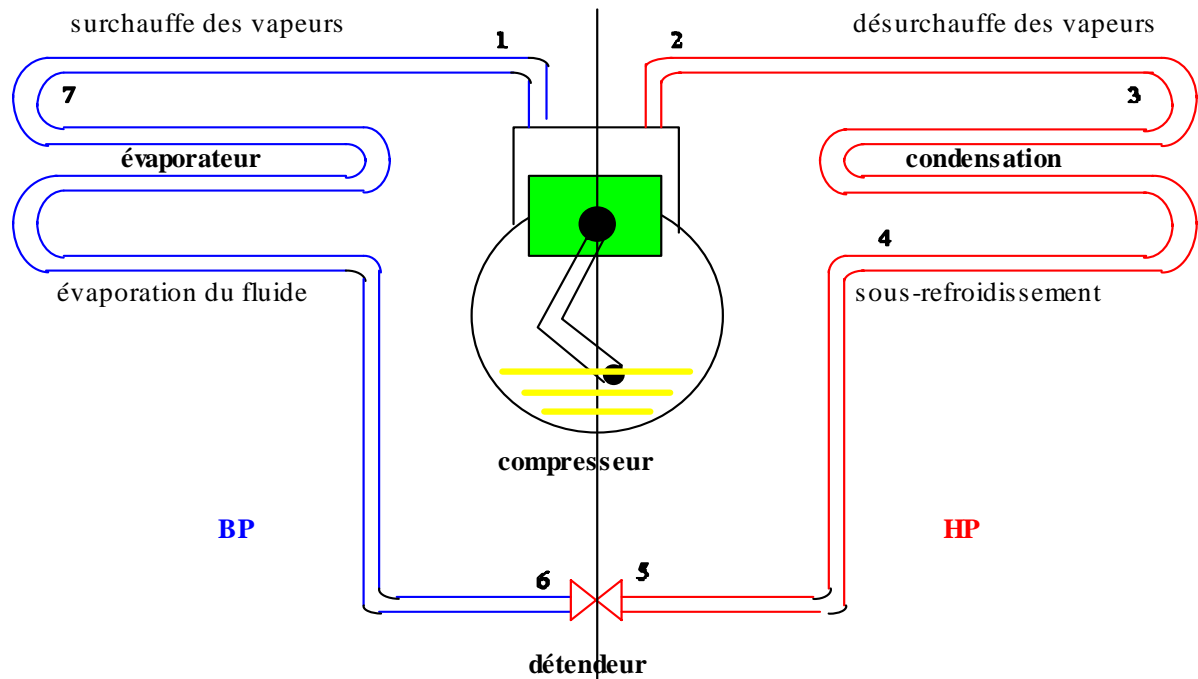


LE DIAGRAMME ENTHALPIQUE

L'expression **cycle** vient de la **thermodynamique**. En effet lorsqu'une masse de fluide se retrouve après diverses transformations dans le même état (pression, volume, température) au même point on dit qu'elle a décrit un cycle.

Principe du cycle frigorifique:



Evaporateur:

Dans l'évaporateur le fluide se vaporise, la chaleur latente de vaporisation étant fournie par le médium de refroidissement qui se refroidit.

Etat du fluide à l'entrée: mélange liquide vapeur (80% liquide- 20% vapeur),

Etat du fluide à la sortie: vapeur basse pression surchauffée (régime sec).

Compresseur:

Il absorbe les vapeurs issues de l'évaporateur, les comprime et les refoulent vers le condenseur.

Etat du fluide à l'entrée: vapeurs BP surchauffées

Etat du fluide à la sortie: vapeurs HP surchauffées

Condenseur:

Il va liquéfier les vapeurs refoulées par le compresseur et sous refroidir le liquide condensé.

Etat du fluide à l'entrée: vapeurs HP surchauffées

Etat du fluide à la sortie: liquide HP sous refroidi.

Détendeur:

Il permet à partir du liquide HP sortant du condenseur (où de la bouteille) d'alimenter l'évaporateur en liquide BP basse température.

Etat du fluide à l'entrée: liquide HP sous refroidi

Etat du fluide à la sortie: mélange liquide-vapeur (80 % liquide 20% vapeur).

