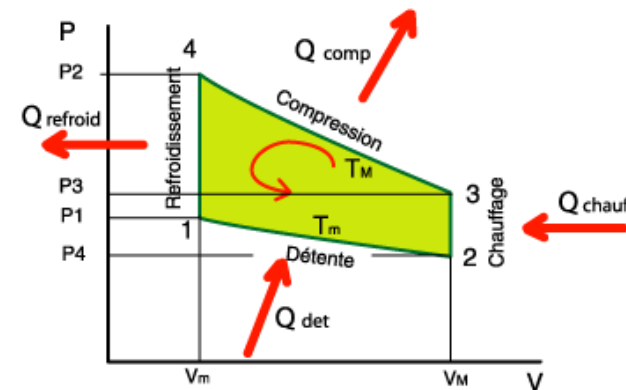




Université Sidi Mohamed Ben Abdellah

Ecole supérieure de Technologie (EST) de Fès

Installations Frigorifiques



Installations frigorifiques

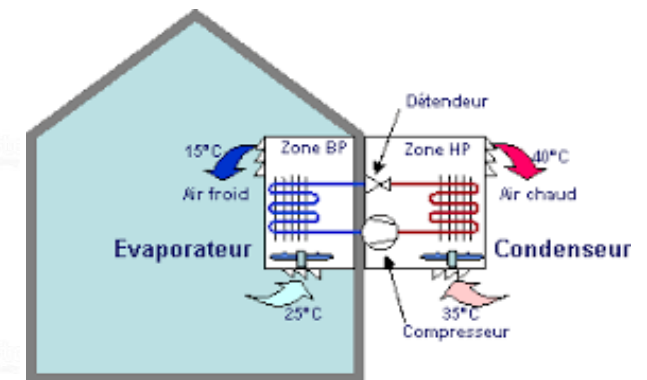
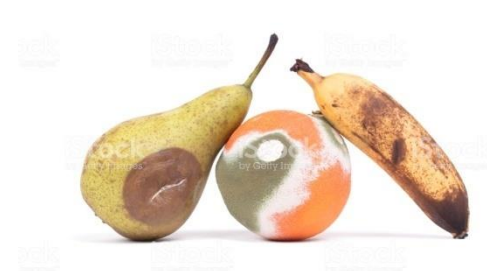
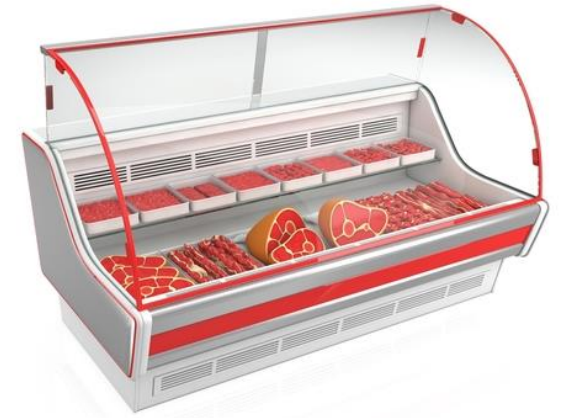
Plan

- I. Introduction**
- II. Modes de production du froid**
- III. Les fluides frigorigènes**
- IV. Organes principaux d'une machine frigorifique**
- V. Etude des machines frigorifiques à compression**
- VI. Organes annexes d'une machine frigorifique**
- VII. Organes de commande et de sécurité**

Installations frigorifiques

Introduction

Le froid trouve de nombreuses applications dans des domaines très variés (industries agroalimentaires, médecine, confort thermique, ...) et c'est dans le domaine alimentaire que le froid occupe une place prépondérante car il permet de limiter les gaspillages (pertes après récolte...) et de prolonger la durée de conservation des produits. Ainsi, l'objectif du froid est de maintenir la qualité originale des produits.



Installations frigorifiques

Introduction

L'avancée technologique de nos jours qui autorise un contrôle plus précis de la température et de l'humidité permet d'améliorer la production du froid.

Malgré que les appareils de réfrigération sont très différents.



Leur principe de « production » de froid est identique.

Les traitements thermiques à basse température (le froid) seront étudiés dans le cadre de ce cours.

Installations frigorifiques

Modes de production de froid

La production du froid qui consiste à absorber la chaleur contenue dans un milieu peut être obtenue suivant plusieurs modes. Nous citons à titre d'exemple:

- ✓ la fusion d'un corps solide
- ✓ la détente d'un gaz comprimé
- ✓ la vaporisation d'un liquide en circuit fermé

La vaporisation d'un liquide permet de produire du froid par l'absorption de la chaleur à travers un échangeur (évaporateur), la vapeur produite étant ultérieurement liquéfiée dans un autre échangeur (condenseur), le fluide décrit ainsi un cycle au sein d'une machine fonctionnant de manière continue.

La vaporisation d'un liquide en circuit fermé reste la méthode la plus utilisée pour la production du froid.

Installations frigorifiques

Machine frigorifique

La **production de froid** pour les besoins domestiques, commerciaux et industriels nécessitent l'utilisation d'un dispositif capable d'**extraire** de la **chaleur** du **milieu à refroidir** pour la **rejeter** dans un **milieu** dit **extérieur**, ce dispositif qui obéit nécessairement au second principe de la thermodynamique est appelé « **machine frigorifique** ».

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + S_i$$

Source chaude T2

(T2 > T1)



Impossible

Source froide T1



Une quantité de chaleur ne peut jamais être transférée **spontanément** d'une source froide vers une source chaude.

Installations frigorifiques

Eléments de physiques

- 1. Température**
- 2. Chaleur**
- 3. Puissance**
- 4. Pression**
- 5. Changement d'état**

Installations frigorifiques

Éléments de physiques

1. Température

Le chaud et le froid sont appréciés par des sensations d'où une évaluation irrationnelle de ces grandeurs. Ainsi, il a été défini la température qui permet une objectivité des mesures.

La température caractérise le niveau auquel la chaleur se trouve dans un corps permettant ainsi de dire qu'un corps est plus ou moins chaud qu'un autre.

Les températures dans le S.I. sont exprimées en °C (degrés Celsius) mais dans la littérature, on rencontre les degrés Fahrenheit (°F) et les degrés Kelvin (°K)

$$1^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} * (^{\circ}\text{F} - 32)$$

$$X (^{\circ}\text{C}) = (X + 273)\text{K}$$



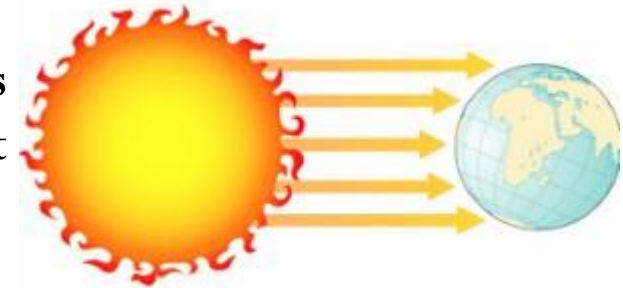
Installations frigorifiques

Eléments de physiques

2. Chaleur

La chaleur est une forme d'énergie (énergie de mouvement des molécules) qui va d'un point chaud (température plus élevée) vers un point froid (température moins élevée).

C'est la sensation perçue par nos organes de sens lorsque nous sommes placés devant le feu ou devant un corps incandescent en général.



L'unité légale de la chaleur est le Joule (J) mais la kCal (kiloCalorie) est également utilisée.

$$1 \text{ kCal} = 4,182 \text{ kJ}$$

Installations frigorifiques

Eléments de physiques

3. Puissance

La puissance est le rapport de l'énergie fournie ou absorbée sur l'unité de temps.
L'unité légale est le Watt (W).

Conversion d'unités :

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

$$1 \text{ kW} = 860 \text{ kCal/h}$$

$$1 \text{ cheval - vapeur} = 735,5 \text{ W}$$

Installations frigorifiques

Éléments de physiques

4. Pression

La pression est l'application d'une force sur une surface.

$$\text{Pascal} \longleftarrow P = \frac{F}{S} \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Newton} \\ \text{m}^2 \end{array}$$

L'unité légale de la pression est le Pascal (Pa), toutefois plusieurs autres unités sont couramment utilisées :

Le bar $1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa}$

L'Atmosphère $1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$

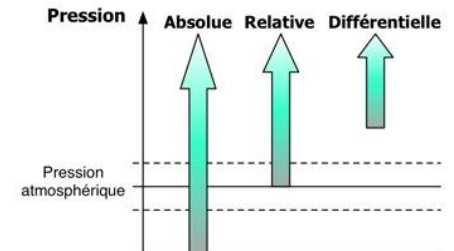
Le torr (mm Hg) $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$

Pression relative

C'est la pression lue au manomètre.
Pression qui règne à partir de la pression atmosphérique

Pression absolue

la pression est dite absolue lorsqu'elle est mesurée par rapport au vide



$$P_{\text{absolue}} = P_{\text{relative}} + P_{\text{atmosphérique}}$$

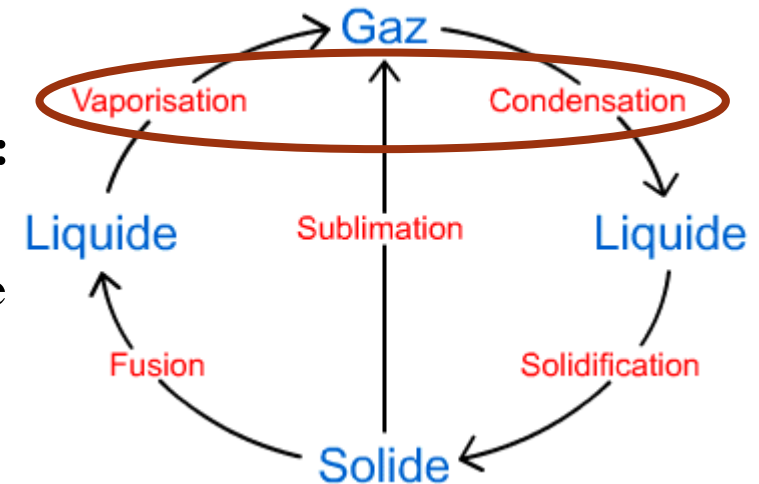
Installations frigorifiques

Éléments de physiques

5. Le changement d'état

Un corps physique peut prendre 3 états: solide, liquide ou gazeux.

Le passage d'un état physique à l'autre s'appelle changement d'état.



La vaporisation : c'est le passage de l'état liquide à l'état gazeux. Ce changement d'état s'obtient en apportant de la chaleur au corps que l'on désire faire changer d'état. Pour l'eau, on dira qu'elle bout.

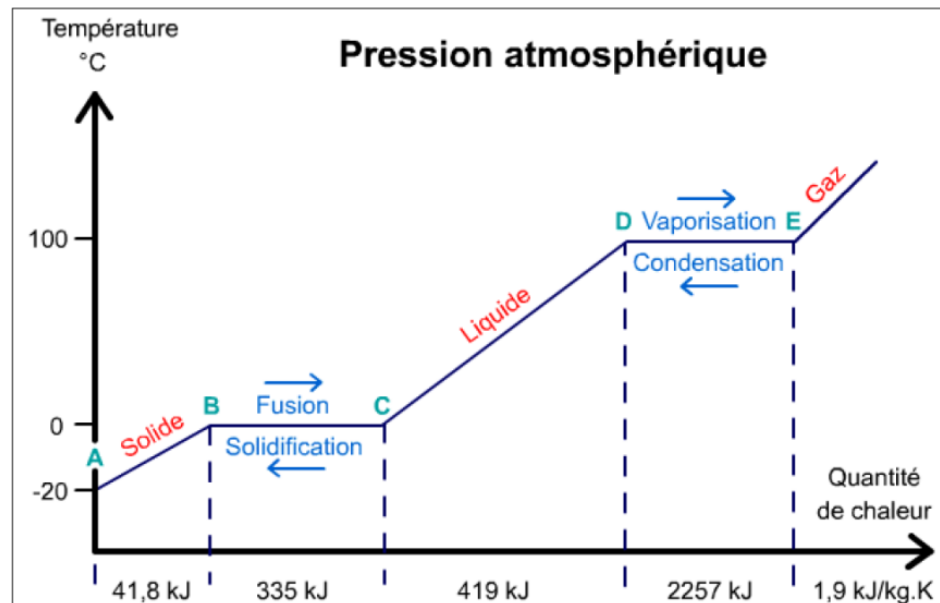
La condensation : C'est le passage de l'état gazeux à l'état liquide. Pour réaliser ce changement d'état, le corps doit céder de la chaleur.

Installations frigorifiques

Eléments de physiques

Exemple de l'eau :

Si nous partons d'un bloc de glace de 1kg à -20°C , sous pression atmosphérique, et que nous le chauffons. Nous allons rencontrer plusieurs étapes fondamentales dans la transformation de ce bloc de glace...



Chaleur latente nécessaire pour évaporer l'eau à P (1 atm) (kJ/kg)	Chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide de 1°C (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)
2257	4,18

➔ la quantité de chaleur absorbée durant l'évaporation est équivalente au fait d'avoir élevé la température de l'eau d'environ 538°C .

Installations frigorifiques

Éléments de physiques

Exercice d'application

Pour réaliser une brasure sur cuivre, un plombier chauffe 10 g d'étain d'une température ambiante de 20 °C jusqu'à une température de 600 °C.

Question :

Quelle est la quantité de chaleur à fournir à l'étain ?

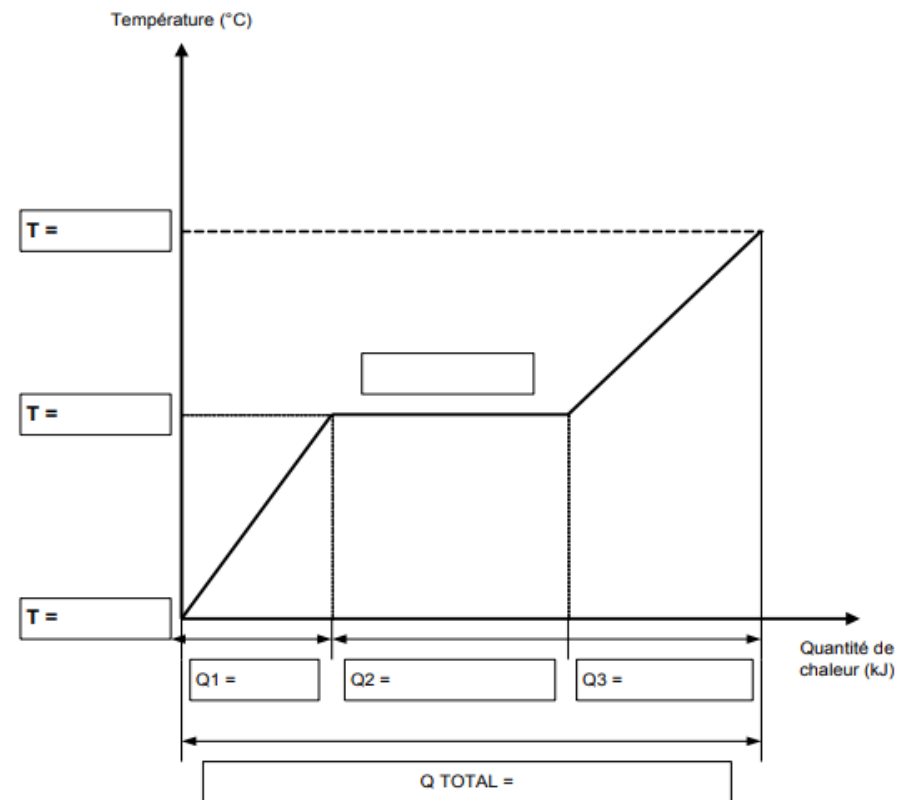
Remplir le schéma ci-dessous.

