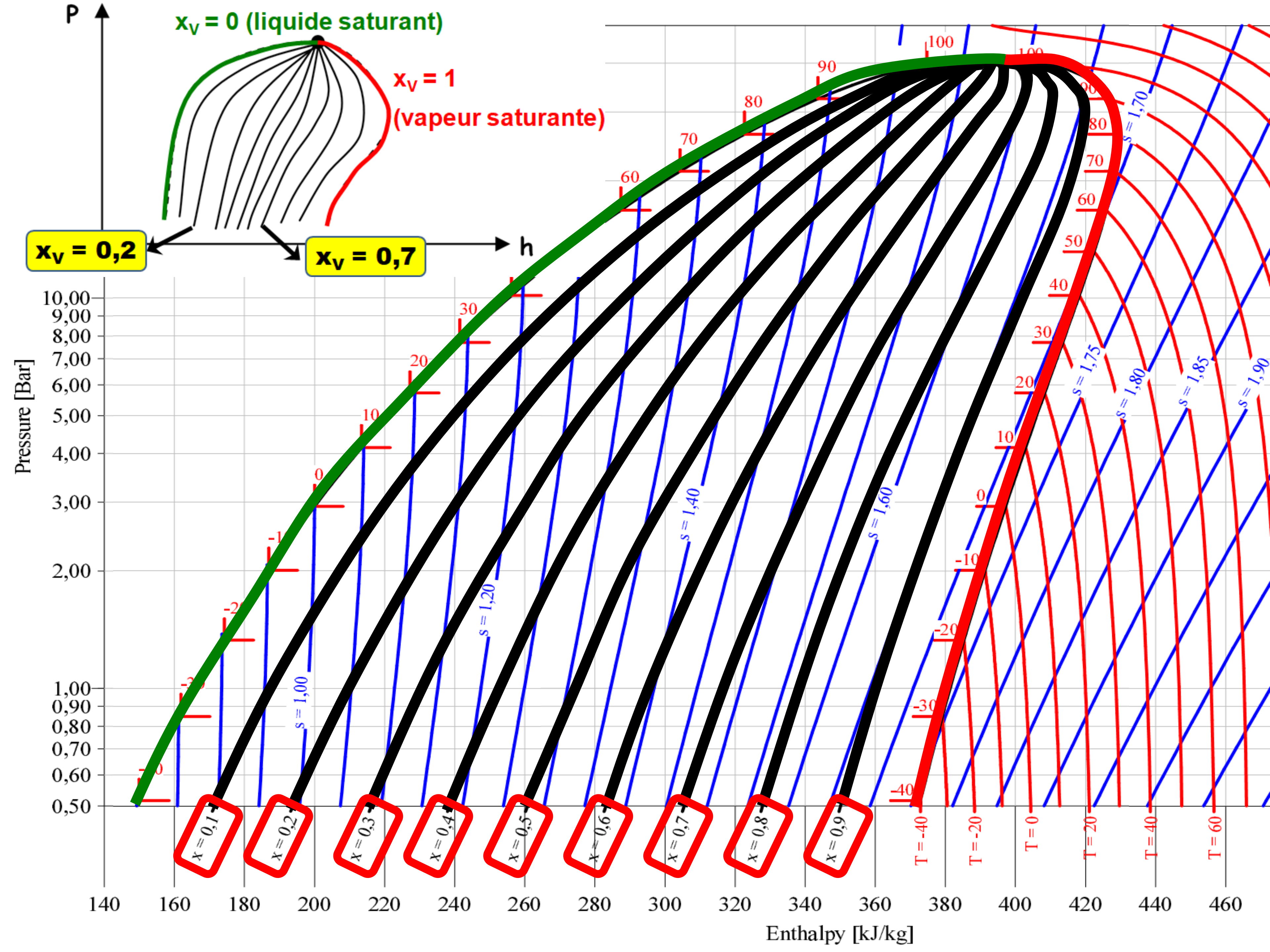
La courbe de SATURATION



Les ISOTITRES

Courbes où **le titre massique en vapeur** (w_V ou x_V) **est CONSTANT**.

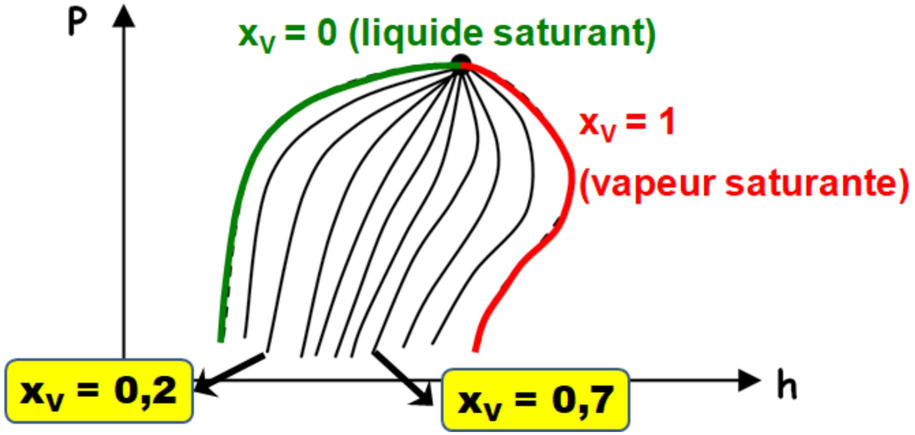




P
xV = 0 (liquide saturant)
xV = 1
(vapeur saturante)
xV = 0,2
xV = 0,7
h
Pressure [Bar]
Enthalpy [kJ/kg]
x = 0,1
x = 0,2
x = 0,3
x = 0,4
x = 0,5
x = 0,6
x = 0,7
x = 0,8
x = 0,9
s = 1,00
s = 1,20
s = 1,40
s = 1,60
s = 1,70
s = 1,75
s = 1,80
s = 1,85
s = 1,90
T = -40
T = -20
T = 0
T = 20
T = 40
T = 60

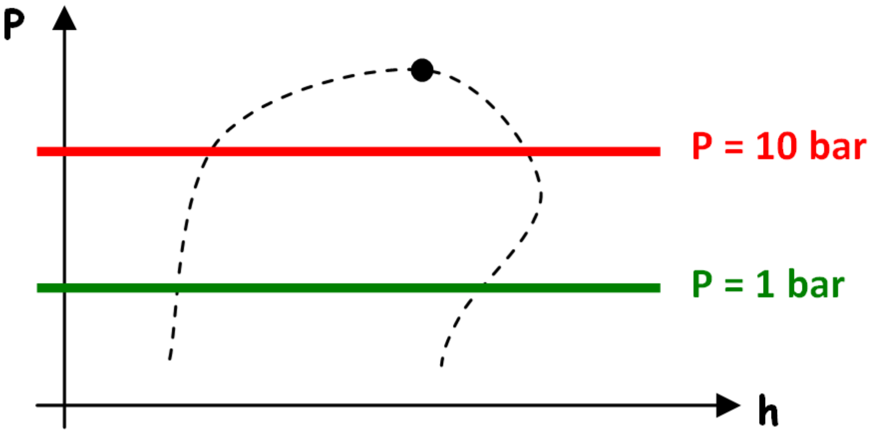
Les ISOTITRES

Courbes où **le titre massique en vapeur** (w_V ou x_V) **est CONSTANT**.