1) Présentation du diagramme:

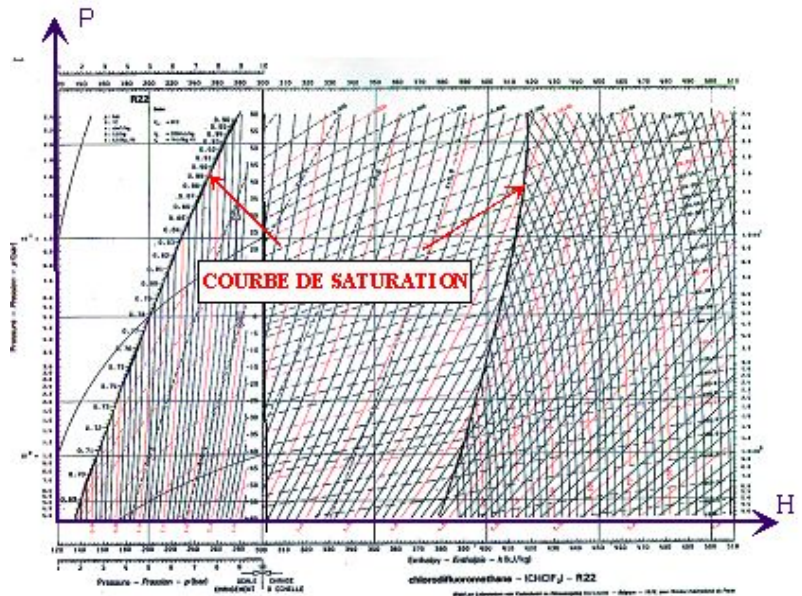
Toutes les caractéristiques thermodynamiques d'un fluide ainsi que ces différents états (liquide ou vapeur) sont représentés graphiquement sur le diagramme enthalpique.

L'utilisation de ce diagramme permet d'une manière simple de représenter l'évolution du fluide frigorigène au cours de chaque transformation. Le diagramme est un outil pratique c'est une représentation graphique de toutes les évolutions qu'un fluide peut subir. Il s'agit de sa carte d'identité.

2) Coordonnées du diagramme:

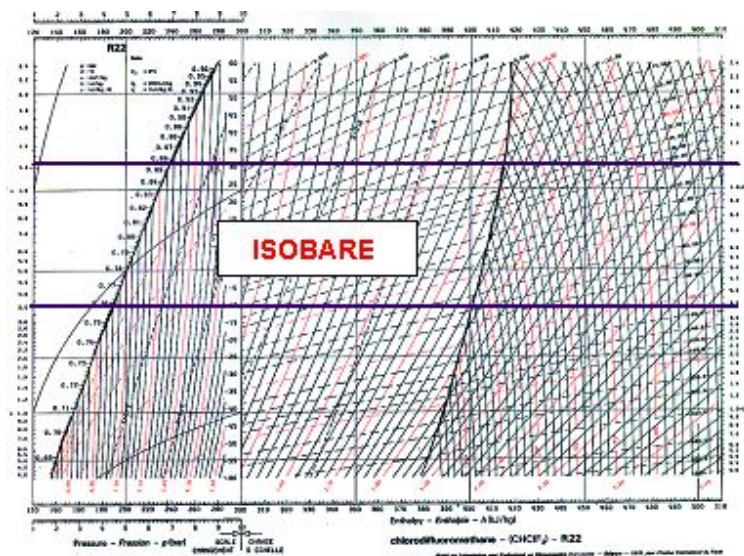
Les coordonnées du diagramme sont:

- pour l'axe des abscisses:
L'ENTHALPIE H
- pour l'axe des ordonnées:
LA PRESSION P



Pour permettre une représentation plus facile on a transformé l'axe des ordonnées en log de P, (échelle logarithmique). C'est pourquoi ce diagramme est également appelé diagramme H log de P.