Données :

$$C_p (\text{étain}) = 235 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$$

$$T_f \text{ fusion étain} = 231,85 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$L_f \text{ étain} = 59,8 \text{ kJ / kg}$$



Installations frigorifiques

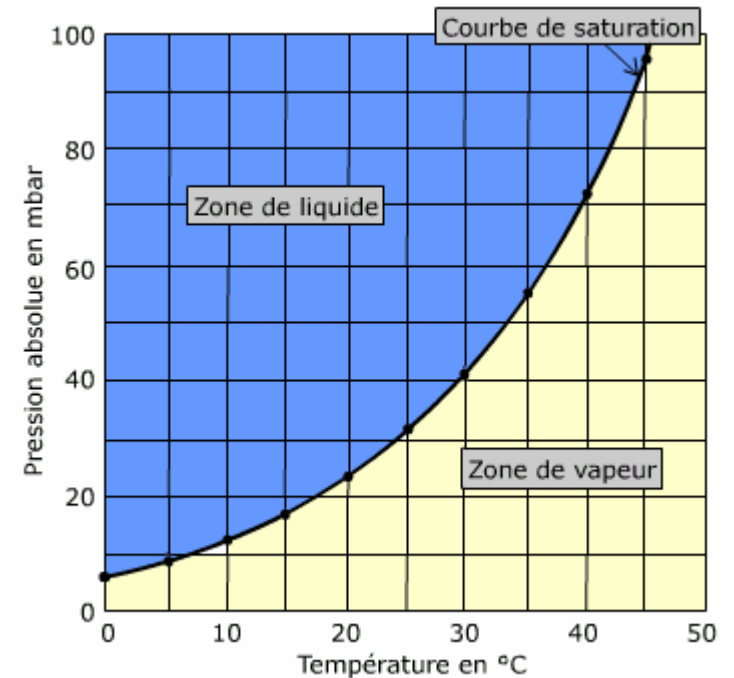
Eléments de physiques

5. Le changement d'état

Remarque

Plus la pression est élevée plus la température du changement d'état augmente.

Exemple : à 1,5 bars l'eau bout à 110°C .
à 1 bar l'eau bout à ???°C .



Relation pression / température

Installations frigorifiques

Organes principaux d'une machine frigorifique

La machine frigorifique à compression de vapeur est composée de 4 organes principaux qui sont :

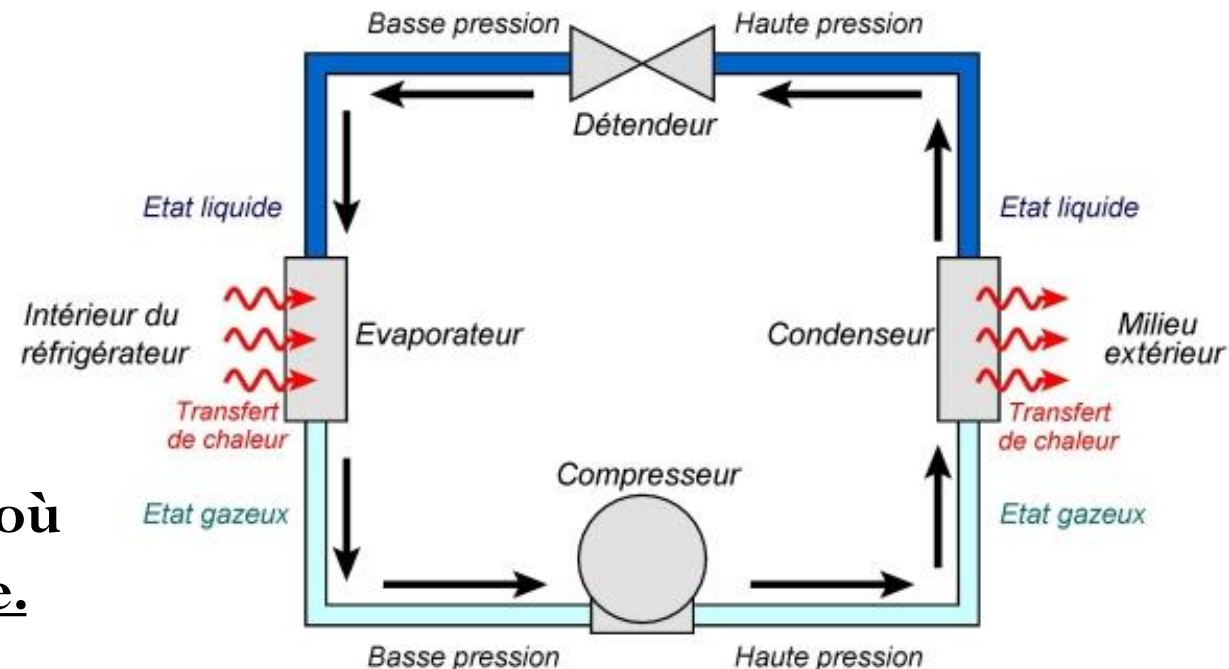
- ❖ Le compresseur
- ❖ Le condenseur
- ❖ Le détendeur
- ❖ L'évaporateur

Source froide

On appelle source froide la source où l'on va capter la chaleur ou l'énergie.

Source chaude

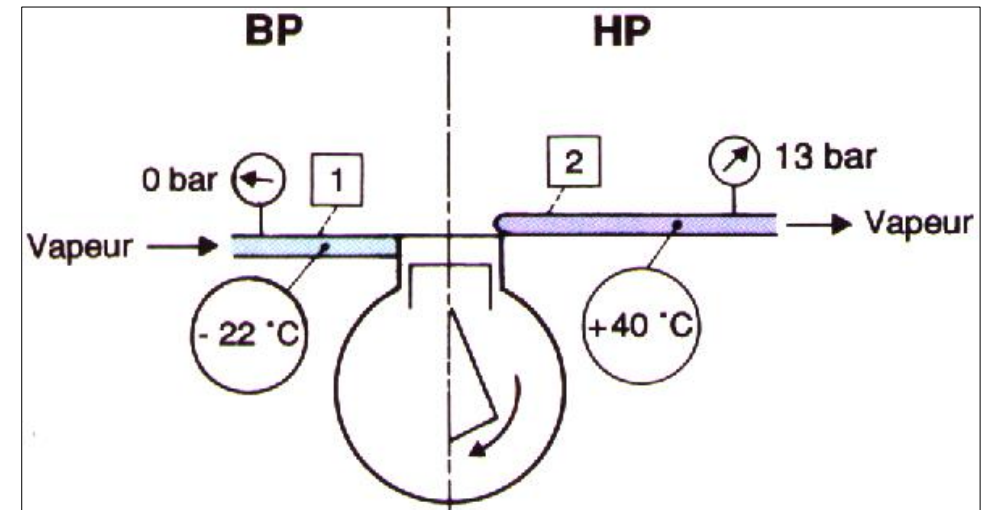
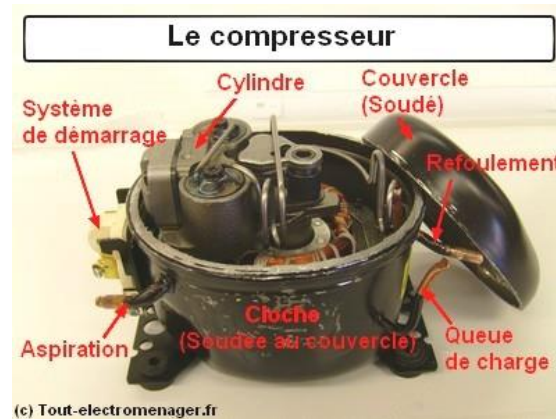
On appelle source chaude la source où l'on va restituer la chaleur (énergie) récupérer dans la source froide.



Installations frigorifiques

Principe de fonctionnement

1. Le compresseur aspire le fluide frigorigène gazeux (à bas niveau de température et de pression) issu de l'évaporateur, le comprime à un niveau plus haut de pression puis le refoule vers le condenseur



Vues de compresseur hermétique.

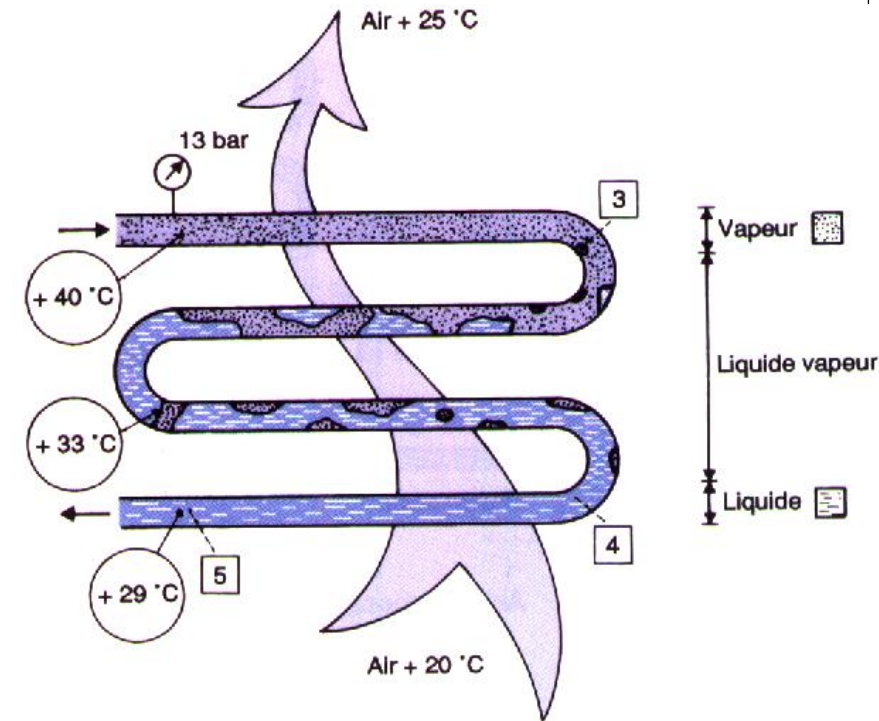
Installations frigorifiques

Principe de fonctionnement

2. Le **condenseur** est un échangeur de chaleur qui va permettre **l'évacuation de la chaleur** contenue dans le FF gazeux issu du compresseur en le liquéfiant. Cette condensation est effectuée à pression constante par le refroidissement du FF gazeux.



Condenseur



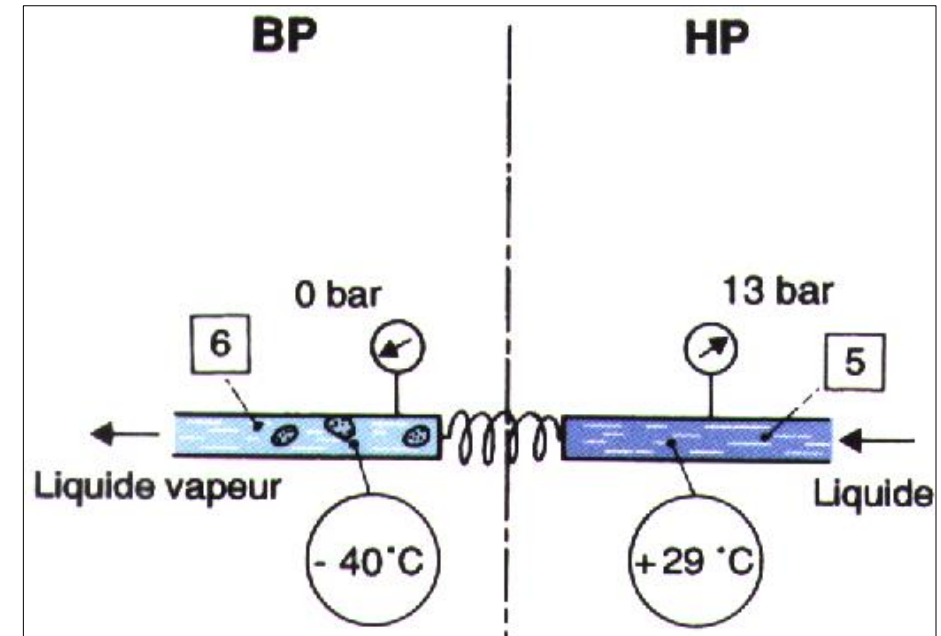
Installations frigorifiques

Principe de fonctionnement

3. Le **détendeur** permet de réduire la pression du FF liquide (création de pertes de charge) issu du condenseur avant son introduction dans l'évaporateur dans le but de permettre sa vaporisation à basse température dans l'évaporateur.