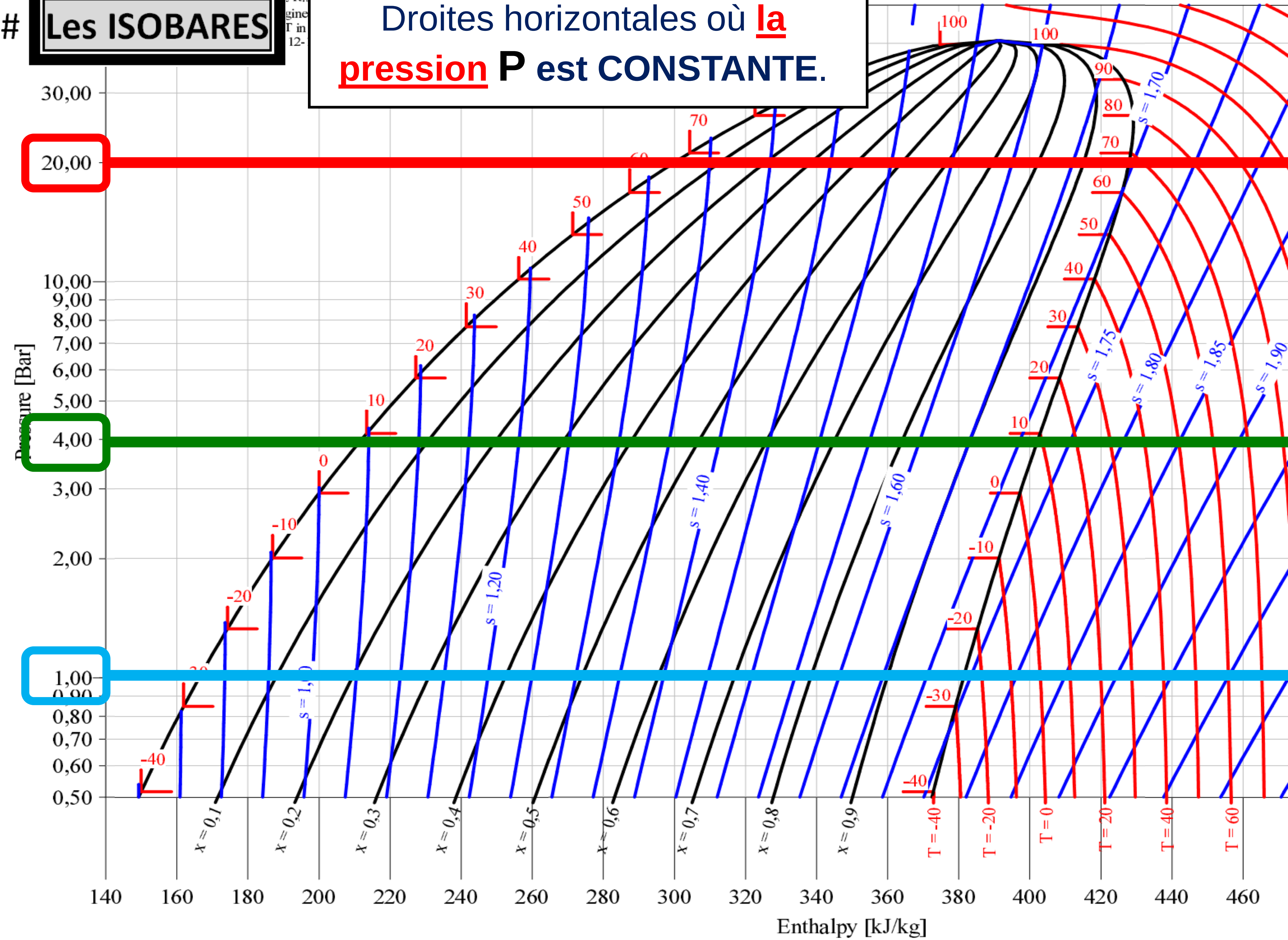
Les ISOBARES

Droites horizontales où **la pression** P **est CONSTANTE**.



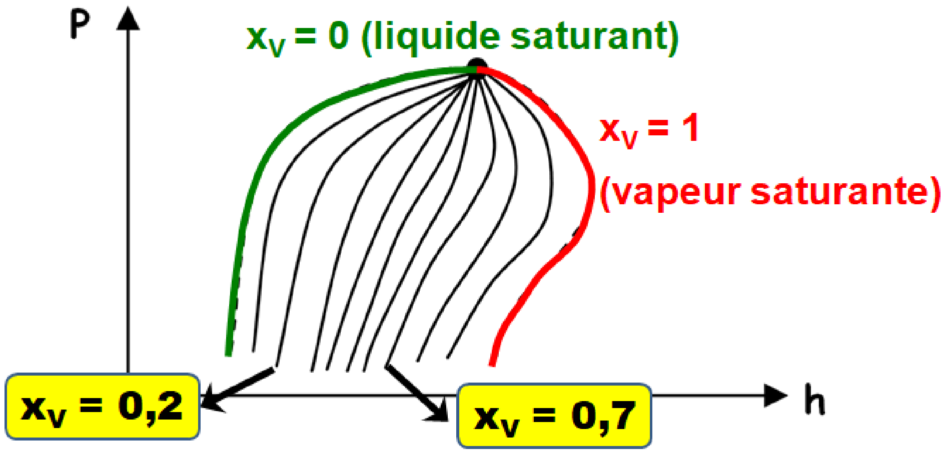
Les ISOBARES

Droites horizontales où **la pression P est CONSTANTE.**



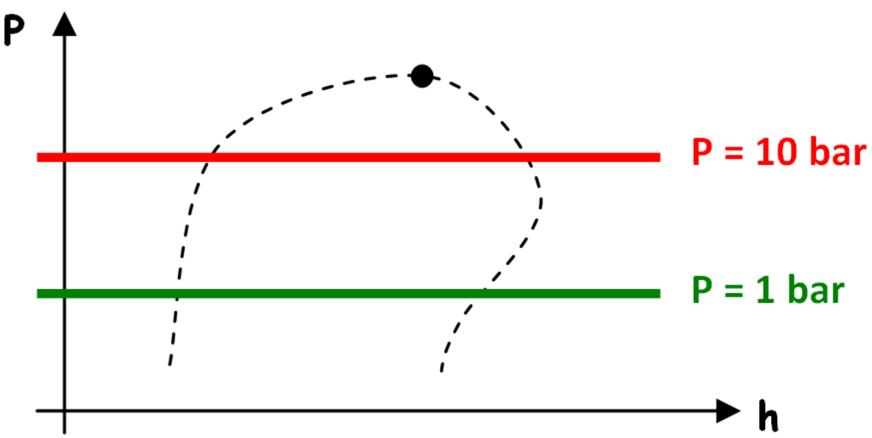
Les ISOTITRES

Courbes où **le titre massique en vapeur** (**w_V** ou **x_V**) **est CONSTANT**.



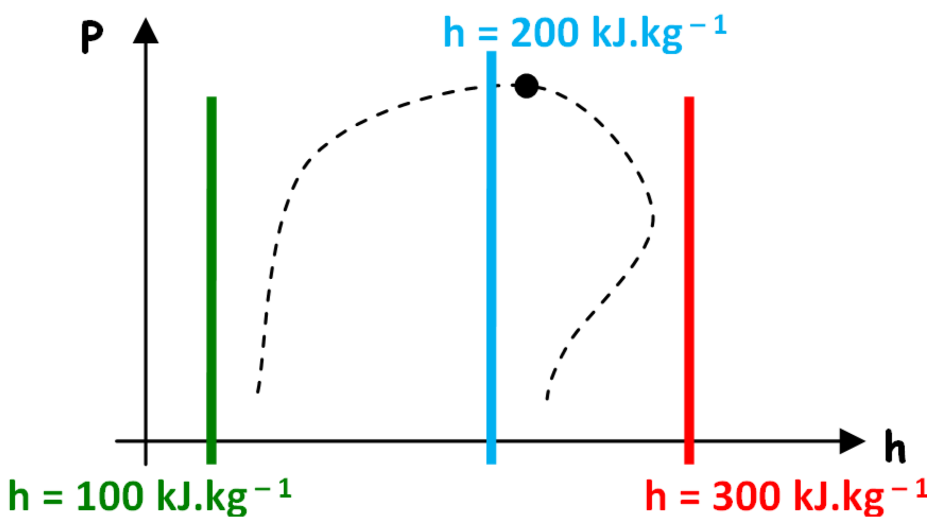
Les ISOBARES

Droites horizontales où **la pression P est CONSTANTE**.