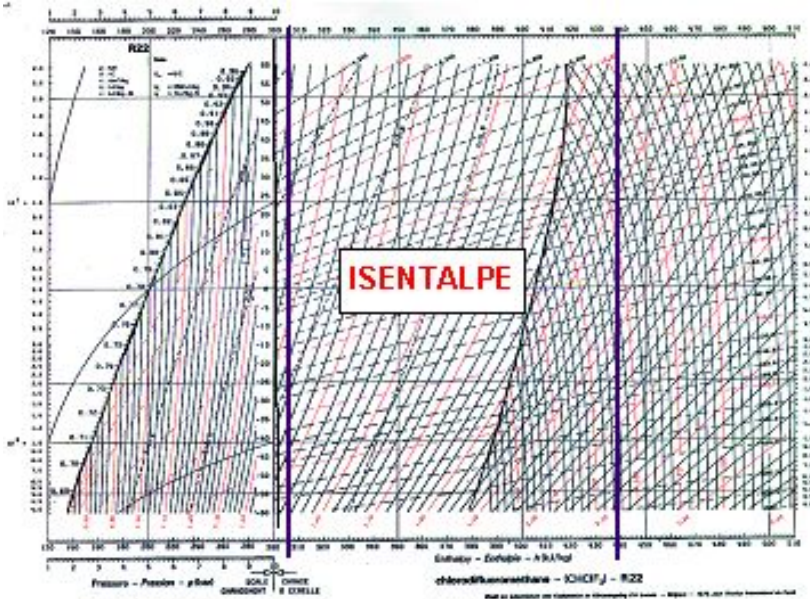
3) Isobare:



La droite qui est parallèle à l'axe des abscisses à l'ordonnée qui reste constante, est ISOBARE.

La pression est ISOBARE.

4) Identhalpe:



La droite qui est parallèle à l'axe des ordonnées à l'abscisse qui reste constante est ISENTHALPE

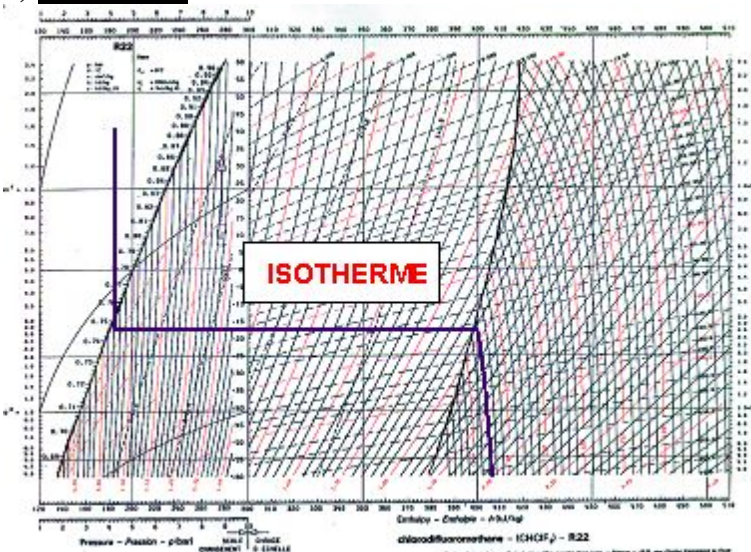
5) Isochore:

La courbe indiquant le volume massique du fluide est une isochore V.

Les isochores sont très utiles pour calculer le débit masse traversant le compresseur.

Elles permettent de déterminer la vitesse de circulation du fluide dans les tuyauteries d'aspirations et de refoulement.

6) Isotherme:



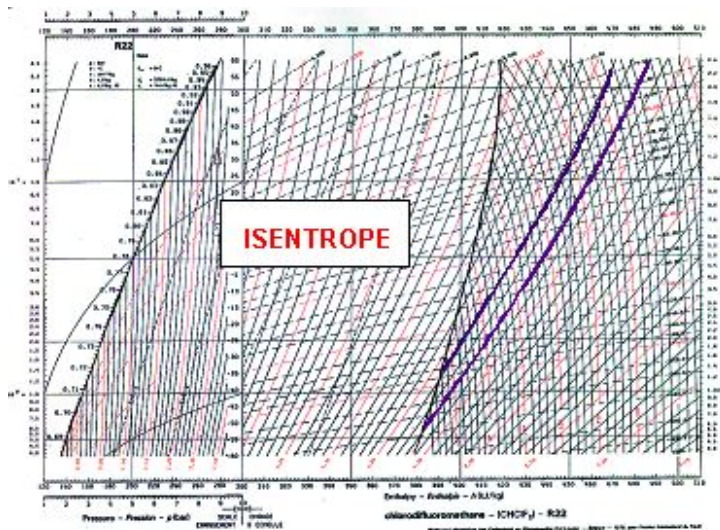
La courbe indiquant la température du fluide est une ISOTHERME

Dans sa partie liquide l'isotherme est ISENTHALPE

Dans sa partie mélange l'isotherme est ISOBARE

Dans sa partie vapeur l'isotherme est une COURBE

7) Isentrope:



La courbe indiquant l'entropie du fluide est un ISENTROPE également appelée ADIABATIQUE.