Détendeur thermostatique



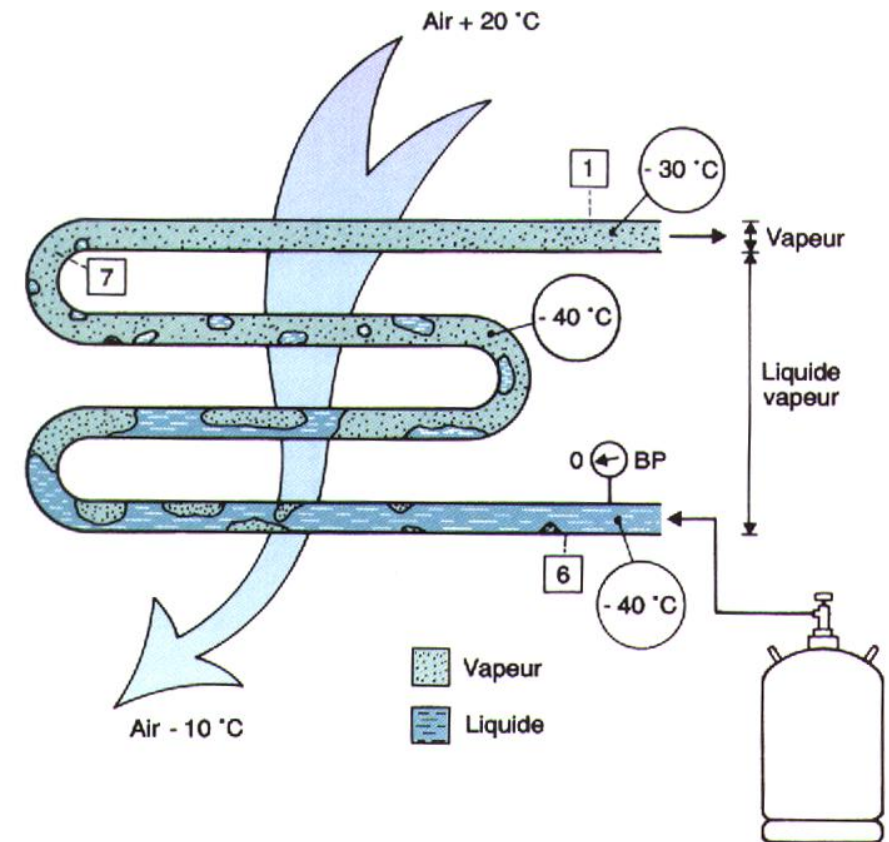
Installations frigorifiques

Principe de fonctionnement

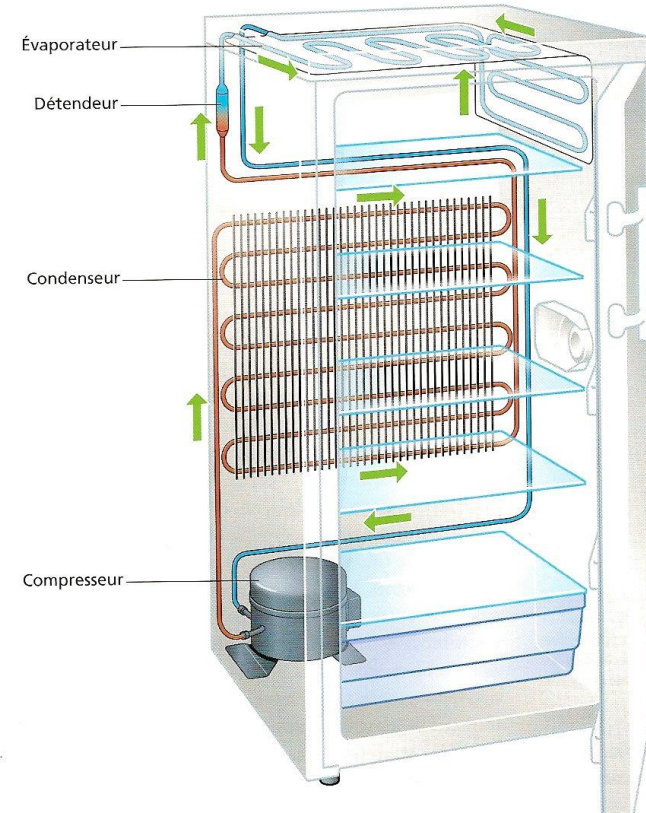
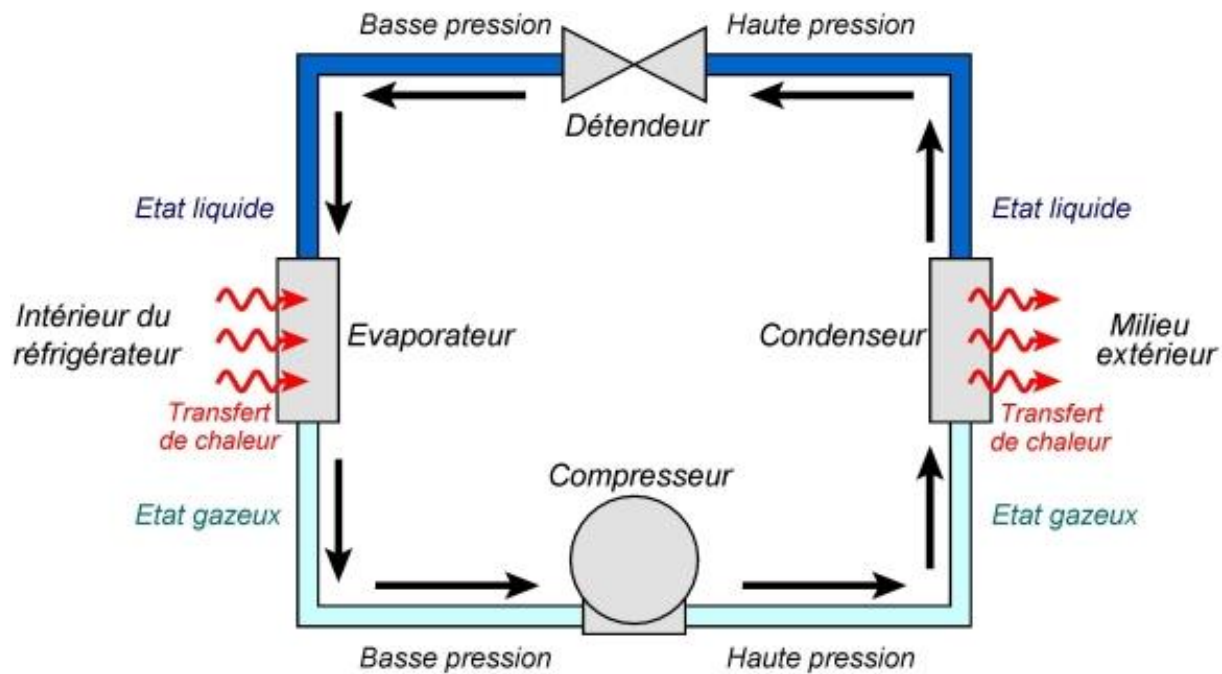
4. L'évaporateur est un échangeur de chaleur dans lequel le FF liquide à bas niveau de température et de pression va absorber la chaleur du milieu à refroidir (air ou eau) à pression constante devenant ainsi gazeux.



Evaporateur



Principaux éléments et principe de fonctionnement du réfrigérateur



Installations frigorifiques

Fluides frigorigènes

Les échanges d'énergie (travail et chaleur) entre la machine frigorifique et le milieu extérieur sont réalisés au moyen d'un fluide frigorigène (FF).

Un FF peut se définir comme une substance chimique dont la température d'évaporation à la pression atmosphérique est inférieure à la température ambiante,

Températures d'ébullition de quelques fluides à la pression atmosphérique.

Fluide (réfrigérant)	Température d'ébullition (°C)
Eau – H ₂ O – R718	100
R11	23,3
R12	-29,8
R22	-40,7
R502	-45,6
Ammoniac – NH ₃ – R717	-33,3

Installations frigorifiques

Fluides frigorigènes

Les fluides frigorigènes sont divisées en deux grandes familles qui sont :

- ❖ les composés inorganiques
- ❖ les composés organiques

Les composés inorganiques

Les fluides de cette famille sont ceux de la série 700.

Le fluide le plus utilisé de cette famille est l'ammoniac (NH_3) et il est désigné par **R717**

R désigne Réfrigérant

Le **7** des centaines désigne la série 700

Le **17** représentant les deux derniers chiffres désigne la masse molaire du corps (14 pour l'azote « N » et 3 pour l'hydrogène « H »).

Autres exemples :

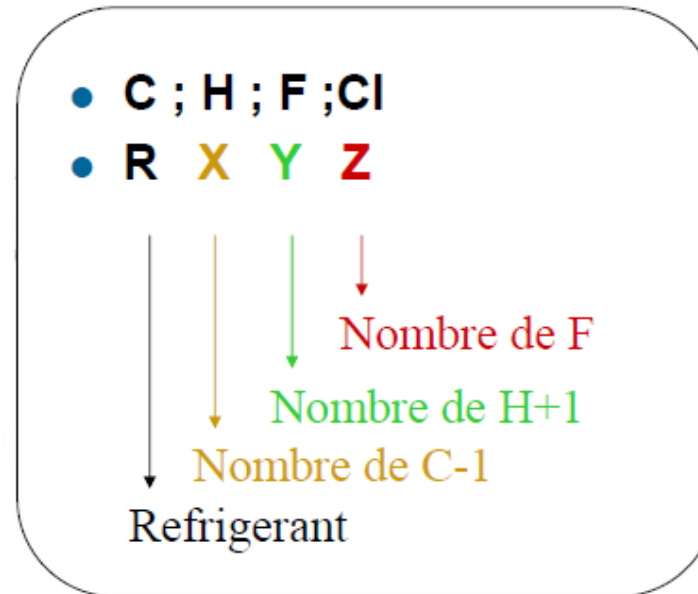
l'eau (H_2O) : **R718**

le dioxyde de carbone (CO_2) : **R744**

Les composés organiques

Les composés organiques sont des dérivés du méthane (CH_4) et de l'éthane (C_2H_6).

Leur désignation est basée sur la règle suivante :



La valence du carbone étant de 4, la molécule sera complétée par des atomes de chlore si nécessaire.

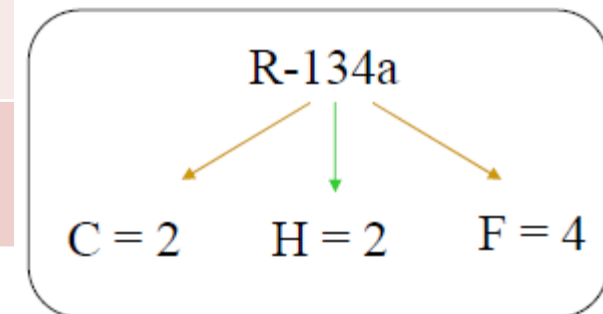
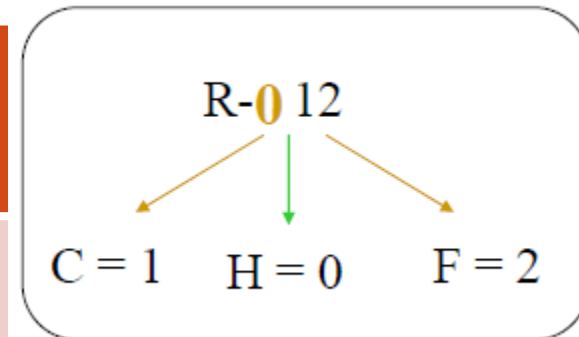
Installations frigorifiques

Fluides frigorigènes

Les composés organiques

Application: Donnez la désignation des corps purs suivants : R12, R22, R134a

Désignation	Chiffres des unités	Chiffres des dizaines	Chiffres des centaines	Nombre d'atomes de chlore	Formule chimique
R12	2 2 fluor	1 0 hydrogène	0 1 carbone	2 chlore	CCl_2F_2
R22	2 2 fluor	2 1 hydrogène	0 1 carbone	1 chlore	CHClF_2
R134a	4 4 fluor	3 2 hydrogène	1 2 carbone	0 chlore	CH_2FCF_3



Fluides frigorigènes

Les composés organiques

Famille des fluides hydrocarbures halogénés

Les fluides de cette famille sont très largement utilisés dans les MF mais font désormais l'objet d'interdiction, pour des raisons de toxicité environnementale. Cette famille de fluides se divise en trois grandes catégories qui sont:

- les CFC (chlorofluorocarbone) – exemple le R12
- les HCFC (hydrochlorofluorocarbone) – exemple le R22
- les HFC (hydrofluorocarbone) – exemple le R134a

Installations frigorifiques

Fluides frigorigènes

Impacts environnementaux

Les impacts environnementaux liés aux FF reposent sur deux phénomènes :

- ❖ la destruction de la couche d'ozone
- ❖ le réchauffement de la planète

Installations frigorifiques

Fluides frigorigènes

Impacts environnementaux

❖ la destruction de la couche d'ozone

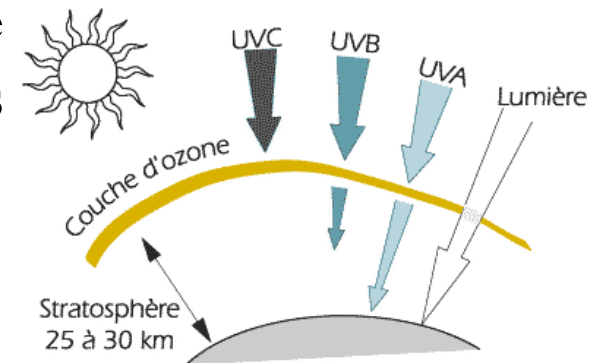
La destruction et la formation de la couche d'ozone est un processus cyclique et naturel suivant les réactions suivantes :



UV: ultra-violets – O₃ : ozone



Cependant **cet équilibre est rompu** par l'effet néfaste de certains FF qui rejetés dans l'atmosphère (molécules contenant le **chlore**).



Installations frigorifiques

Fluides frigorigènes

Impacts environnementaux

❖ la destruction de la couche d'ozone

Les rayons UV agissent sur les molécules de certains FF (principalement les CFC et les HCFC) pour libérer les atomes de chlore et ce sont ces atomes qui vont réagir avec l'ozone pour la détruire suivant une **réaction en chaîne**.