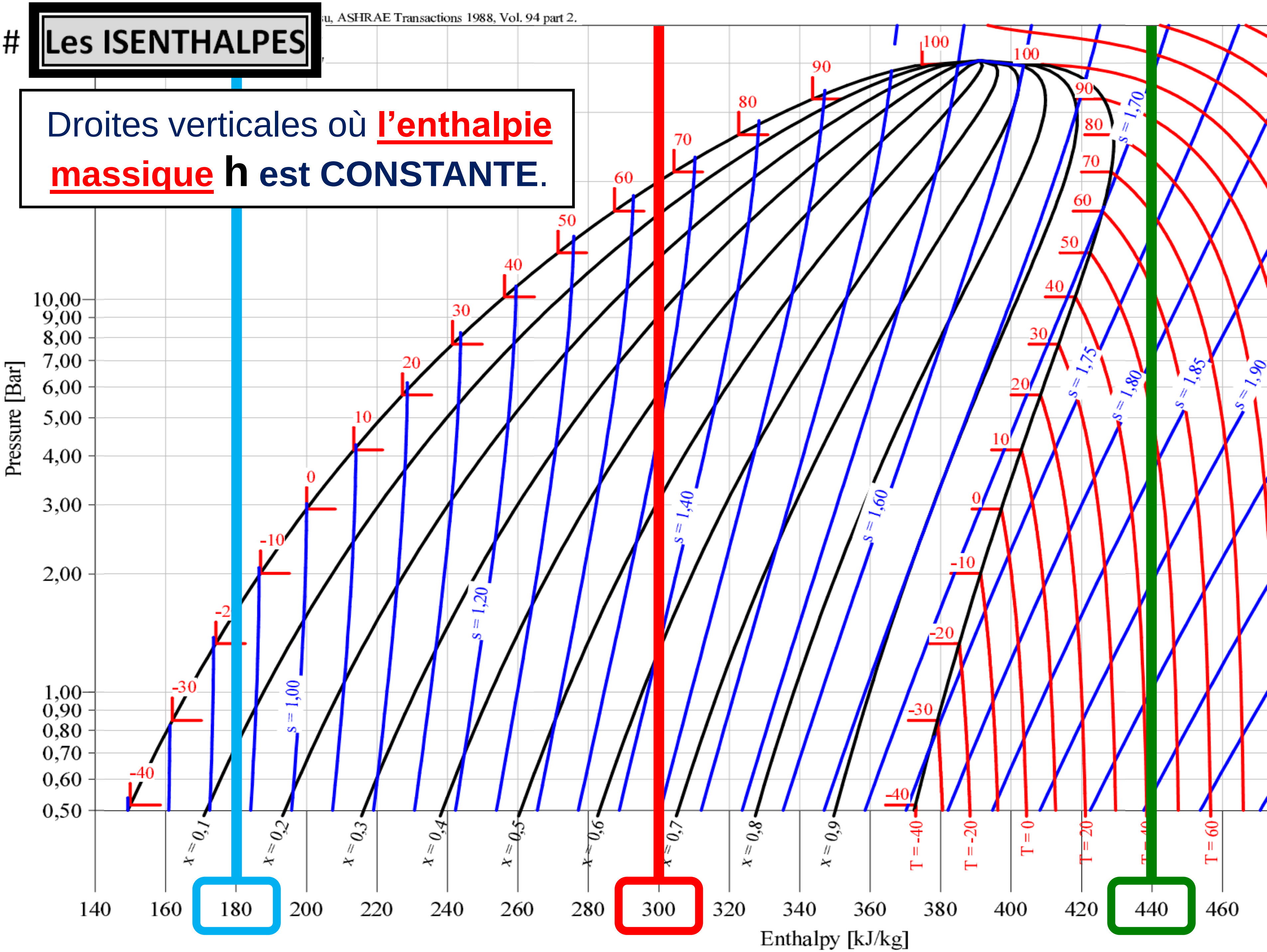
Les ISENTHALPES

Droites verticales où **l'enthalpie massique h est CONSTANTE**.



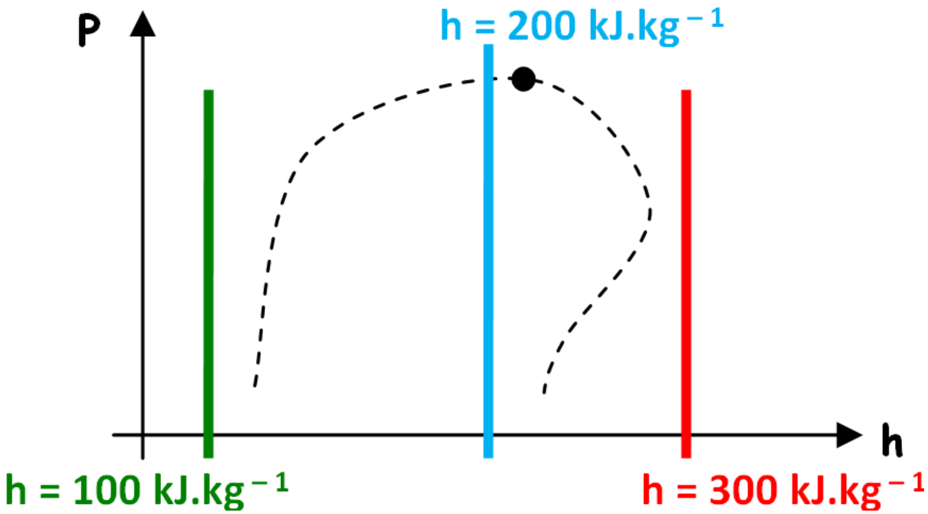
Les ISENTHALPES

Droites verticales où **l'enthalpie massique** **h** **est CONSTANTE.**



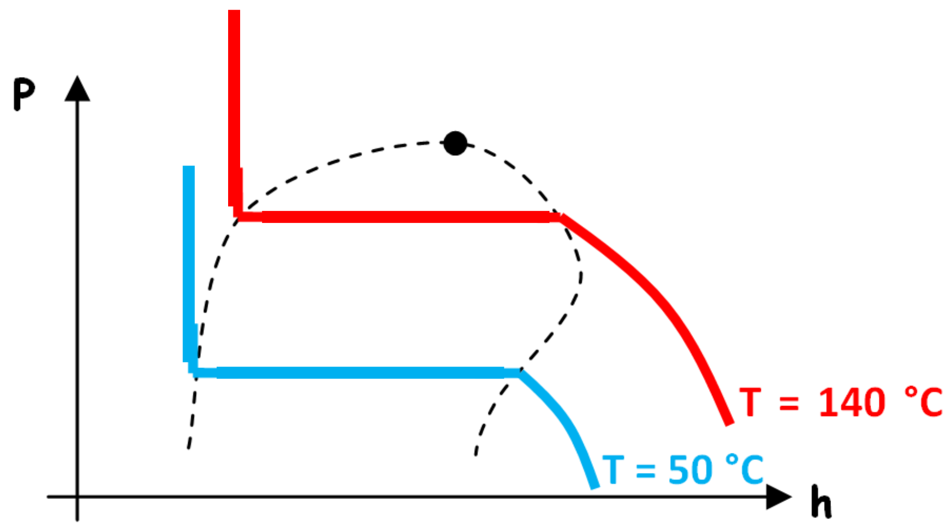
Les ISENTHALPES

Droites verticales où **l'enthalpie massique** **h** **est CONSTANTE**.