Ces courbes sont aussi appelées courbes de compressions théoriques car lors de la compression des vapeurs sans échange thermique avec le compresseur (ce qui n'arrive jamais), la vapeur monte en pression et en température suivant le tracé de la courbe S.

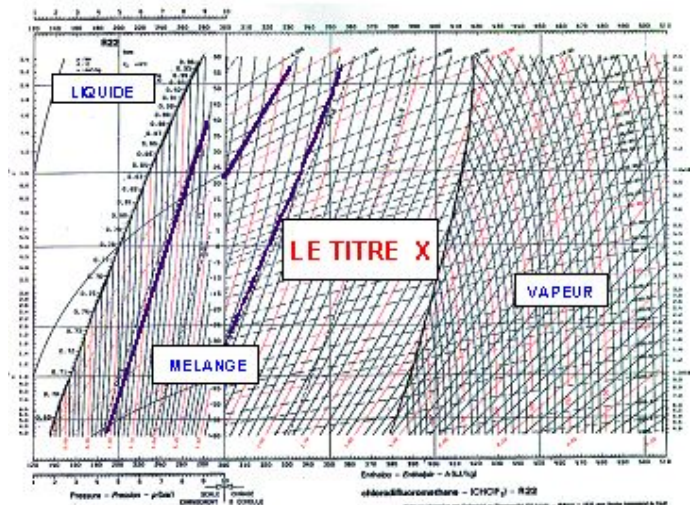
8) L' isotitre:

C'est la courbe indiquant le titre du fluide qui correspond au rapport de la masse de vapeur sur la masse totale du fluide.

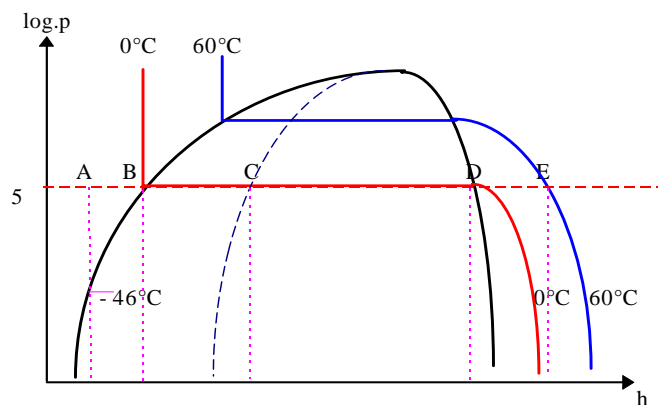
Lorsque le fluide est en équilibre à l'état liquide l'isotitre est égale à 0. Lorsque le fluide est en équilibre à l'état vapeur saturante l'isotitre est égale à 1.

Ces deux courbes se rejoignent au point critique. Elles délimitent les différentes zones du diagramme ou le fluide est homogène (liquide et vapeur) et hétérogène (mélange liquide vapeur).

Pour résumer le titre est la proportion en masse prise par la vapeur dans la zone de mélange.