- Cas de CFC: R12 (CF₂Cl₂)

$\text{UV} + \text{CF}_2\text{Cl}_2 \longrightarrow \text{Cl} + \text{CF}_2\text{Cl} + \text{O}$ (libération d'un atome de chlore du CFC R12)

$\text{Cl} + \text{O}_3 \longrightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$ (réaction du **chlore** libéré avec l'**ozone** : **destruction d'ozone**)

$\text{ClO} + \text{O} \longrightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$ (Réaction du ClO avec O et libération d'un atome de chlore à

Installations frigorifiques

Fluides frigorigènes

Impacts environnementaux

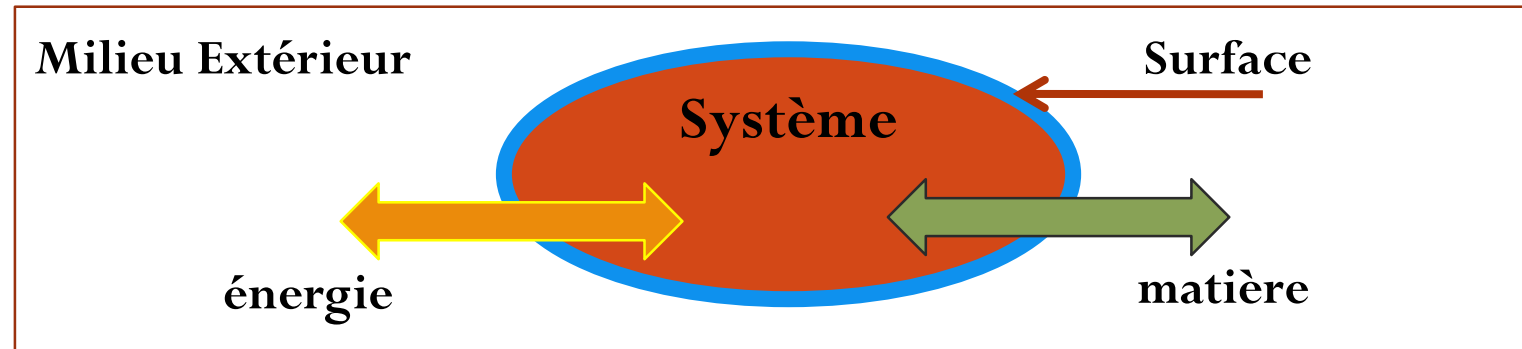
Les conséquences de la destruction de la couche d'ozone (augmentation des rayons UV-B à la surface de la Terre) sont les suivantes :

- ❖ l'augmentation des cancers de la peau
- ❖ l'augmentation des cas de cataractes et autres lésions oculaires
- ❖ l'affaiblissement du système immunitaire
- ❖ la baisse des rendements agricoles et la destruction des forêts
- ❖ la détérioration de la vie maritime.

Rappel de thermodynamique

1. Définition de système thermodynamique

Un système thermodynamique est une partie de l'univers limitée par une surface fermée. À travers cette surface, se font les échanges de l'énergie (travail et chaleur) et de la matière avec le milieu extérieur.



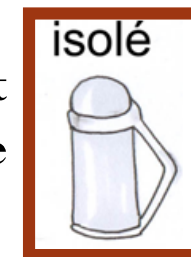
2. Types de systèmes: On distingue



échange de l'énergie et de la matière avec le milieu extérieur.



échange uniquement de l'énergie avec le milieu extérieur.



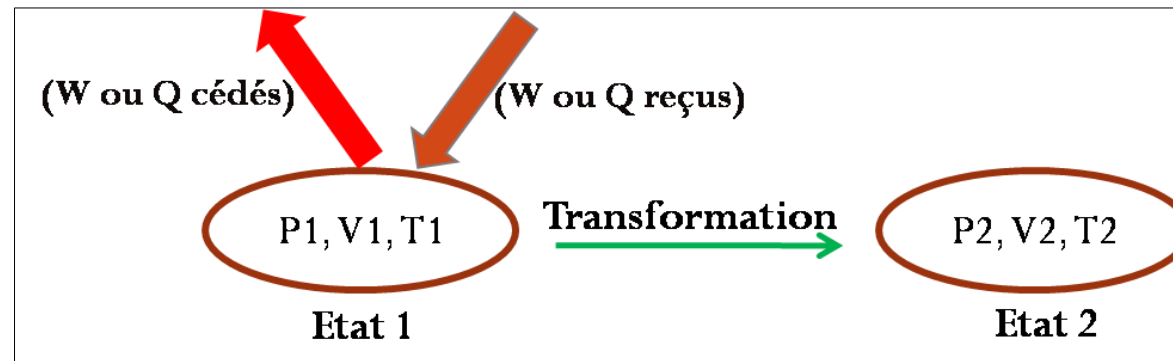
n'échange ni énergie, ni matière avec le milieu extérieur.

Installations frigorifiques

Rappel de thermodynamique

Équation d'état d'un gaz parfait $PV = nRT$

Transformation d'un système: une transformation est une opération qui modifie l'état d'un système, le faisant évoluer d'un état d'équilibre initial à un état d'équilibre final.



Installations frigorifiques

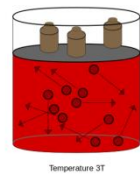
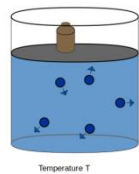
Rappel de thermodynamique

On peut distinguer les transformations suivantes:

- ❖ Transformation **isochore** : V reste **constant** durant l'évolution.
- ❖ Transformation **isobare** : P **ne change pas** au cours de la transformation.
- ❖ Transformation **isotherme** : T du système reste **constante**.
- ❖ Transformation **adiabatique** : le système **n'échange pas de chaleur** avec le milieu extérieur.

Loi de Gay Lussac

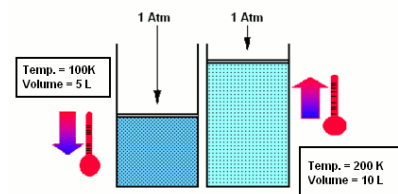
$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$



P (en pascal, Pa) et T (en Kelvin, K)

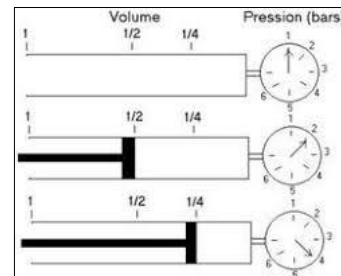
Loi de Charles

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$



Loi de Boyle-Mariotte

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$



Installations frigorifiques

Rappel de thermodynamique

Premier principe – (Principe de conservation d'énergie)

Le 1^{er} principe appliqué à un système fermé, annoncerait que **la variation de l'énergie totale du système est égale aux transferts d'énergie avec le milieu extérieur.**

Les deux façons de transférer de l'énergie sont le **travail W** et la **chaleur Q** .

- *Formulation mathématique du 1^{er} principe pour un système fermé :*

$$\Delta E = Q + W \quad \text{où} \quad \Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U$$

$$\text{Avec} \quad Q = Q_C + Q_F \quad dU = \delta Q + \delta W \quad \Delta U_{\text{cycle-fermé}} = 0$$

$$\delta W = -P dV \quad \text{représente le travail en vase clos (piston...)}$$

- *Pour un système ouvert (avec transvasement), on utilise l'enthalpie*

$$H = U + PV \quad \Rightarrow \quad \Delta H = Q + W^*$$

La quantité $\delta W^* = V dP$ représente le travail avec transvasement

Installations frigorifiques

Rappel de thermodynamique

Second principe de la thermodynamique

La variation d'entropie d'un système est égale à la somme de la variation de l'entropie résultant des échanges avec l'extérieur et de l'entropie produite à l'intérieur du système.

$$dS = dS_e + dS_c \quad \text{Avec : } dS_e = dQ_e / T \quad \text{Et :}$$

$$\Delta S = S_e + S_c \quad \Delta S_{\text{cycle}} = 0$$

Si la transformation est réversible:

$$S_c = 0 \quad \longrightarrow \quad \Delta S = S_e = \int \frac{\delta Q_e}{T}$$

Installations frigorifiques

Rappel de thermodynamique

Fonctionne d'état:

C'est une fonction dont la variation est indépendante de la transformation et ne dépend que des états initial et final.

L'énergie interne \mathbf{U} , l'enthalpie \mathbf{H} , l'entropie \mathbf{S} sont des fonctions d'état.

$$dU = TdS - PdV \qquad dH = TdS + VdP$$

1^{ère} et 2^{ème} loi de Joule pour un gaz parfait:

$$dU = C_v dT \qquad dH = C_p dT$$

Pour une transformation isentropique (adiabatique réversible), relation de Laplace

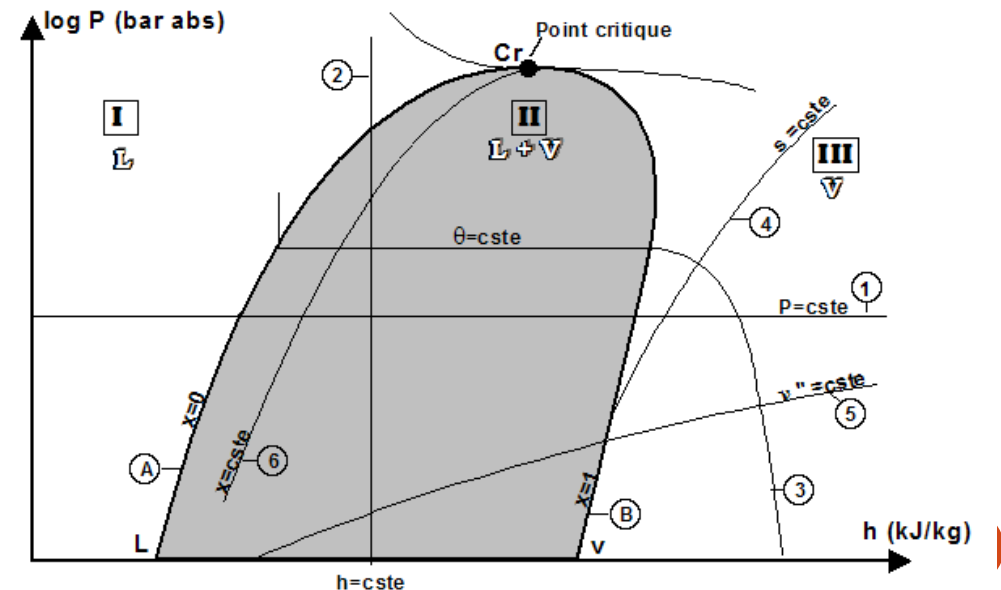
$$PV^\gamma = cte \quad \text{Avec: } \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Diagrammes thermodynamiques

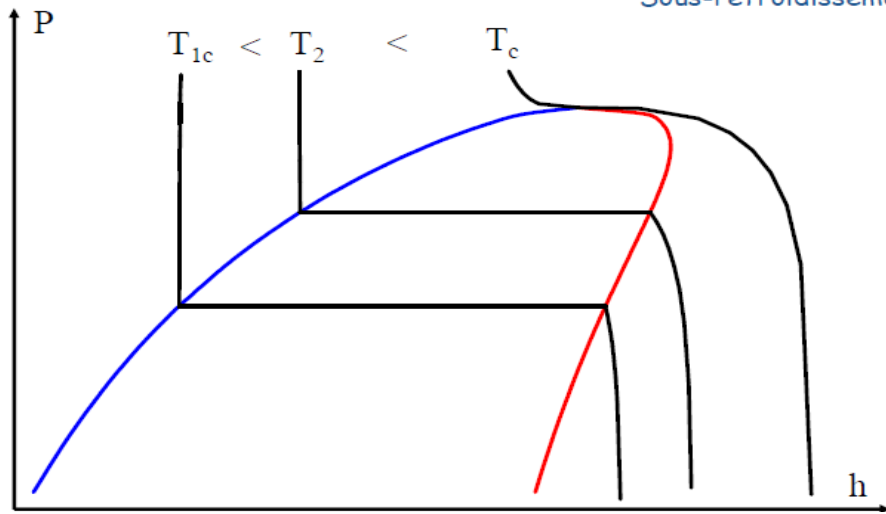
1. Diagramme Enthalpique

Le diagramme enthalpique, aussi appelé diagramme de Mollier, est une notion importante dans la compréhension du cycle frigorifique. Il s'agit d'un graphique spécifique à chaque fluide exprimant son niveau de saturation pression-température sous forme de cloche.

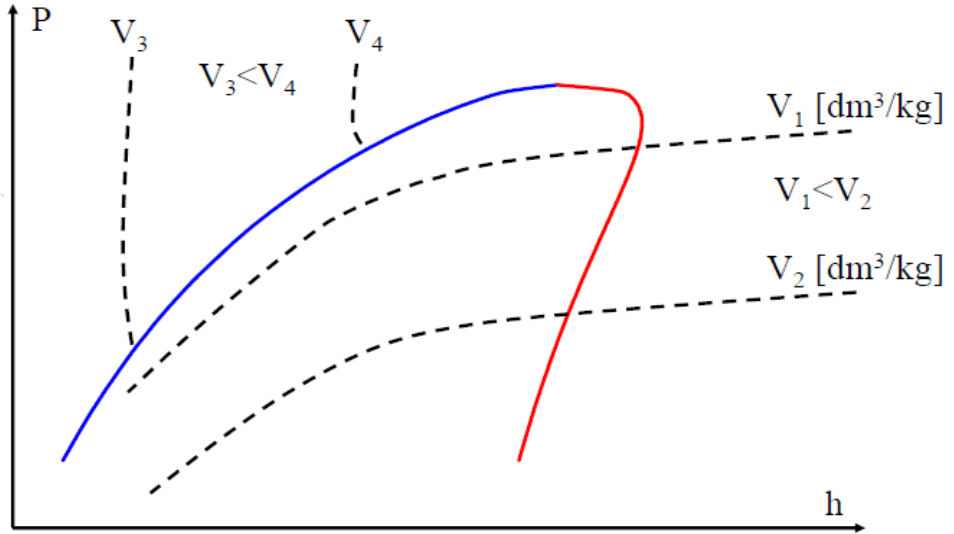
Ce diagramme permet de suivre l'évolution au cours des transformations de la pression, la température, l'enthalpie, l'entropie, le volume massique et le mélange liquide-vapeur d'un FF dans un système frigorifique.