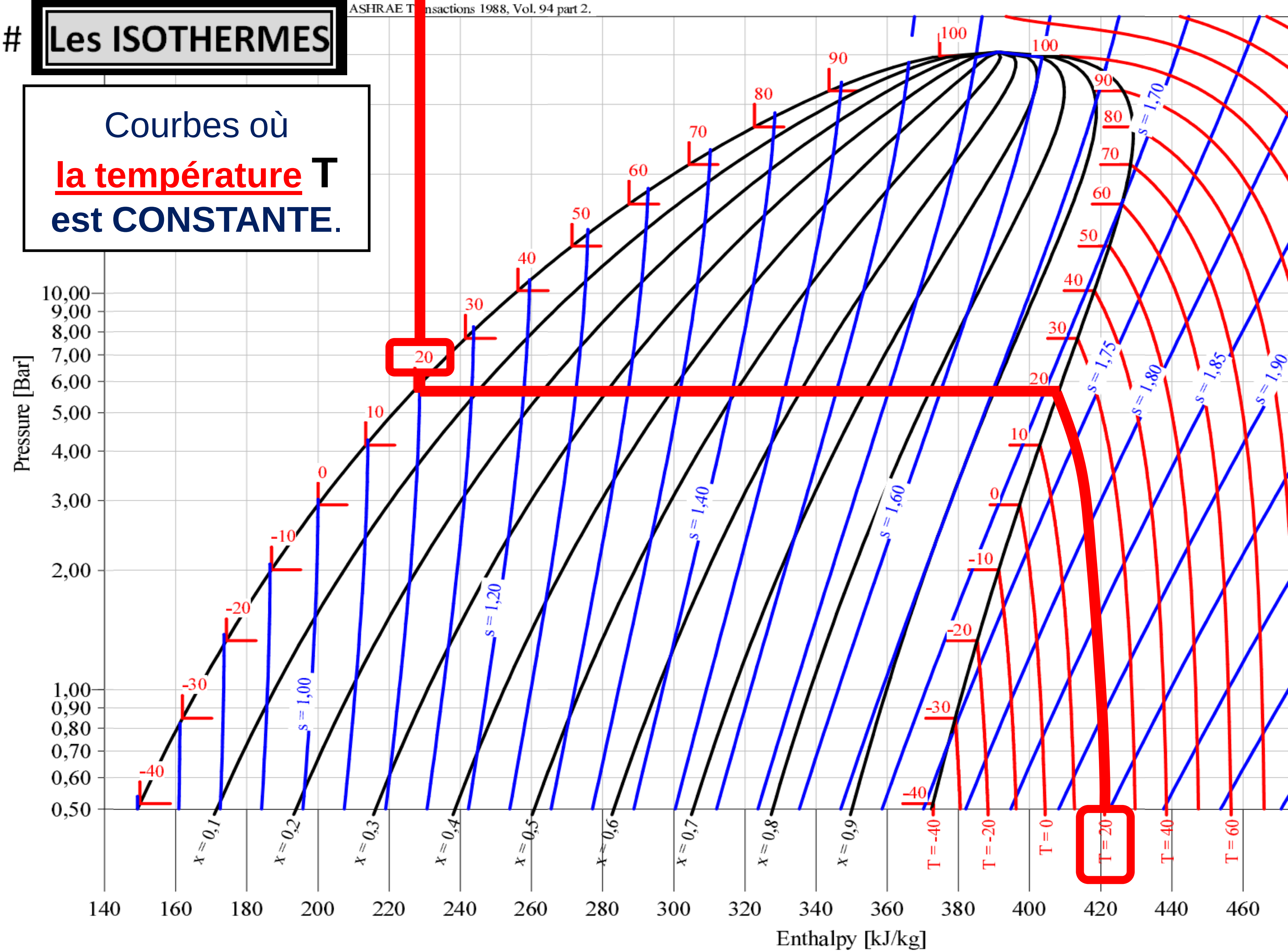
Les ISOTHERMES

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



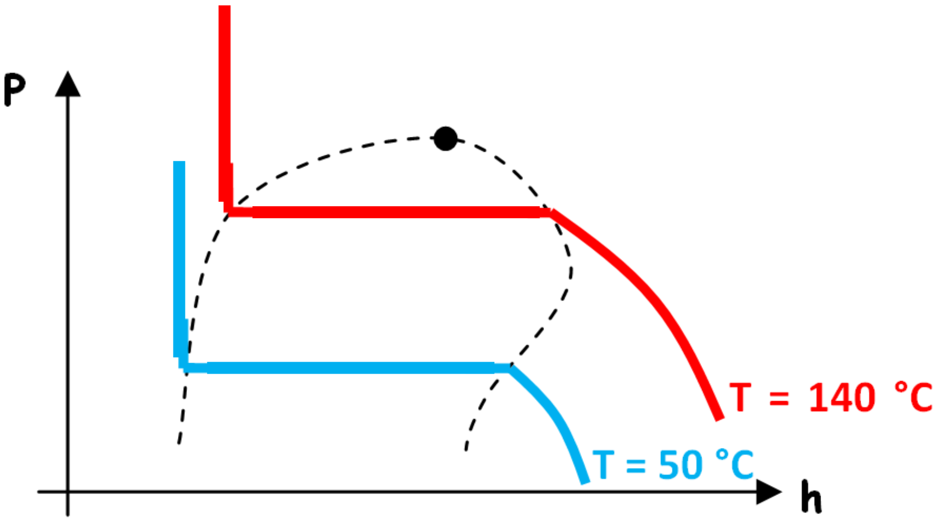
Les ISOTHERMES

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



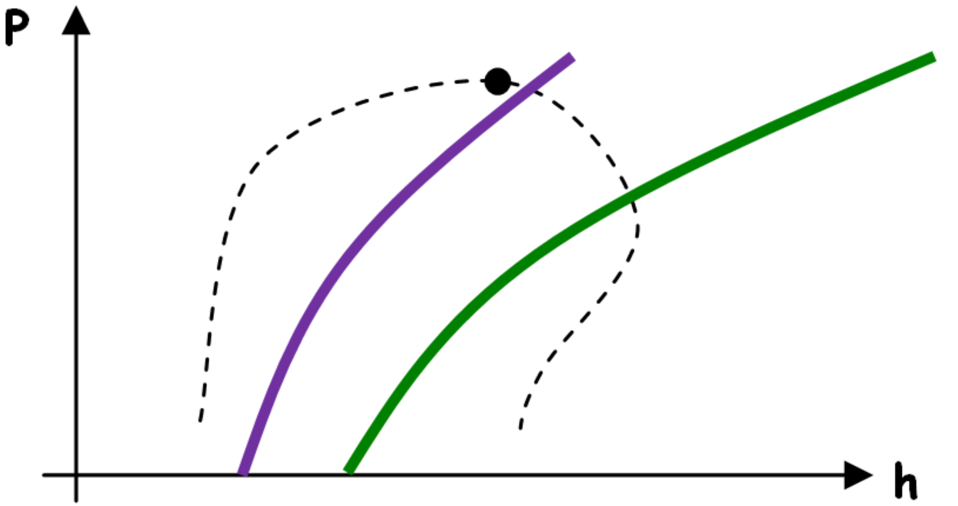
Les ISOTHERMES

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



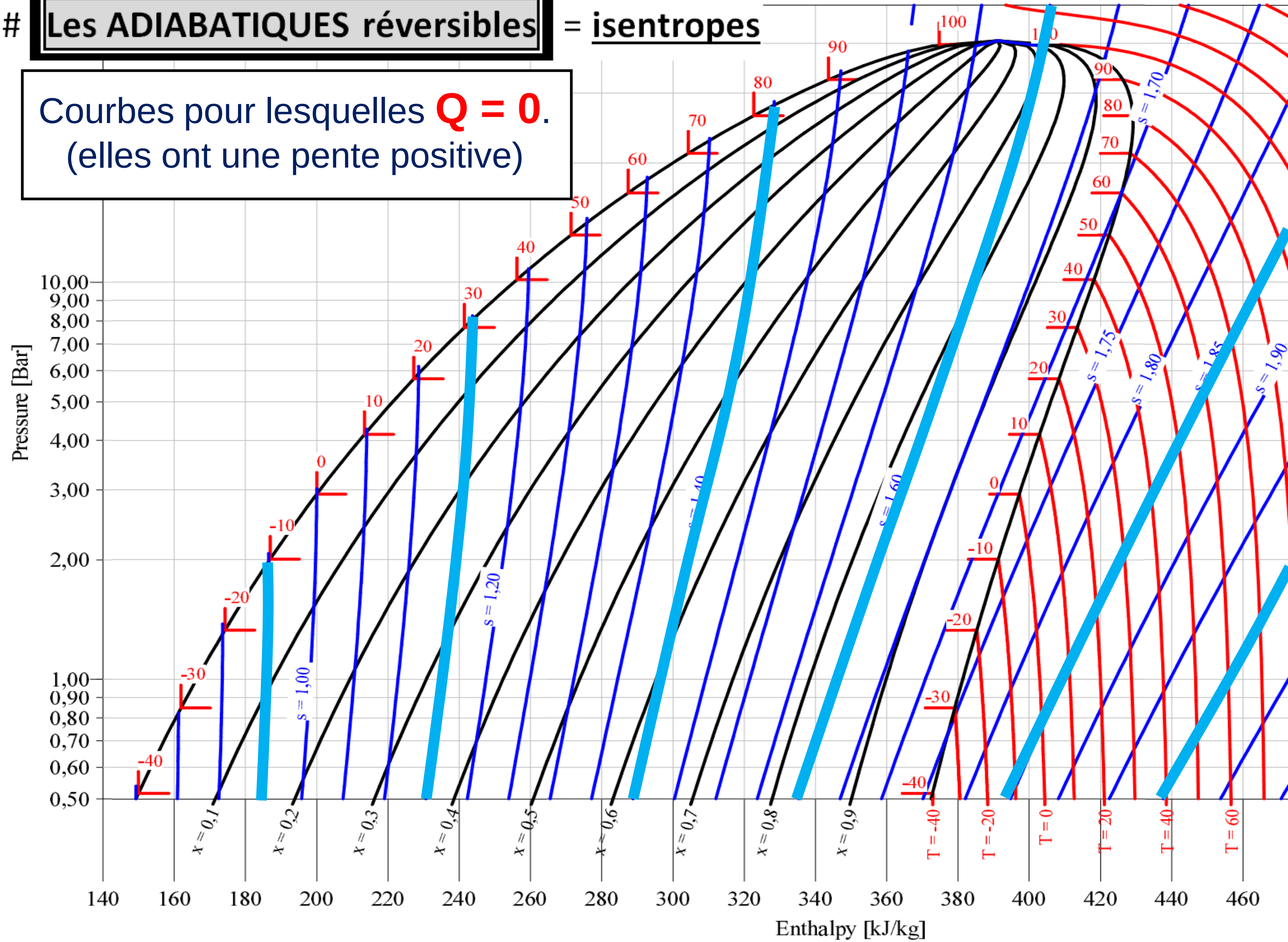
Les ADIABATIQUES réversibles = isentropes