Exercice sur l'isotitre

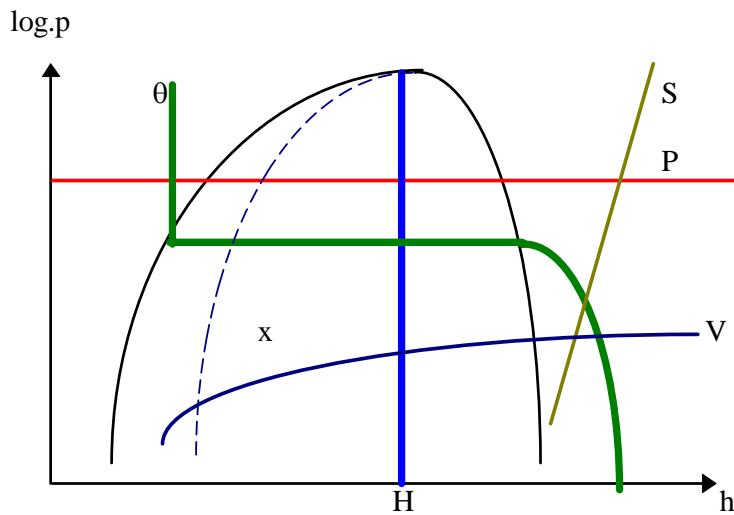


point	pression en bar	enthalpie kJ/kg	température en °C	état	titre
A	5	150	-46	liquide SR	0
B	5	200	0	liquide saturé	0
C	5	283	0	mélange	0.4
D	5	406	0	vapeur saturée	1
E	5	450	60	vapeur surchauffée	1

Le passage de B à D correspond au changement d'état.

La différence d'enthalpie entre ces deux points ($h_d - h_b$) représente la chaleur latente de vaporisation à 5 bar, 0°C.

Si l'on reprend toutes ces courbes sur le même diagramme cela nous donne la figure suivante:



9) Les unités:

Les unités de chaque courbe sont:

- L'ENTHALPIE kJ/kg
- LA PRESSION bar
- LE VOLUME MASSIQUE m³/kg
- LA TEMPERATURE °C
- L'ENTROPIE kJ/kgK
- LE TITRE n'a pas d'unité car c'est un rapport de deux masses.

10) Le circuit frigorifique:

Toute installation frigorifique à compression se compose de quatre éléments principaux:

- le compresseur,
- le condenseur,
- le détendeur,
- l'évaporateur.

Pour améliorer le fonctionnement de l'installation on ajoute à ces éléments des appareils annexes:

- le réservoir,
- le déshydrateur,
- la bouteille d'aspiration,
- le séparateur d'huile, etc....

11) Transformations subies par le fluide:

Certains des appareils sont le siège de phénomènes modifiant les caractéristiques d'un fluide frigorigène en circulation.

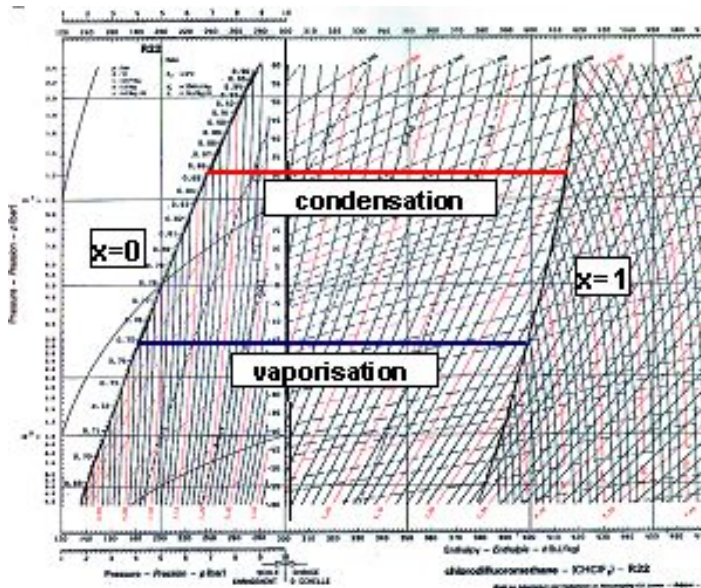
C'est surtout le cas des quatre appareils principaux. Le diagramme enthalpique étant la représentation graphique des caractéristiques d'un fluide, on peut tracer sur celui-ci toutes les modifications subies par le fluide dans l'installation. C'est le cycle frigorifique.