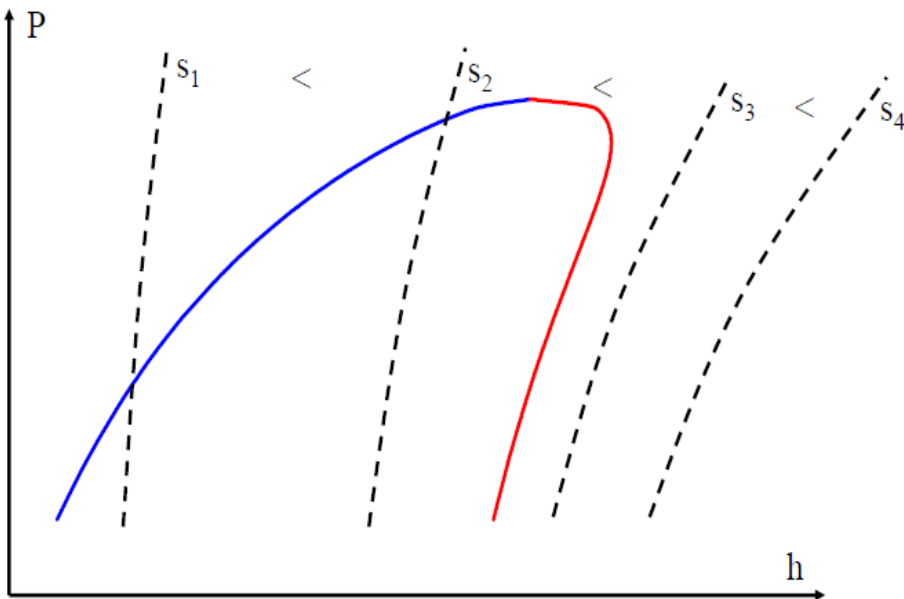
☛ Courbes isothermes



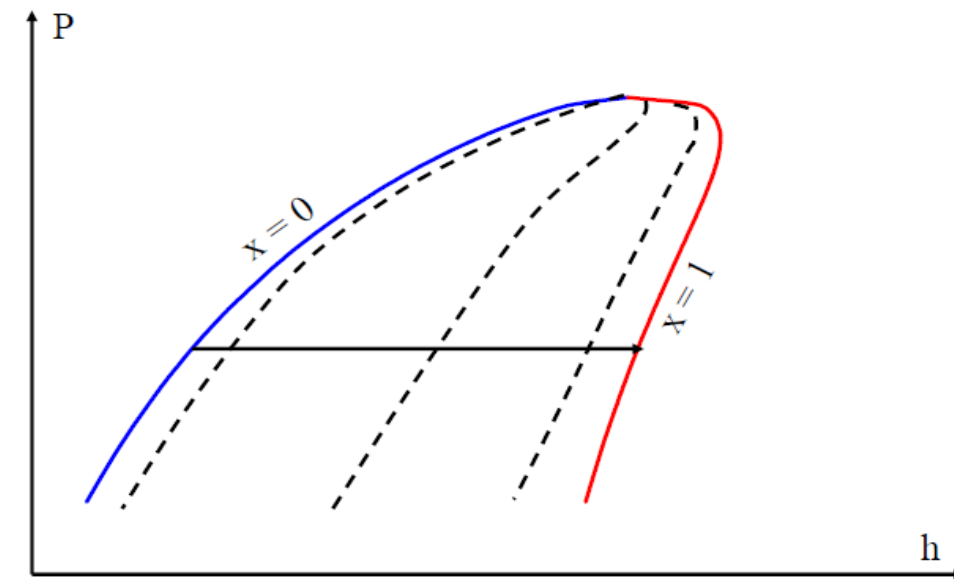
☛ Courbes isochores



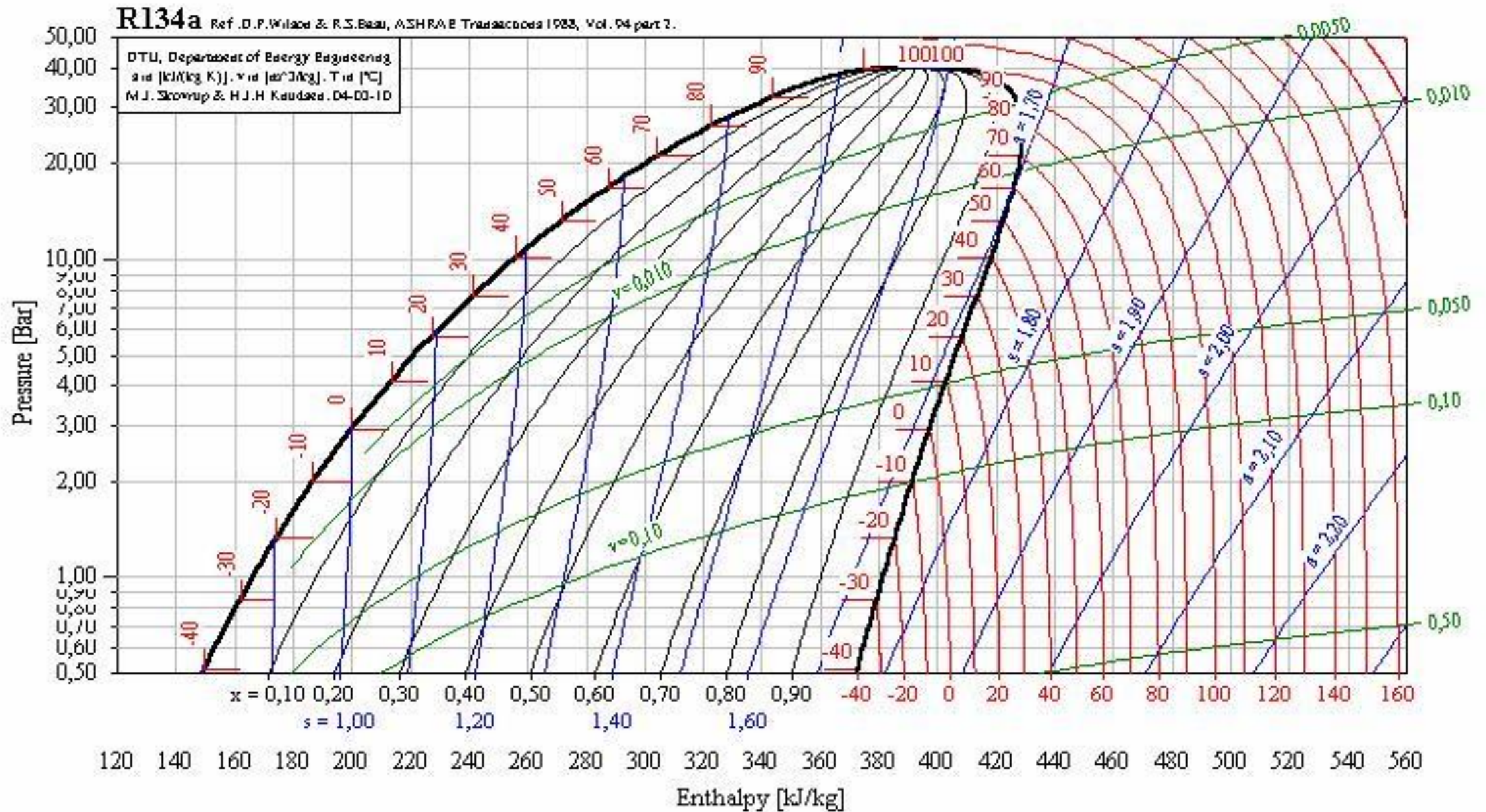
☛ Courbes isentropiques



☛ Courbes isotitres en vapeur



1. Diagramme Enthalpique du réfrigérant R134a



Diagrammes thermodynamiques

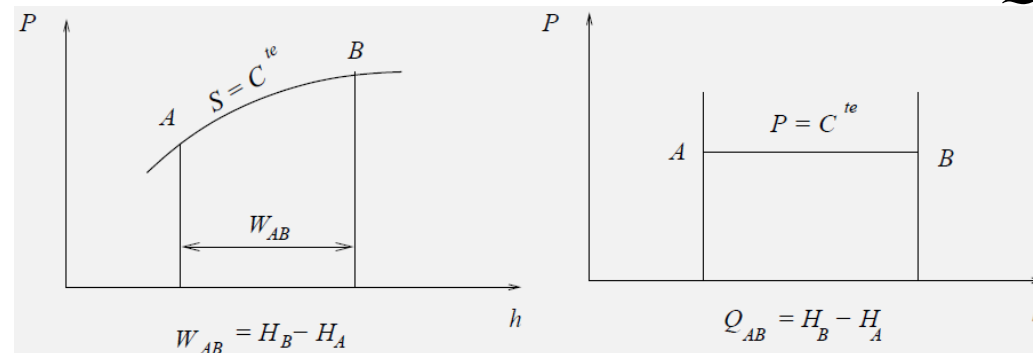
Diagramme Enthalpique; utilité

Le premier principe pour un système ouvert s'écrit:

$$dH = \delta W^{mec} + \delta Q \Rightarrow \Delta H = W^{mec} + Q$$

Pour les transformations isentropiques: $Q = 0 \Rightarrow \Delta H = W^{mec}$ (compression)

Pour les transformations isobares: $W^{mec} = 0 \Rightarrow \Delta H = Q$ (échangeurs)



Le diagramme de Mollier ou enthalpique permet non seulement de connaître les différents états du fluide frigorigène, mais il donne des renseignements intéressants concernant le bilan énergétique du cycle d'une installation thermodynamique.

Diagrammes thermodynamiques

2. Diagramme de Clapeyron et diagramme Entropique

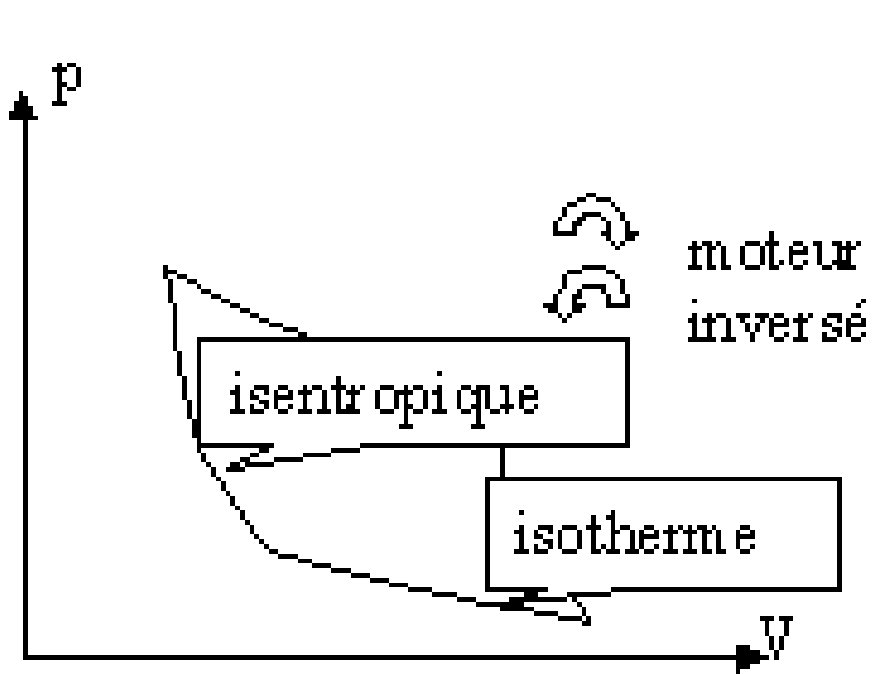


Diagramme de Clapeyron (P-V)

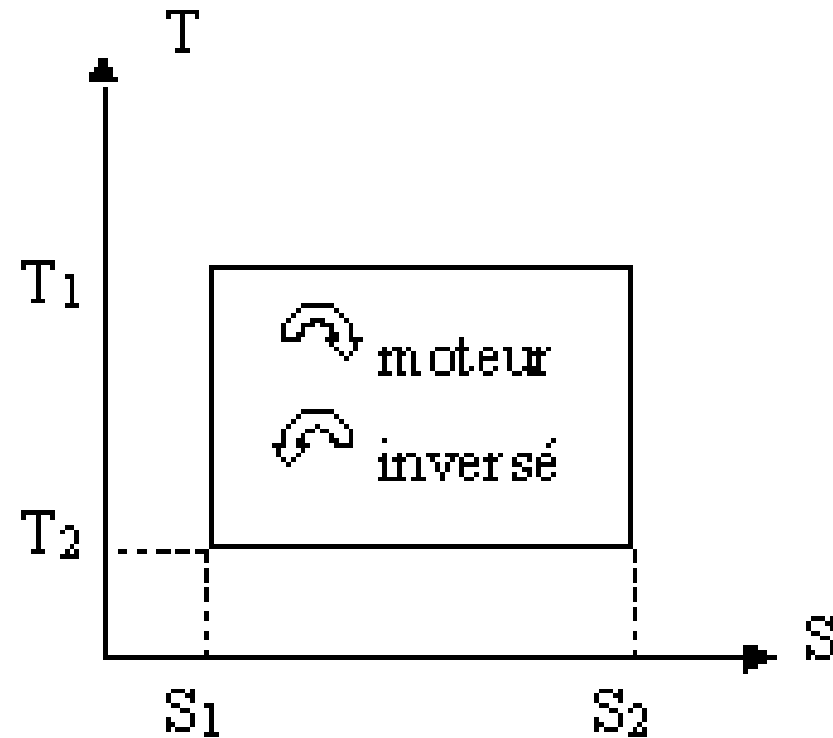
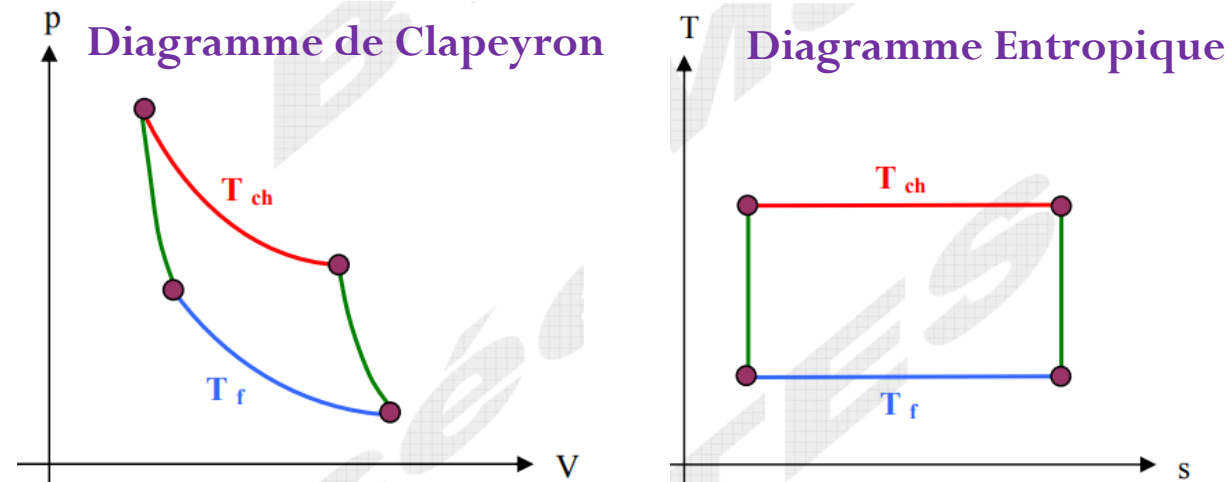


Diagramme Entropique (T-S)

Cycles frigorifiques

1. Cycle de Carnot

- La machine idéale de Carnot, réversible et sans frottement a permis de comprendre la conversion de chaleur en travail.
- Le cycle de Carnot est un cycle réversible entre deux sources de chaleur, il est composé de deux isothermes et de deux isentropes.



Exploitation du cycle de Carnot (1^{er} et second principe de la thermodynamique)

Exercices d'application

Exercice 1:

Une machine frigorifique fonctionne avec une source froide de température $T_f = -30\text{ °C}$ et une source chaude de température $T_c = 25\text{ °C}$. La quantité de chaleur échangée par le fluide moteur avec la source chaude est $Q_c = -1000\text{ J}$ et celle échangée avec la source froide est $Q_f = 700\text{ J}$.