Courbes pour lesquelles **Q = 0**.
(elles ont une pente positive)



Les ADIABATIQUES réversibles = isentropes

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 :*

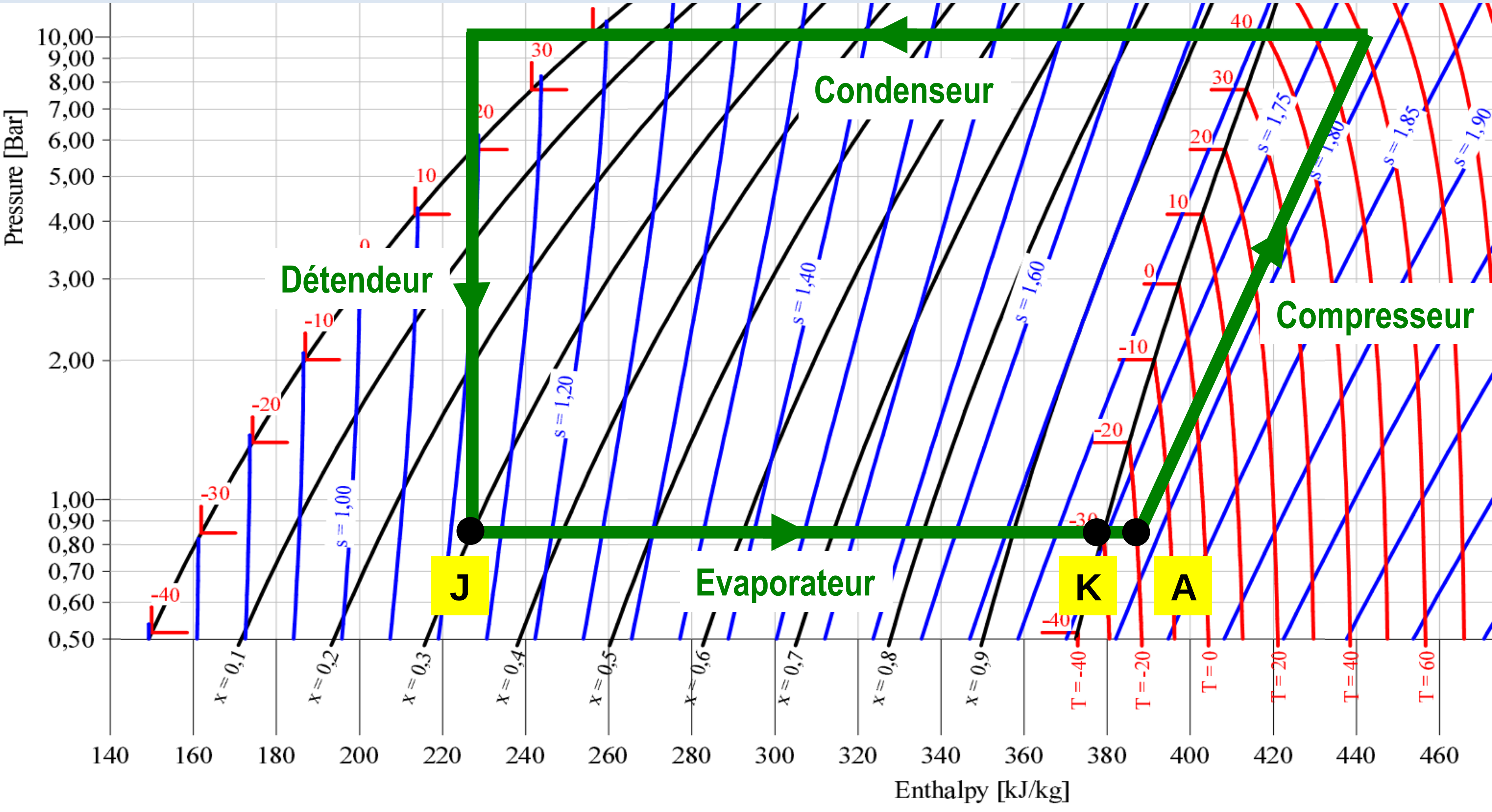
• **Transformation isobare J → K→ A (Evaporateur)** : *En* **J**, *le fluide est sous forme diphasée (70 % de liquide et 30 % de gaz) à la température* $\mathbf{T_J = -30\ °C}$ *et à la pression de vapeur saturante* $\mathbf{P_J}$. *Il est alors complètement vaporisé suivant une transformation isobare 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* $\mathbf{P_{sat}(T_J)}$ *jusqu'à l'état* **A**, *caractérisé par une température* $\mathbf{T_A = -20\ °C}$.

• **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* $\mathbf{P_B = 10\ bar}$.

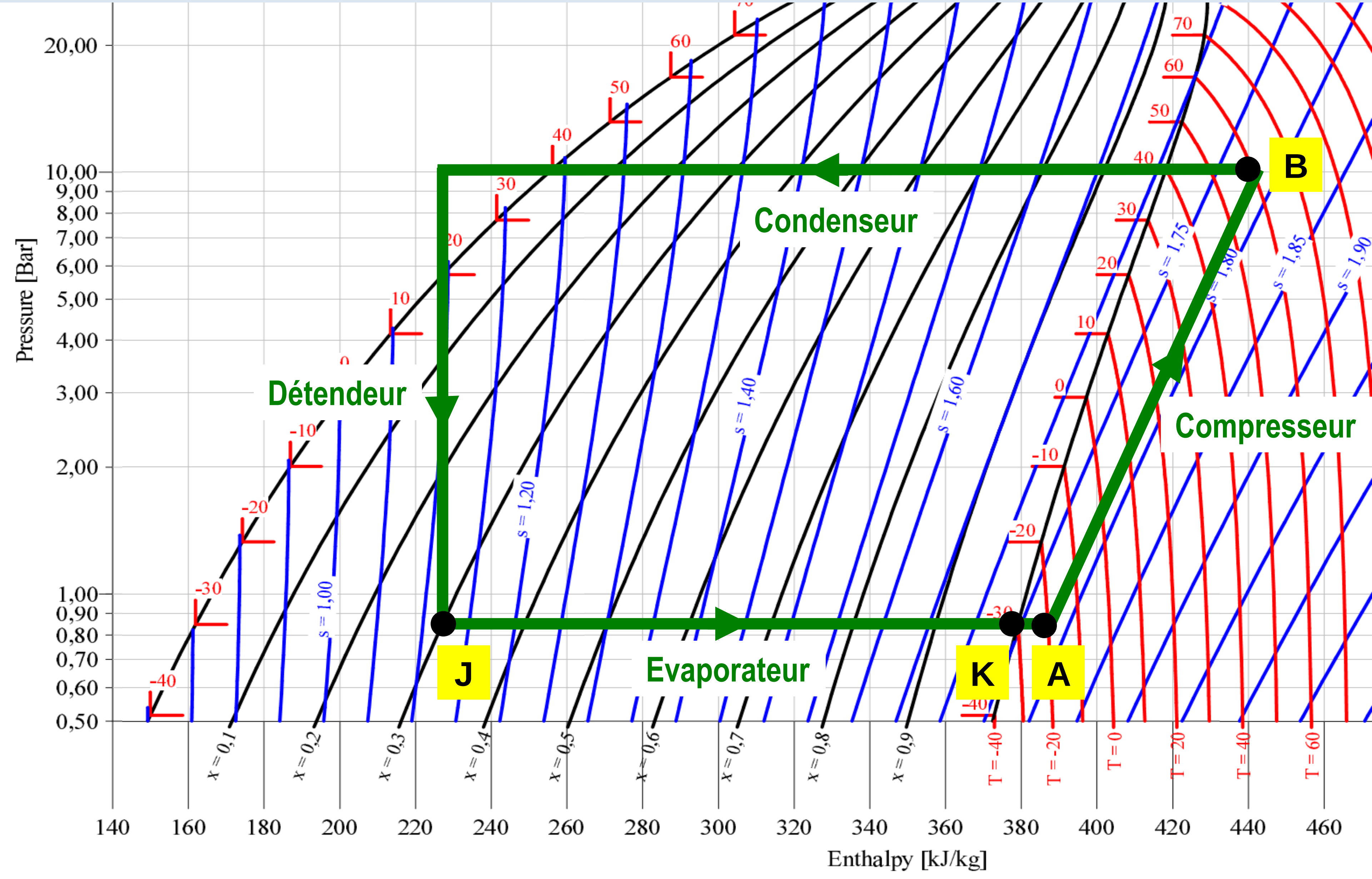
• **Transformation isobare B → D → E → G (Condenseur)** : *la vapeur est refroidie à pression constante. On passe par l'état* **D** *où la 1ère goutte de liquide apparaît puis par l'état* **E** *où la dernière bulle de gaz se condense. On poursuit alors la transformation isobare en réalisant un sous-refroidissement du liquide obtenu jusqu'à un état* **G** *où la température atteint* $\mathbf{T_G = 20\ °C}$.