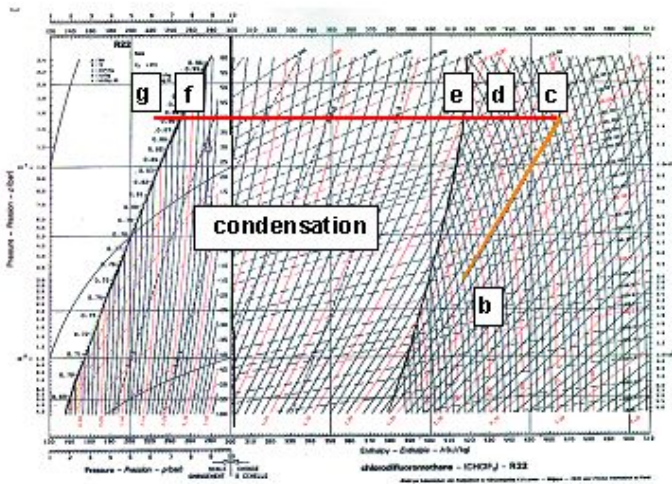
12) La condensation - la vaporisation:

La condensation et la vaporisation sont deux changements d'état. Ils se font à température constante (pour ceux qui n'ont pas de glissement) avec restitution de chaleur (condensation) ou absorption de chaleur (vaporisation).

La condensation commence sur l'isotitre $X=1$ pour se terminer sur l'isotitre $X=0$.

La vaporisation commence sur l'isotitre $X=0$ pour se terminer sur l'isotitre $X=1$.





B = ASPIRATION

C D = TUYAUTERIE REFOULEMENT
baisse de la température de 82°C à 70°C

La désurchauffe à pour valeur 12°C

La chaleur dissipée dans la tuyauterie est de:
 $h_C - h_D = 454 - 444 = 12 \text{ kJ/kg}$ de vapeur.

Au niveau du condenseur il faut distinguer 3 zones :

D E = désurchauffe

E F = condensation

F G = sous refroidissement

La différence d'enthalpie entre E F représente la chaleur latente de condensation à 39°C soit:

$$h_E - h_G = 416 - 250 = 166 \text{ kJ/kg}$$

Le point G (4°C) correspond au liquide sortant du condenseur, et le sous refroidissement du liquide dans le condenseur est représenté par le segment F G.

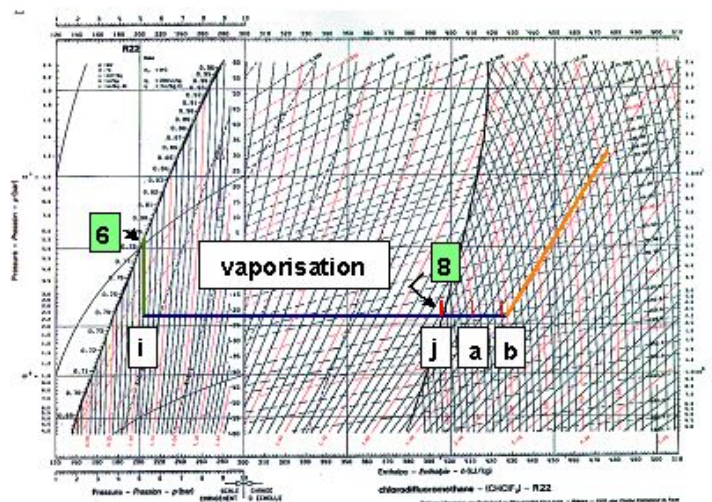
La chaleur totale évacué par le condenseur est donnée par la différence d'enthalpie: $h_D - h_G$:

$$Q_k = 442 - 242$$

$$Q_k = 200 \text{ kJ/kg}$$

La vaporisation commence sur l'isotitre
X = 0 (point 6)

pour se terminer sur l'isotitre
X = 1 (point 8).



L'évaporation du liquide se fait grâce à la chaleur cédée par le milieu à refroidir. La chaleur cédée est entièrement absorbée par le fluide frigorigène. C'est seulement à partir du point J que les vapeurs vont commencer à se surchauffer pour atteindre le bulbe au point A.