- a) Déterminez si ce cycle est réalisé de façon réversible ou irréversible.
- b) Représentez par un schéma, les échanges réalisés entre la machine et les sources de chaleur d'une part et la machine et le milieu extérieur d'autre part.
- c) Calculez le travail échangé entre le fluide et le milieu extérieur.
- d) Calculez le coefficient de performance COP de cette machine et le comparer à celui d'un cycle de Carnot fonctionnant entre les mêmes sources.

Exercices d'application

Exercice 2:

On considère un surgélateur industriel en continu qui permet d'obtenir des baguettes crues surgelées. Ce surgélateur peut se modéliser par une machine de Carnot, c'est à dire que la machine peut échanger de la chaleur avec la source chaude S_C à la température $\theta_C = 20^\circ\text{C}$ et avec la source froide S_F à la température $\theta_F = -25^\circ\text{C}$. Le débit massique en pâte vaut $D = 15 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$.

On appellera P_C la puissance thermique échangée entre la machine et S_C , P_F la puissance thermique échangée entre la machine et S_F et $P_{\text{élec}}$ la puissance électrique reçue par la machine thermique. On notera e_F le coefficient d'efficacité (ou de performance) de cette machine.

1. Exprimer e_F en fonction de P_F et de $P_{\text{élec}}$. Déduire l'expression de e_F en fonction de θ_C et de θ_F . Calculer numériquement e_F .

Les baguettes, lors de leur surgélation, subissent deux transformations :

Etat fluide de capacité thermique massique $c_F = 2,67 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$		solidification		Etat solide de capacité thermique massique $c_S = 1,67 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	
		chaleur latente $L_S = -125,4 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$			
$\theta_i = 20^\circ\text{C}$	→	$\theta_1 = -3^\circ\text{C}$	→	$\theta_1 = -3^\circ\text{C}$	→ $\theta_F = -25^\circ\text{C}$

2. Calculer la puissance thermique retirer de la pâte.

3. En déduire la puissance électrique consommée par la machine thermique.

Cycles frigorifiques

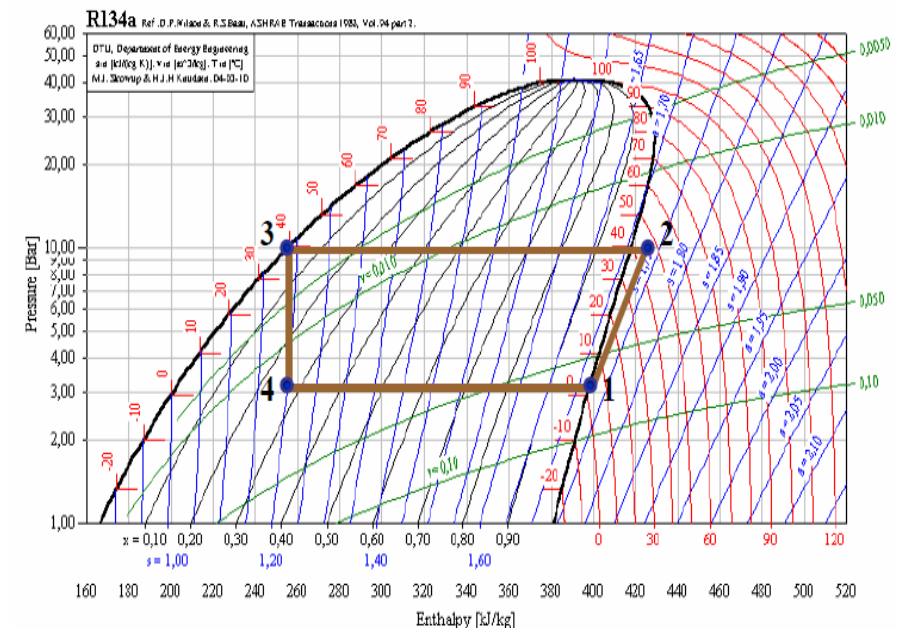
2. Cycle théorique

Pour tracer le cycle théorique d'une machine frigorifique à compression on adopte les hypothèses suivantes:

- Pas de pertes de charge dans les tubulaires
- Compresseur parfait; adiabatique réversible
- Echange thermique réversible
- Échange thermique entre fluide frigorigène et fluides secondaires dans les échangeurs uniquement.

Les transformations thermodynamiques subies par le FF à l'intérieur de la machine sont les suivantes :

- 1-2 compression isentropique du FF vapeur,
- 2-3 condensation isotherme
- 3-4 détente isenthalpique
- 4-1 évaporation isotherme



Cycles frigorifiques

2. Cycle théorique

Bilans énergétiques :

les variations des énergies cinétique et potentielle sont nulles.

Évaporateur

$$0 = \dot{Q}_o + \dot{m}h_4 - \dot{m}h_1$$

Condenseur

$$0 = \dot{Q}_k + \dot{m}h_2 - \dot{m}h_3$$

Détendeur

$$0 = \dot{m}h_3 - \dot{m}h_4$$

Compresseur

$$0 = \dot{W} + \dot{m}h_1 - \dot{m}h_2$$

Installations frigorifiques

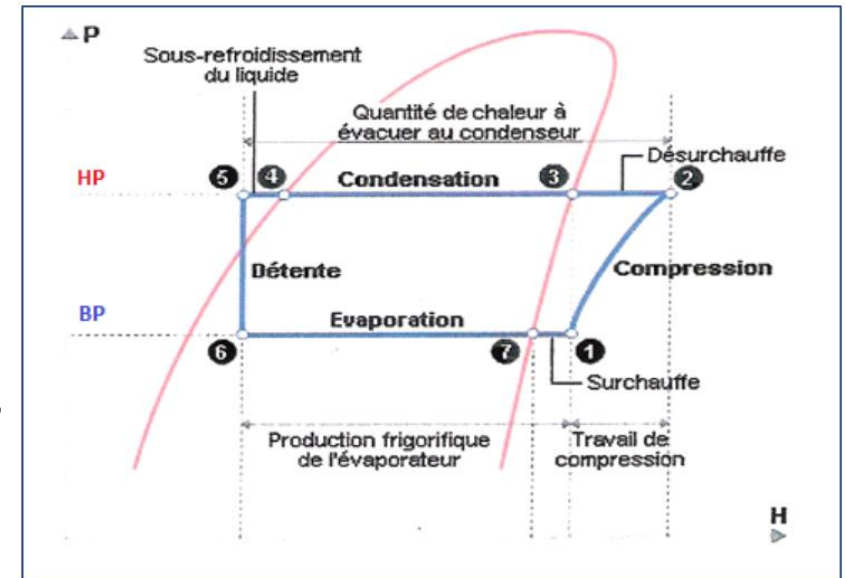
Cycles frigorifiques

3. Le cycle frigorifique de référence

Le cycle frigorifique de référence (cycle pratique) permet d'effectuer l'étude et le dimensionnement des machines frigorifiques avec une précision acceptable.

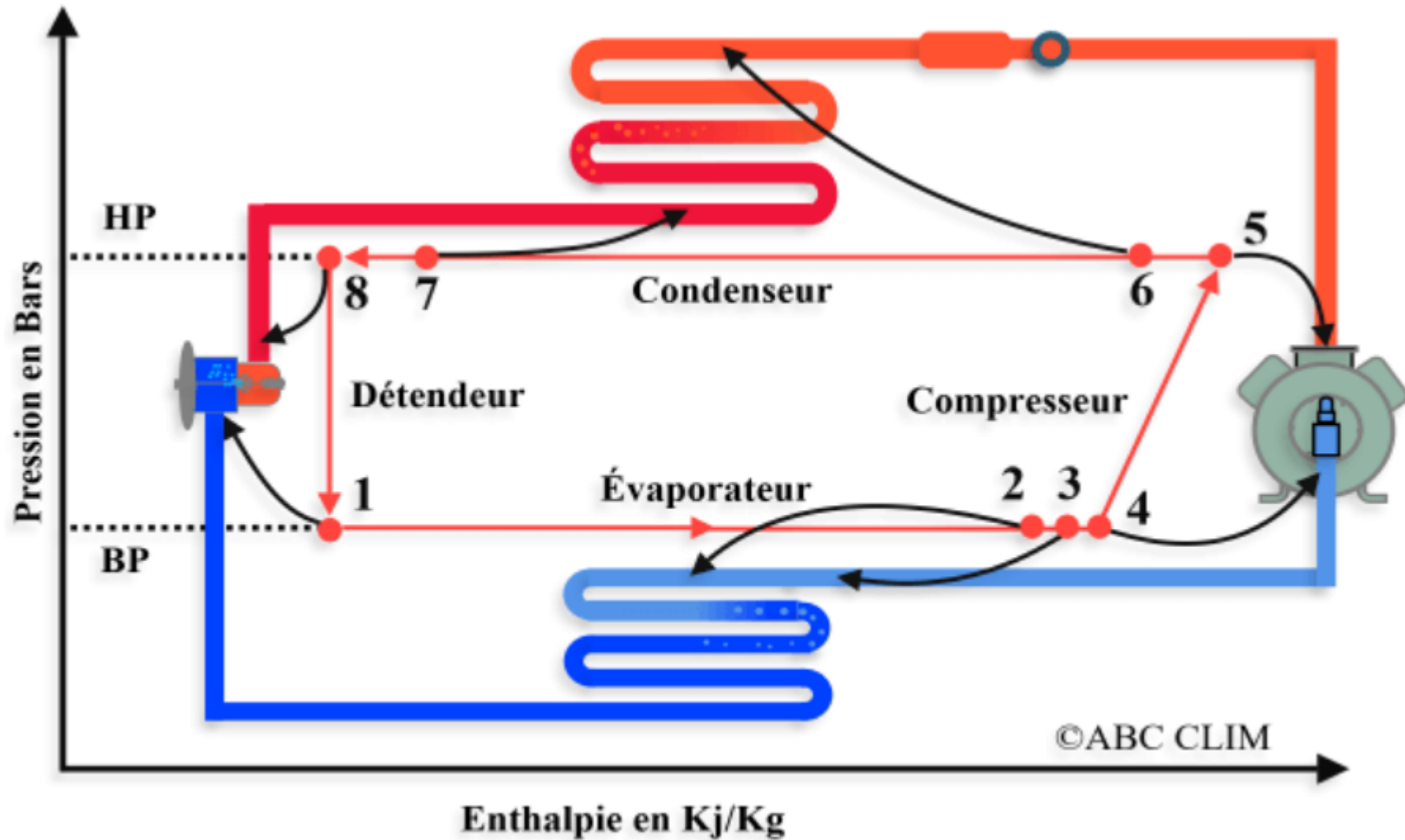
En pratique, ce cycle est tracé sur les bases suivantes;
Le fluide frigorigène subit :

- compression isentropique
- détente isenthalpique
- une surchauffe au niveau de l'évaporateur
- un sous-refroidissement au niveau du condenseur



Cycle frigorifique de référence

Diagramme enthalpique, Cycle frigorifique



Cycle frigorifique de référence

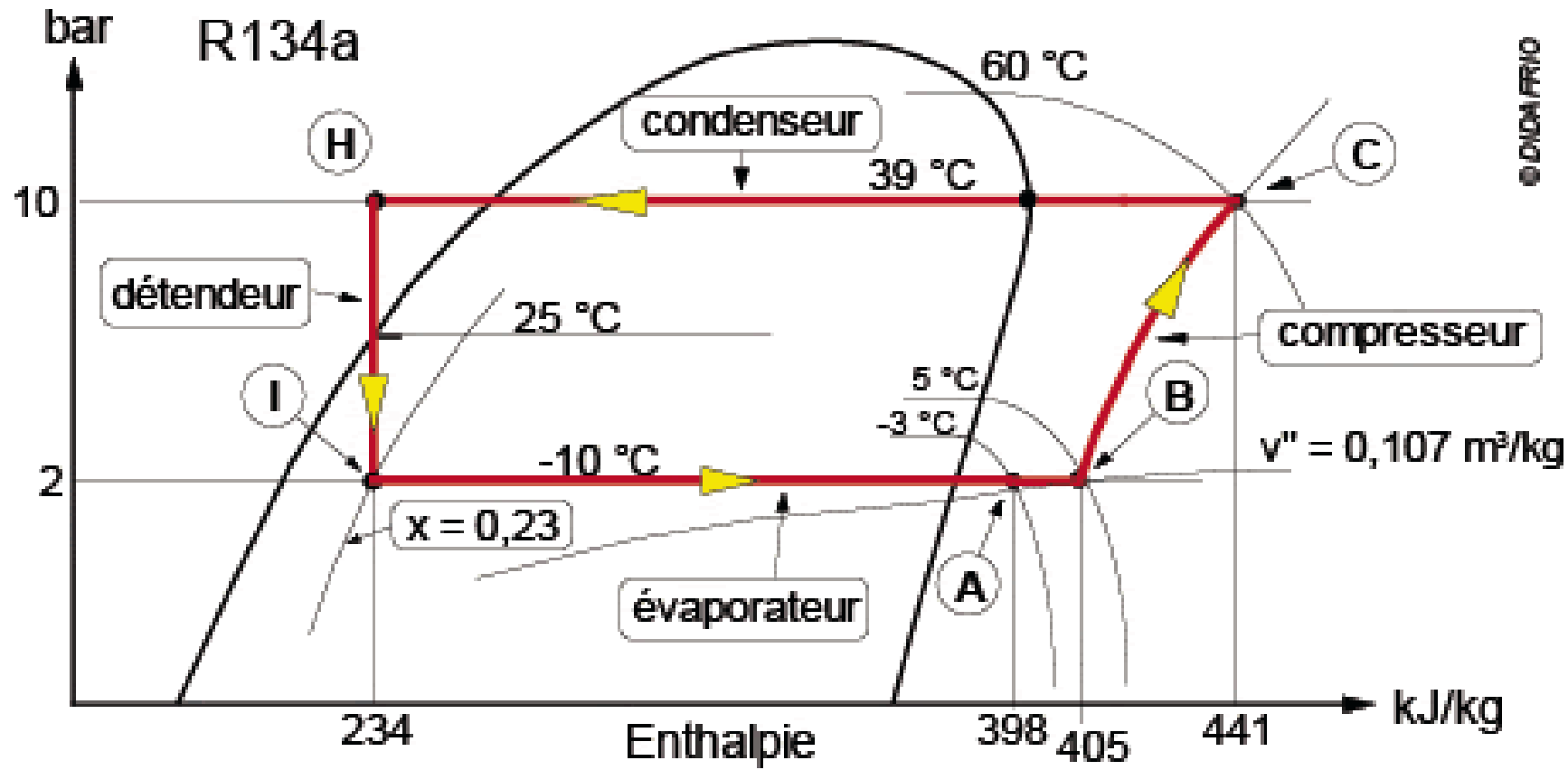


Fig. 4.26 : Cycle frigorifique

Cycles frigorifiques

3. Le cycle frigorifique de référence

Exploitation du cycle frigorifique

Débit massique \dot{m} de FF en circulation en kg/s

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_0}{\Delta h_0}$$

\dot{Q}_0 Puissance frigorifique en kW

Δh_0 Variation d'enthalpie entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur en kJ/kg

Volume de fluide aspiré par le compresseur en m³/h

$$V_a = \dot{m} \cdot v'' \times 3600$$

v'' Volume massique en m³/kg

$$\text{Taux de compression} = \frac{P_{\text{refoulement}}}{P_{\text{aspiration}}}$$

Dans le cas où les pertes de charge sont négligeables,

$$\text{Taux de compression} = \frac{P_k}{P_0}$$

P_k : pression de condensation en bar absolu
 P_0 : pression d'évaporation en bar absolu

Cycles frigorifiques

3. Le cycle frigorifique de référence

Exploitation du cycle frigorifique

Coefficient de performance frigorifique

$$e_F = \frac{\dot{Q}_0}{P_a}$$

\dot{Q}_0 Puissance frigorifique en kW

P_a Puissance absorbée par le moteur électrique en kW.