• **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**.

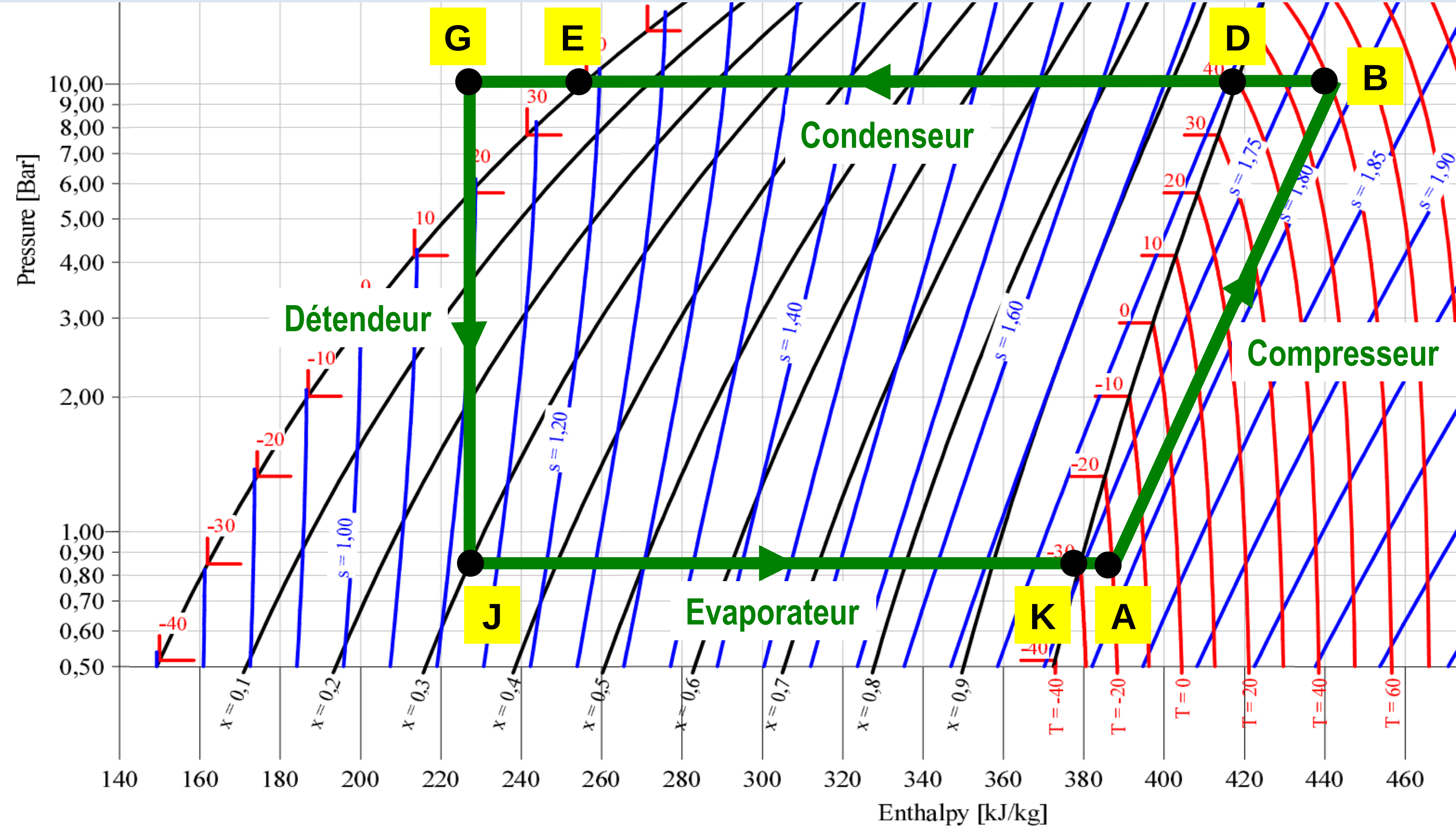
• **<u>Transformation isobare J → K→ A</u>** <u>(Evaporateur)</u> : *En* **J**, *le fluide est sous forme diphasée (70 % de liquide et 30 % de gaz) à la température* $\mathbf{T_J = -30\ °C}$ *et à la pression de vapeur saturante* $\mathbf{P_J}$. *Il est alors complètement vaporisé suivant une transformation 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* $\mathbf{P_{sat}(T_J)}$ *jusqu'à l'état* **A**, *caractérisé par une température* $\mathbf{T_A = -20\ °C}$.



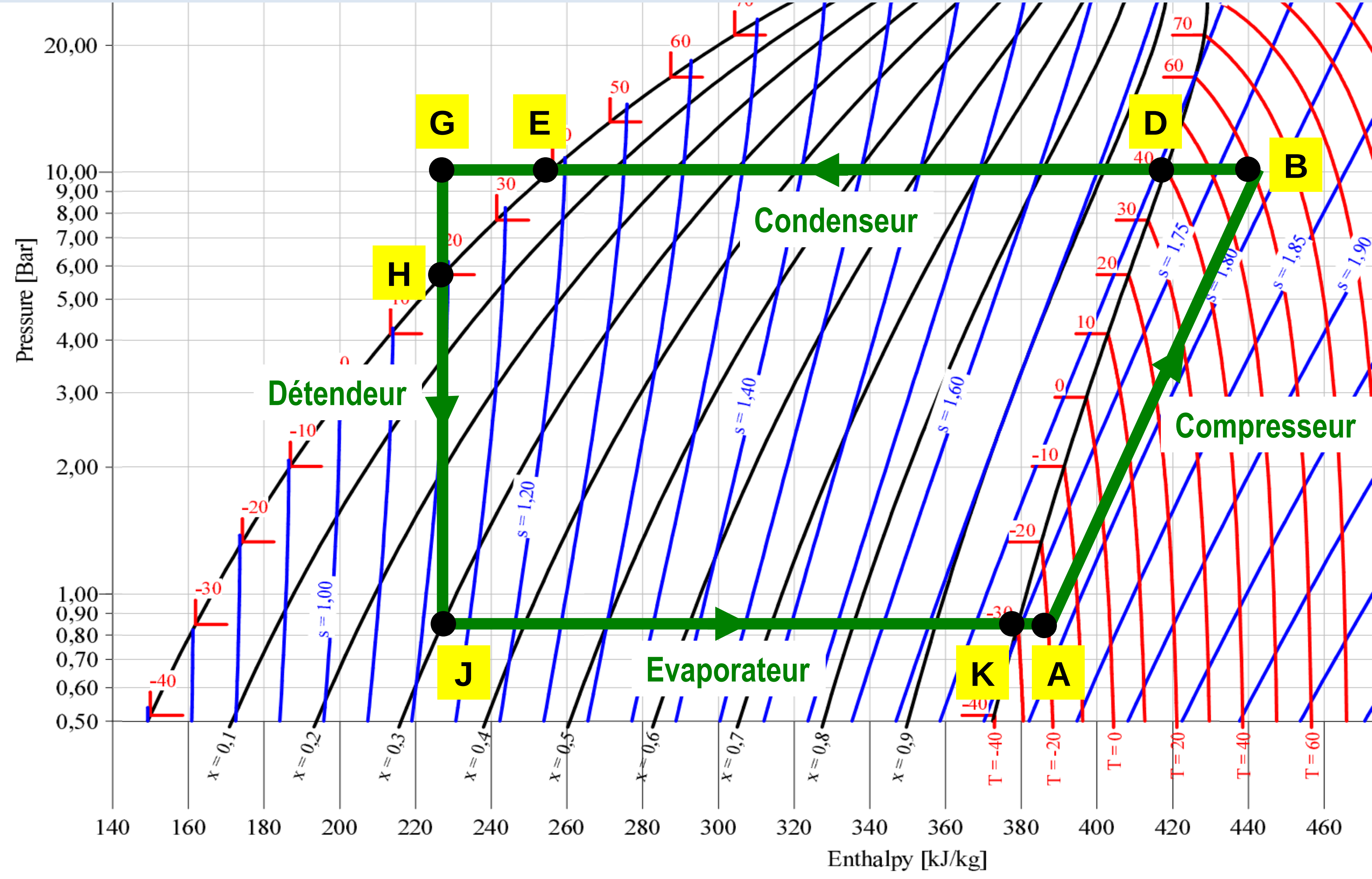
• **Transformation isentropique A → B (Compresseur)** : *la vapeur sèche subit une compression adiabatique, supposée réversible, dans le compresseur calorifugé ; il passe ainsi de l'état* **A** *à l'état* **B** *où la pression est maximale et vaut* $\mathbf{P_B = 10\ bar}$.