L'absorption de chaleur dans l'évaporateur provoque l'évaporation du liquide, mais aussi une augmentation de l'enthalpie, la pression reste constante. La production frigorifique massique est donnée par la différence d'enthalpie entre les points A et I soit:

$$Q_o = h_A - h_I = 404 - 230 = 174 \text{ kJ/kg}$$

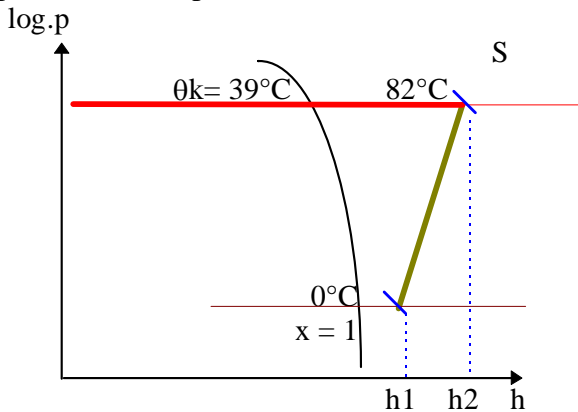
Comme Q_o représente la chaleur échangée au niveau de l'évaporateur, on peut la qualifier de production frigorifique nette puisque c'est la production réellement utilisée pour refroidir le milieu ambiant.

Mais entre A et B les vapeurs continuent à s'échauffer. La production frigorifique brute Q_{ob} est donnée par la différence d'enthalpie entre $h_B - h_I$.

$$Q_{ob} = h_B - h_I = 409 - 230 = 179 \text{ kJ/kg}$$

13) La compression:

La compression permet d'élever la pression du fluide. Celle-ci se fait lorsque le fluide est à l'état gazeux. L'équivalent calorifique de ce travail mécanique correspond à la quantité de chaleur absorbée par le fluide pendant la compression. Celle-ci sera considérée comme adiabatique.



Si le compresseur est parfait:

Energie dépensée par le compresseur:

$$Q_c = h_2 - h_1$$

$$Q_c = 454 - 409$$

$$Q_c = 45 \text{ kJ/kg de vapeur comprimée}$$

si non $W = (H_2 - H_1) / (\eta_m \times \eta_i)$

η_m = rendement mécanique

η_i = rendement indiqué

Mais dans tous les cas $Q_c = H_2 - H_1$ représente la quantité de chaleur donnée au fluide, que ce soit en équivalent thermique de compression au delà de la chaleur dissipée par les irréversibilités du compresseur.

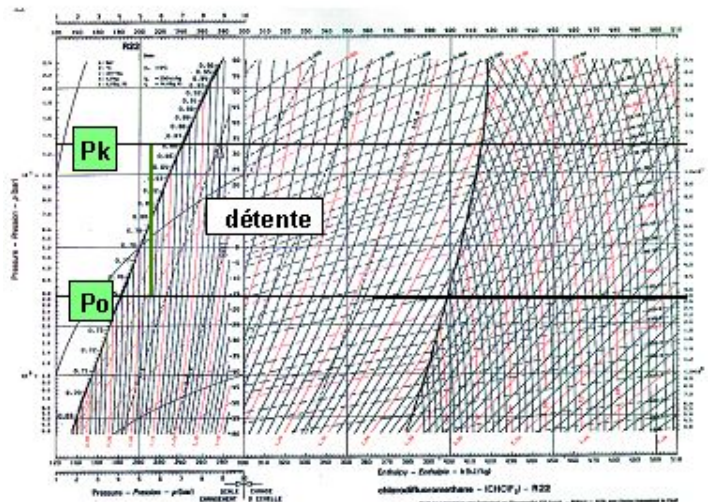
La surchauffe due à la compression est: $82 - 39 = 43^\circ\text{C}$.

14) La détente:

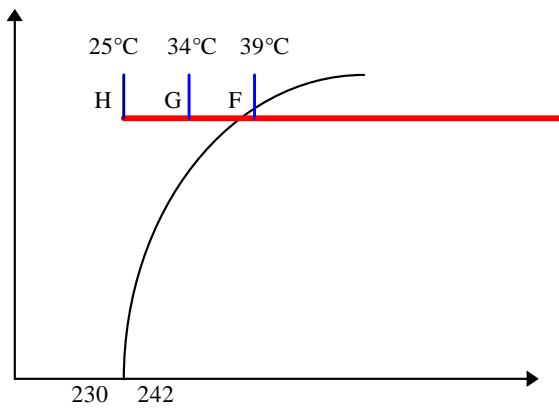
Au passage de l'orifice calibré du détendeur, le liquide subit un laminage qui provoque la chute de pression avec vaporisation partielle du fluide.

La détente du fluide est isenthalpe.
La quantité de chaleur nécessaire à la vaporisation est absorbée au liquide.