Coefficient de performance de Carnot $e_C = \frac{T_0}{T_K - T_0}$

T_0 : Température d'évaporation en Kelvin

T_K : Température de condensation en Kelvin.

Puissance rejeté au condenseur $\dot{Q}_K = \dot{m} \cdot \Delta h_K$

Δh_K Variation d'enthalpie entre l'entrée et la sortie du condenseur en kJ/ kg

\dot{m} Débit massique de FF en circulation en kg/s

Exercices d'application

Série n° 2

Technologie des installations frigorifiques (IF)

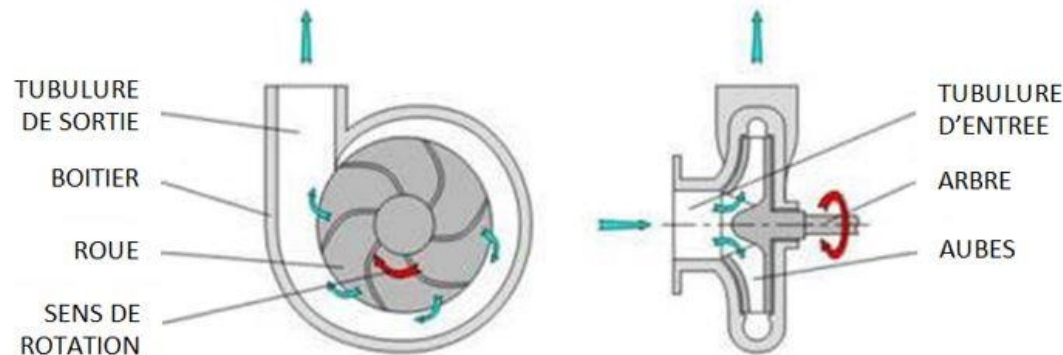
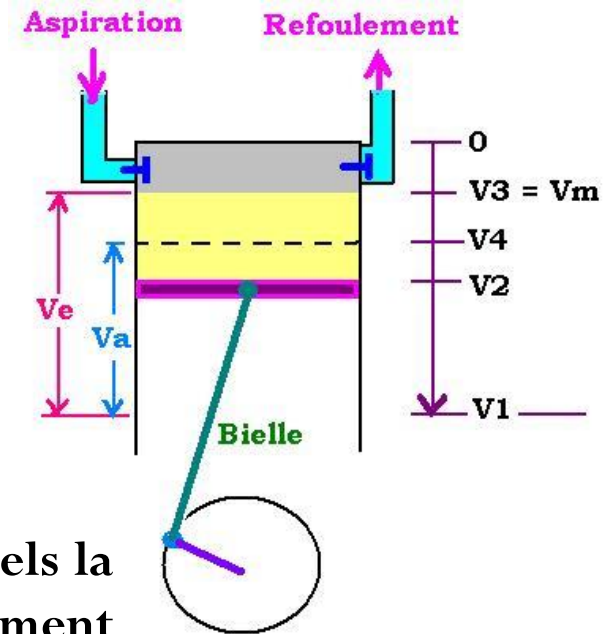
1. Technologie des compresseurs

Il existe deux grands types de compresseurs à vapeur :

- **Compresseurs volumétriques:** la compression des vapeurs est obtenue par la réduction du volume intérieur d'une chambre de compression, c'est le type le plus répandu sur les IF.

Types de compresseurs volumétriques: rotatif, à vis, à piston, à spiral.

- **Compresseurs centrifuges:** aussi appelés turbocompresseurs dans lesquels la compression résulte de la force centrifuge obtenue par entraînement dynamique au moyen d'une roue à aubes,



Technologie des installations frigorifiques (IF)

1. Technologie des compresseurs

Association Moteur Compresseur:

Lorsqu'on parle de compresseur, on sous entend moto compresseur, le compresseur étant la partie mécanique entraînée par un moteur.

Suivant le type de liaison ou d'association entre les deux parties, on distingue :

- les compresseurs hermétiques
- les compresseurs ouverts
- les compresseurs semi hermétiques ou semi ouverts



Compresseur hermétique



Compresseur ouvert



Compresseur semi-ouvert

Technologie des installations frigorifiques (IF)

2. Technologie des condenseurs

Les condenseurs sont des échangeurs thermiques entre le fluide frigorigène et un fluide de refroidissement.

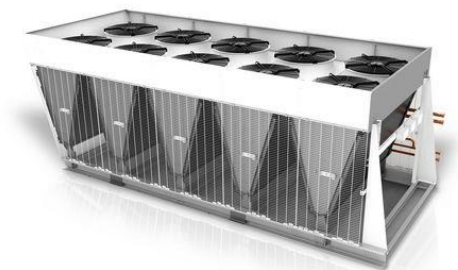
On distingue deux familles de condenseurs suivant le fluide de refroidissement :

➤ les condenseurs à air

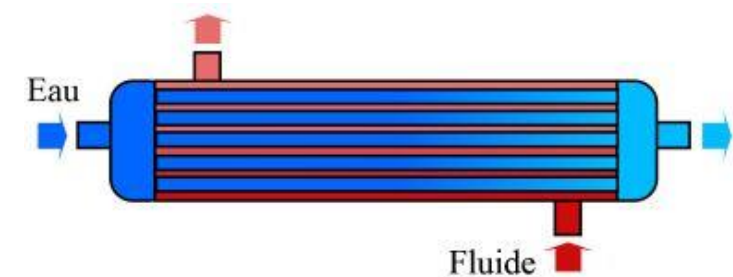
- les condenseurs à air à convection naturelle
- les condenseurs à air à convection forcée

➤ les condenseurs à eau

- les condenseurs à double tube (condenseurs coaxiaux)
- les condenseurs bouteilles (condenseurs à serpentin)
- les condenseurs multitubulaires
- les condenseurs à plaques brasées (échangeur à plaques)
- les compresseurs semi hermétiques ou semi ouverts



Condenseurs à air



Condenseurs à eau

Technologie des installations frigorifiques (IF)

2. Technologie des condenseurs

Avantages et inconvénients des condenseurs à air et à eau

Condenseurs	Avantages	Inconvénients
À air	<ul style="list-style-type: none">➤ Air disponible en quantité illimitée➤ Entretien simple et réduit	<ul style="list-style-type: none">➤ Coefficients globaux d'échange thermique relativement faibles➤ Plus imposants et plus lourds➤ Températures de condensation élevées dans les pays chauds
À eau	<ul style="list-style-type: none">➤ Coefficients globaux d'échange thermique plus élevés➤ Plus compacts et moins encombrants à puissance égale➤ Températures de condensation stables et de bas niveau➤ Fonctionnement moins bruyant➤ Possibilité de récupération d'énergie	<ul style="list-style-type: none">➤ Gaspillage d'eau pour les condenseurs à eau perdue➤ Nécessité de mise en place d'un système de refroidissement de l'eau

Technologie des installations frigorifiques (IF)

3. Technologie des détendeurs

Les détendeurs sont destinés à l'alimentation des évaporateurs en fluide frigorigène.

Suivant le principe de fonctionnement des évaporateurs, on distinguera :

- les dispositifs alimentant les évaporateurs à détente sèche
- les dispositifs alimentant les évaporateurs noyés

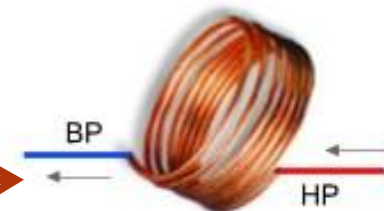
Les détendeurs pour évaporateurs à détente sèche se regroupent en trois types :

- les détendeurs thermostatiques



- les détendeurs électroniques

- les tubes capillaires ou détendeurs capillaires



Technologie des installations frigorifiques (IF)

4. Technologie des évaporateurs

Les évaporateurs sont des échangeurs thermiques entre le fluide frigorigène (FF) et le fluide à refroidir.

On distingue deux familles d'évaporateurs suivant le fluide à refroidir :

➤ les évaporateurs à eau

- les évaporateurs double tube (évaporateurs coaxiaux)
- les évaporateurs du type serpentín
- les évaporateurs multitubulaires
- les évaporateurs du type échangeur à plaques

➤ les évaporateurs à air

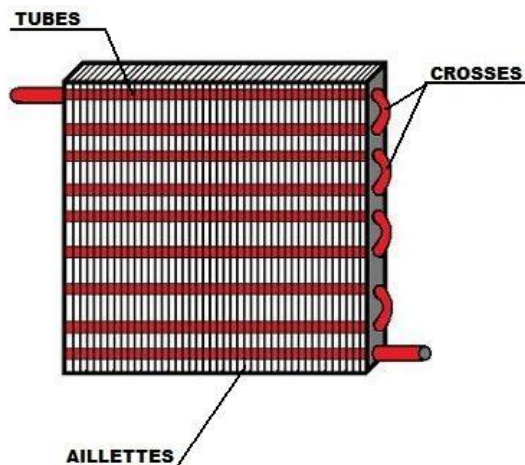
- les évaporateurs à air à convection naturelle
- les évaporateurs à air à convection forcée

Technologie des installations frigorifiques (IF)

4. Technologie des évaporateurs

Suivant le mode de fonctionnement de l'évaporateur, on distingue :

- les évaporateurs à détente sèche ou à surchauffe
- les évaporateurs noyés ou évaporateurs à regorgement



Evaporateur à détente sèche



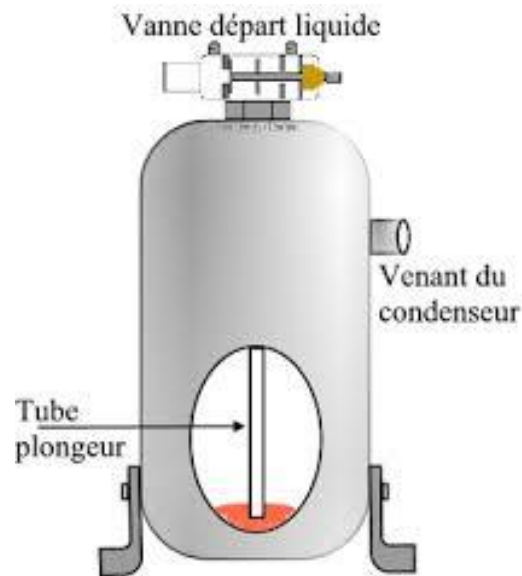
Evaporateur noyé dans le coque

Organes annexes d'une machine frigorifique

1. Le réservoir de liquide

Le réservoir de liquide, aussi bouteille liquide, est placé à la sortie du condenseur et sert à stocker le FF liquide à la mise en arrêt de l'appareil ou lors des opérations de maintenance.

Il permet d'alimenter le détendeur en liquide de façon permanente à l'aide de son tube plongeur.



Organes annexes d'une machine frigorifique

2. La bouteille anti-coups de liquide

Elle est placée entre l'évaporateur et le compresseur (à proximité du compresseur). Le rôle de la bouteille anti-coup de liquide est de protéger le compresseur contre l'aspiration accidentel de FF liquide.



Bouteille anti-coup de liquide

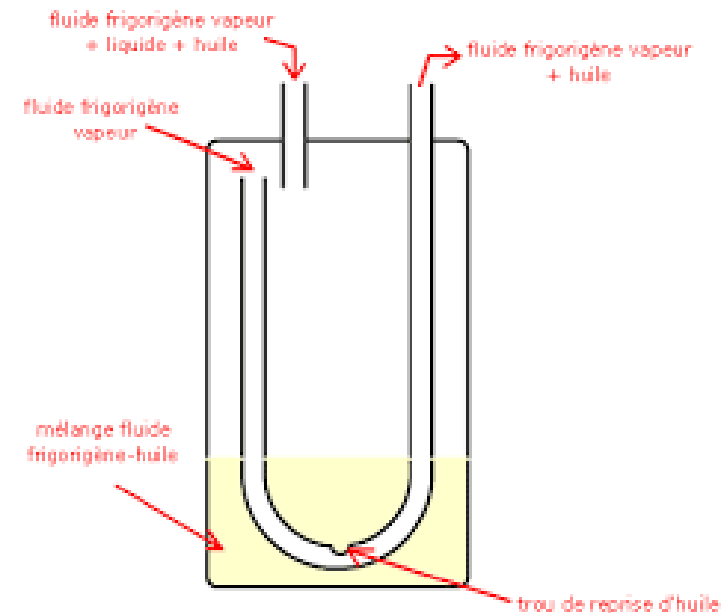


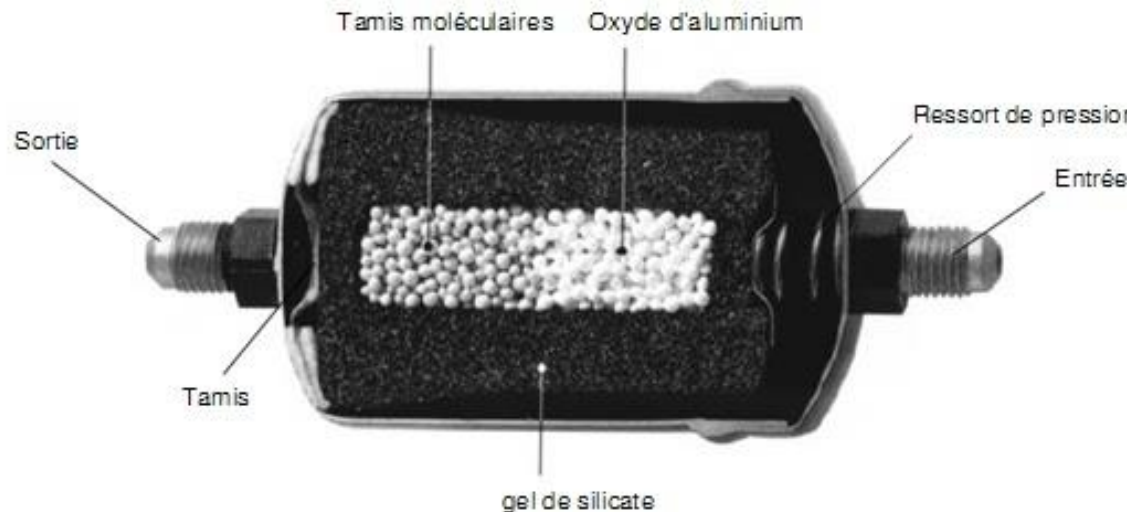
Schéma de principe

Organes annexes d'une machine frigorifique

3. Le filtre déshydrateur

Le filtre est l'organe qui sert à piéger les impuretés contenues dans le circuit frigorifique. Et le déshydrateur permet l'élimination de l'humidité contenue dans le circuit frigorifique

Le filtre déshydrateur rassemble dans le même appareil les fonctions de filtre et de déshydrateur.