• **<u>Transformation isobare B → D → E → G</u>** **<u>(Condenseur)</u>** : *la vapeur est refroidie à pression constante. On passe par l'état* **D** *où la 1ère 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* $\mathbf{T_G = 20\ °C}$.



• **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**.



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

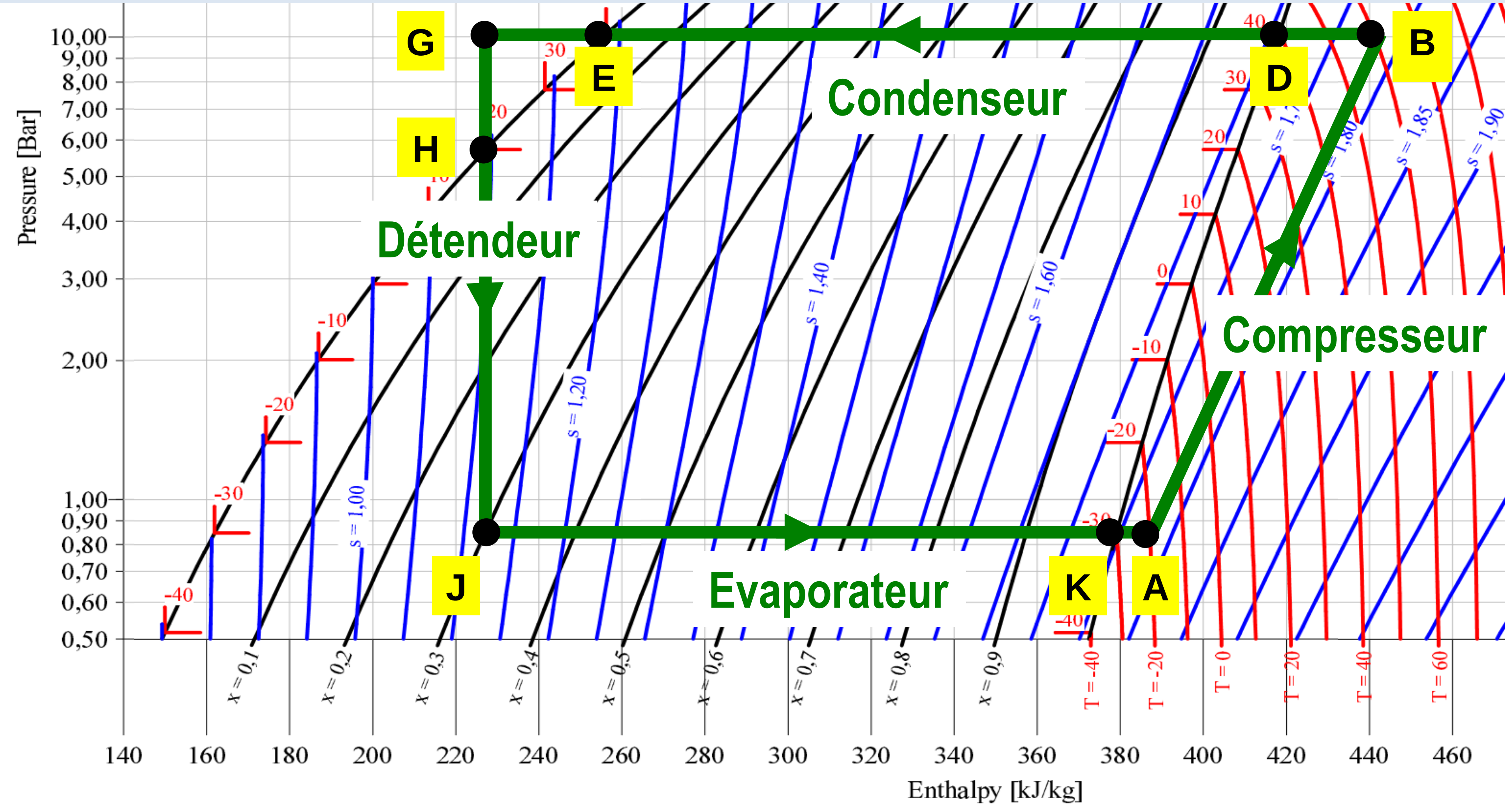
a- *la pression de l'évaporateur :* $\mathbf{P_{év}}$ = **0,85 bar**

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

c- *le titre en vapeur à l'entrée de l'évaporateur :* $\mathbf{x_V}$ = **0,3**

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

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

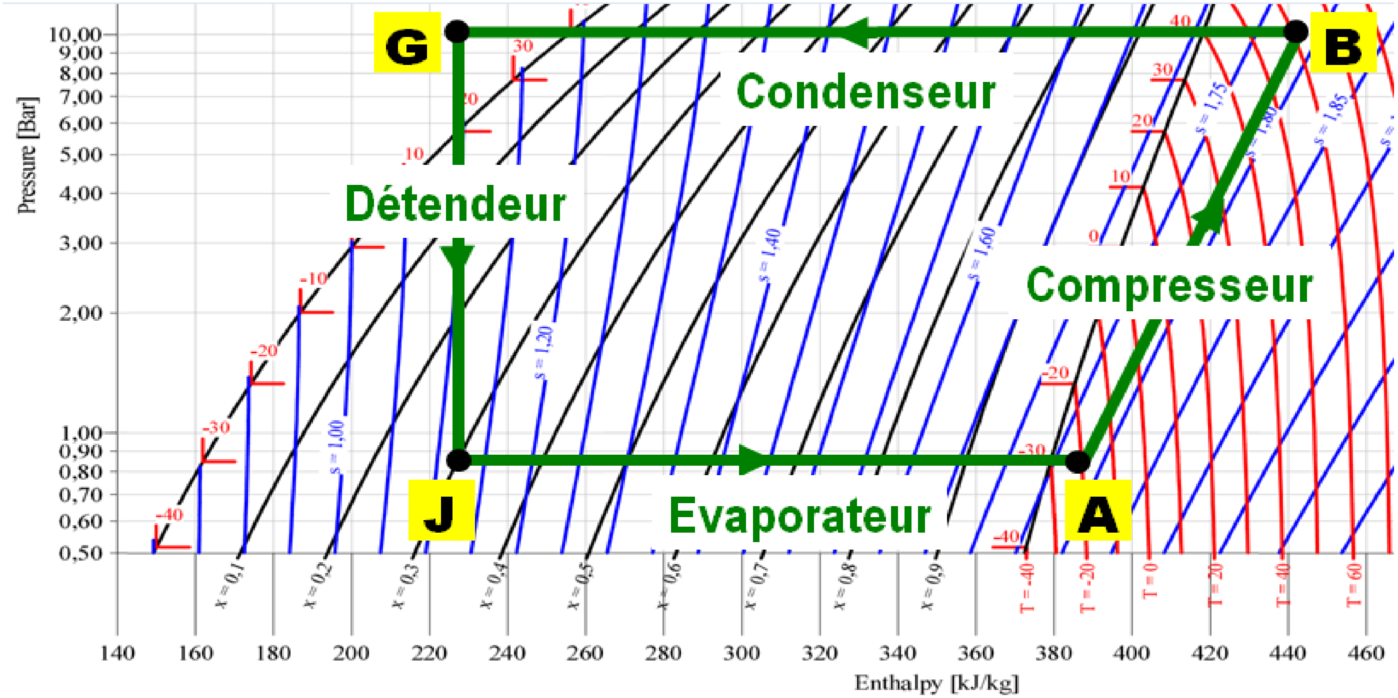


2) *À l'aide du diagramme* (P, h) *et des données précédentes, déterminer :*

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

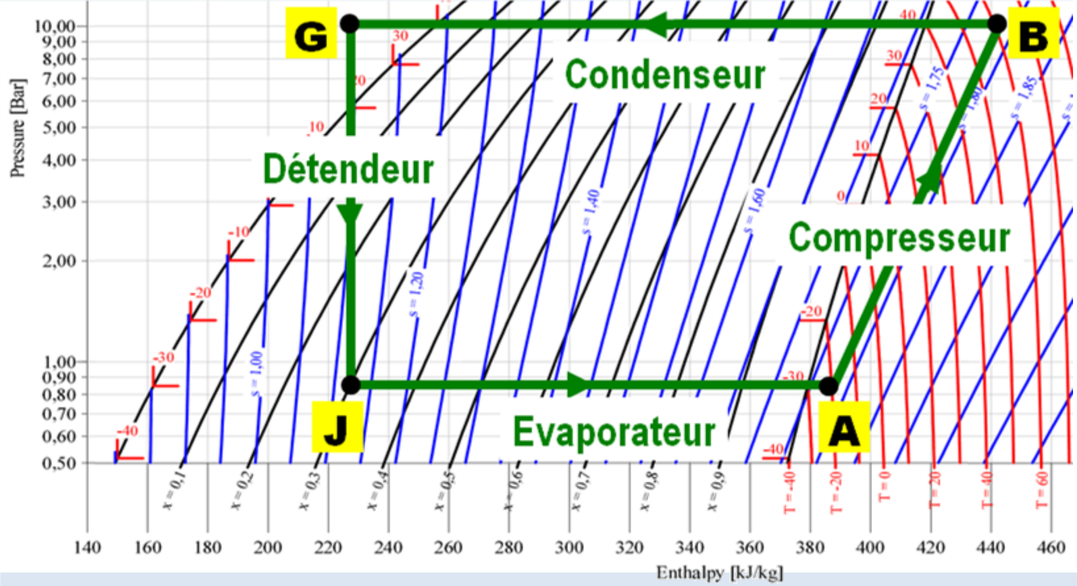
d- *la température à la sortie du compresseur :* T_{MAX} = **60 °C**

e- *la température à laquelle la condensation a lieu :* T_{COND} = **40 °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 ***1er principe pour un fluide en écoulement stationnaire*** entre ..**B**.. et ..**G**.. conduit à la relation : $\Delta h_{B \to G} = w_{condenseur} + q_{condenseur}$
- Or, il n'y a aucune pièce mobile dans le condenseur, donc ..$w_{condenseur}$..**= 0**...
- Donc $q_{condenseur} = q_C = h_G - h_B = 227 - 445 =$ $\boxed{-218 \text{ kJ.kg}^{-1}}$



f- *la valeur du* ***<u>transfert thermique massique</u>*** q_C ***réalisé avec la source CHAUDE*** :

- Ce transfert thermique a lieu dans le ...condenseur..., sur le trajet ..B.. → ..G.. .
- L'application du ***<u>1er principe pour un fluide en écoulement stationnaire</u>*** entre ..B.. et ..G..

conduit à la relation : $\Delta h_{B \to G} = w_{condenseur} + q_{condenseur}$

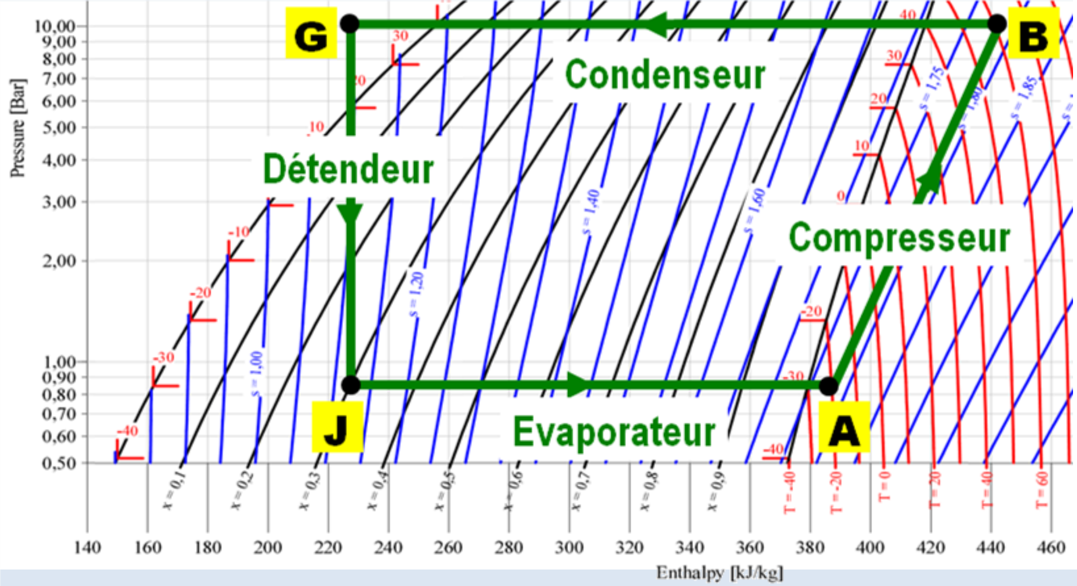
- Or, il n'y a aucune pièce mobile dans le condenseur, donc ..$w_{condenseur}$ = 0...
- Donc $q_{condenseur} = q_C = h_G - h_B = 227 - 445 = \boxed{-218\ kJ.kg^{-1}}$

g- *la valeur du* ***<u>transfert thermique massique</u>*** q_F ***réalisé avec la source FROIDE*** :

- Ce transfert thermique a lieu dans l' ...évaporateur..., sur le trajet ..J.. → ..A.. .
- L'application du ***<u>1er principe pour un fluide en écoulement stationnaire</u>*** entre ..J.. et ..A.

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

- Or, il n'y a aucune pièce mobile dans l'évaporateur, donc ..$w_{évaporateur}$ = 0..
- Donc $q_{évaporateur} = q_F = h_A - h_J = 387 - 227 = \boxed{+160\ kJ.kg^{-1}}$



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 ***1er principe pour un fluide en écoulement stationnaire*** entre …**J**… et …**A**… conduit à la relation : $\Delta h_{J \to A} = w_{\text{évaporateur}} + q_{\text{évaporateur}}$
- Or, il n'y a aucune pièce mobile dans l'évaporateur, donc ..$w_{\text{évaporateur}} = 0$..
- Donc $q_{\text{évaporateur}} = q_F = h_A - h_J = 387 - 227 = \boxed{+ 160 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

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

- Ce travail mécanique n'a lieu que dans le ..**compresseur**.., sur le trajet …**A**… → …**B**… .
- L'application du ***1er principe pour un fluide en écoulement stationnaire*** entre …**A**… et …**B**… conduit à la relation : $\Delta h_{A \to B} = w_{\text{compresseur}} + q_{\text{compresseur}}$
- Or, la compression est **adiabatique**, donc ..$q_{\text{compresseur}} = 0$..
- Donc $w_{\text{compresseur}} = w = h_B - h_A = 445 - 387 = \boxed{+ 58 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

f- *la valeur du* ***transfert thermique massique*** q_C ***réalisé avec la source CHAUDE*** :

$$q_{condenseur} = q_C = \underline{-\ 218\ kJ.kg^{-1}}$$

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

$$q_{évaporateur} = q_F = \underline{+\ 160\ kJ.kg^{-1}}$$

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

- Ce travail mécanique n'a lieu que dans le ....**compresseur**...... sur le trajet ….**A**. → ….**B**. .
- L'application du ***1er principe pour un fluide en écoulement stationnaire*** entre ….**A**.. et ….**B**.

conduit à la relation : $\Delta h_{A \to B} = w_{compresseur} + q_{compresseur}$

- Or, la compression est **adiabatique**, donc ..$q_{compresseur}$.........= **0**..
- Donc $w_{compresseur} = w = h_B - h_A = 445 - 387 = \underline{+\ 58\ kJ.kg^{-1}}$

i- *l'efficacité* **e** *de ce congélateur* :

$$e = \frac{Q_F}{W} \quad \text{soit} \quad \boxed{e = \frac{q_F}{w}} \qquad e = \frac{160}{58} = \underline{2{,}8}\ (280\ \%)$$

j- *Comparaison avec l'efficacité maximale sachant que* T_F = - 18 °C *et* T_C = 20 °C :

$$\boxed{e_{MAX} = \frac{T_F}{T_C - T_F}} \qquad e_{MAX} = \frac{255}{293 - 255} = \underline{6{,}7}\ (670\ \%)$$

(On a bien $e < e_{MAX}$)