Organes annexes d'une machine frigorifique

4. Le voyant

Le voyant simple est un organe placé juste avant le détendeur et après le filtre déshydrateur. Il permet de contrôler la présence éventuelle de bulles donc de FF à l'état vapeur, indice d'anomalie (charge insuffisante en FF, filtre déshydrateur bouché, ...).

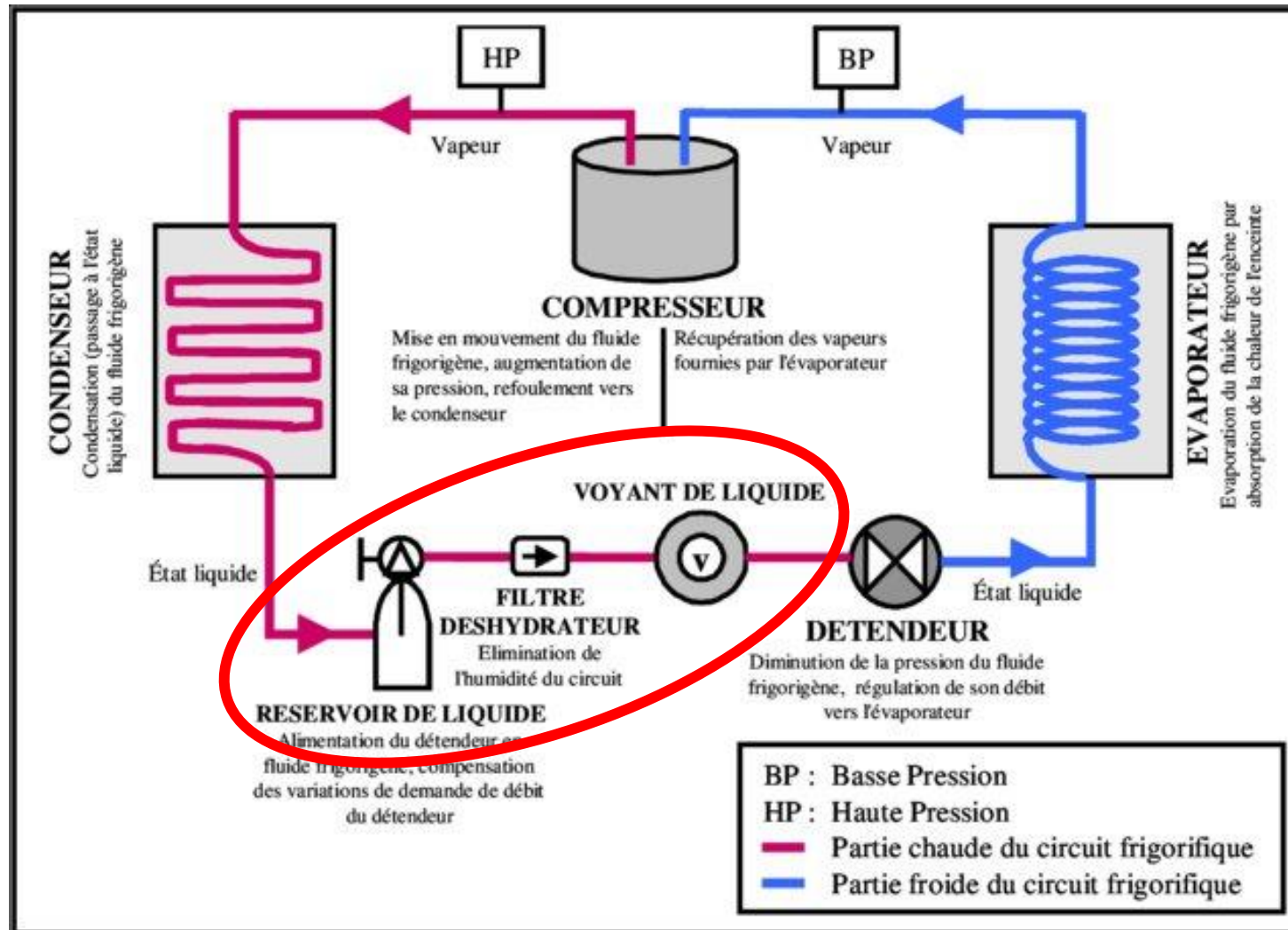
Le voyant indicateur d'humidité est un voyant simple avec une double fonction, celle de l'indication de l'état de saturation (humidité) du circuit frigorifique.



Il s'agit d'un voyant avec une couronne indicatrice (sel chimique) qui change de couleur en fonction de la quantité d'eau contenue dans le FF.

Le vert indique généralement un circuit sec (parfaitement déshydraté) et le jaune un circuit humide ; le vert clair indique que le filtre déshydrateur est en train de se saturer.

Organes annexes d'une machine frigorifique



Organes de commande et de sécurité d'une MF

1. Les organes de robinetterie

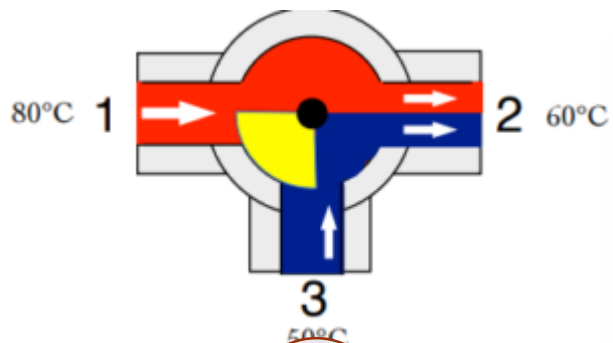
Les organes de robinetterie suivants peuvent se retrouver sur le circuit frigorifique :

- 1) les robinets manuels d'isolement
- 2) les robinets 3 voies
- 3) le clapet de non retour (anti-retour)
- 4) les robinets manuels de réglage et de purge d'huile

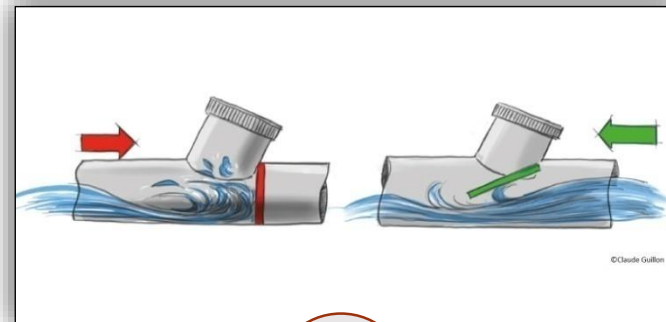
Le terme vanne est également utilisé à la place de robinet



1



2



3



4

Organes de commande et de sécurité d'une MF

1. Les organes de robinetterie

Outre les vannes qui sont à commande manuelle, on rencontre des vannes commandées automatiquement par l'action; d'un champ magnétique, d'une pression ou d'un servomoteur électrique.

Pour les circuits frigorifiques, l'organe le plus rencontré est la vanne électromagnétique aussi appelée électrovanne ou vanne solénoïde.

Le robinet 4 voies d'inversion de cycle est une vanne pilotée utilisée sur les machines frigorifiques réversibles (fonctionnement mode froid et mode chaud).



Organes de commande et de sécurité d'une MF

2. Les thermostats

Le thermostat désigne un système qui permet de réguler ou de maintenir une température constante.



Les thermostats peuvent assurer des fonctions

- **de régulation** (par exemple, l'arrêt du compresseur d'une installation lorsque la température désirée dans l'enceinte est atteinte)
- **de sécurité** (par exemple, l'arrêt de l'alimentation des résistances électriques de dégivrage d'un évaporateur lorsque la température d'évaporation est trop élevée).

Organes de commande et de sécurité d'une MF

3. Les pressostats

Le pressostat désigne un système qui permet de réguler ou de maintenir une pression constante.

Le pressostat est un organe important du circuit frigorifique, il est utilisé soit en sécurité soit en régulation (pump down).

Les pressostats peuvent assurer deux fonctions

- le contrôle du fonctionnement de l'évaporateur par l'arrêt du compresseur lorsque la pression d'évaporation descend à une valeur de consigne pré réglée : c'est une **fonction de régulation**
- la protection du compresseur contre toute baisse anormale de la pression d'aspiration : c'est une **fonction de sécurité**

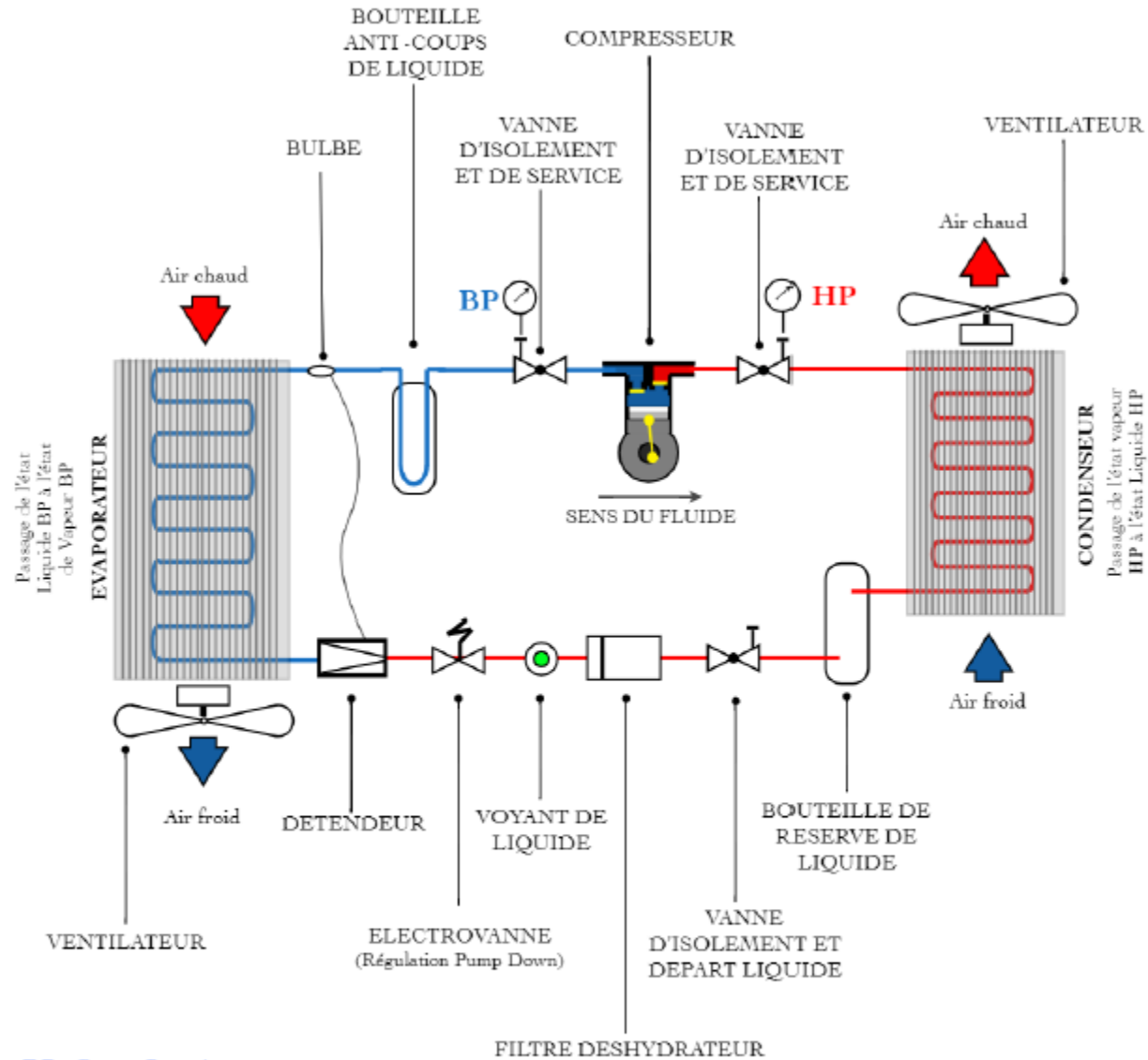


Organes de commande et de sécurité d'une MF

4. Autres dispositifs

- **Contrôleur de débit:** c'est un interrupteur électrique qui établit un contact sous l'effet de la circulation de l'eau (lorsque le débit d'eau est suffisant). Il empêche ainsi le démarrage du compresseur tant que le débit au niveau du condenseur à eau ou au niveau de l'évaporateur à eau est insuffisant.
- **Soupape de sûreté de pression :** organe qui s'ouvre automatiquement à une valeur prédéterminée supérieure à la pression atmosphérique sous la pression du fluide sans intervention d'aucune autre source d'énergie et qui évacue un débit de fluide suffisant pour empêcher de dépasser la valeur maximale en service d'une quantité déterminée.
- **Les protections électriques** (fusibles, relais thermiques, disjoncteurs magnéto - thermiques...) occupent une grande place dans la protection des équipements électriques (moteurs des compresseurs, des ventilateurs et des pompes) des installations frigorifiques.

Les composants du circuit frigorifique



BP : Basse Pression
HP : Haute Pression

-> Sens du fluide