La représentation est la suivante:



Représentation n°2



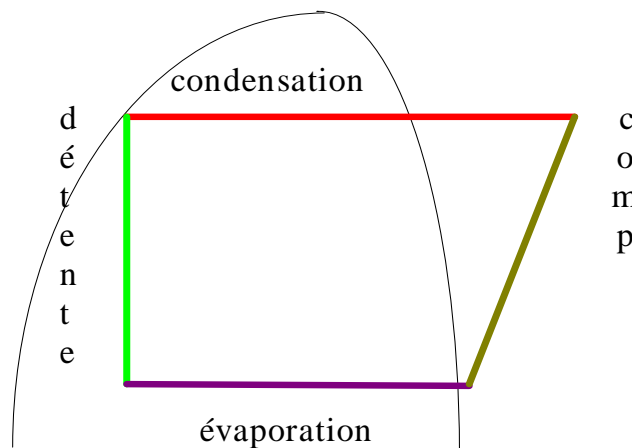
A l'entrée du détendeur H on mesure une pression sensiblement identique à G (en négligeant les pertes de charges). Par contre la température chute à 25°C.

L'échange de chaleur entre la tuyauterie liquide à 34°C et l'air ambiant à donc provoqué un sous refroidissement supplémentaire soit un SR total de 14°C (39°C - 25°C). La différence d'enthalpie entre G et H correspond à la chaleur cédée à l'air ambiant.

Dans ce cas : $h_G - h_H = 242 - 230 = 12 \text{ kJ/kg}$ de fluide.

15) Cycle frigorifique théorique:

Si l'on trace sur le même diagramme enthalpique toutes ces transformations on obtient le cycle frigorifique de l'installation. C'est le cycle théorique.

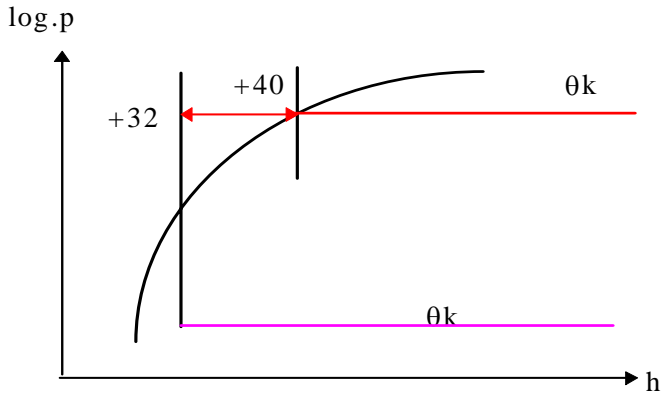


16) Le cycle frigorifique pratique:

Dans la pratique il est évident que le cycle ne correspond pas au cycle fonctionnel. Certains artifices sont créés pour augmenter la production frigorifique. La circulation du fluide dans les tuyauteries crée également des phénomènes qui changent le cycle frigorifique.

161) Le sous refroidissement du liquide:

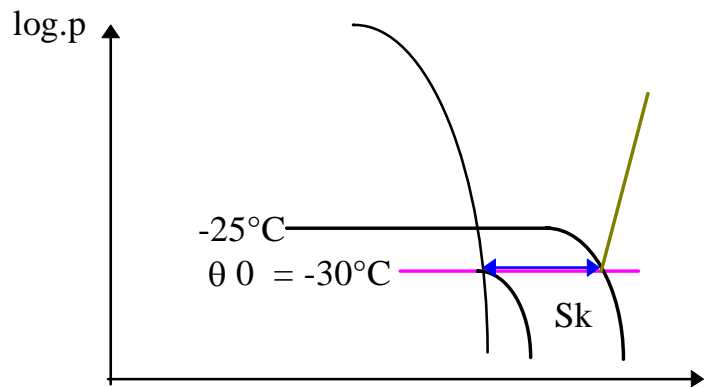
Le sous refroidissement du liquide avant son entrée dans le détendeur peut être obtenu soit dans le condenseur soit par un artifice tel que l'échangeur liquide-vapeur.



162) La surchauffe des vapeurs:

L'alimentation des évaporateurs en fluide frigorigène à l'aide de détendeurs thermostatiques permet de fonctionner en régime sec.

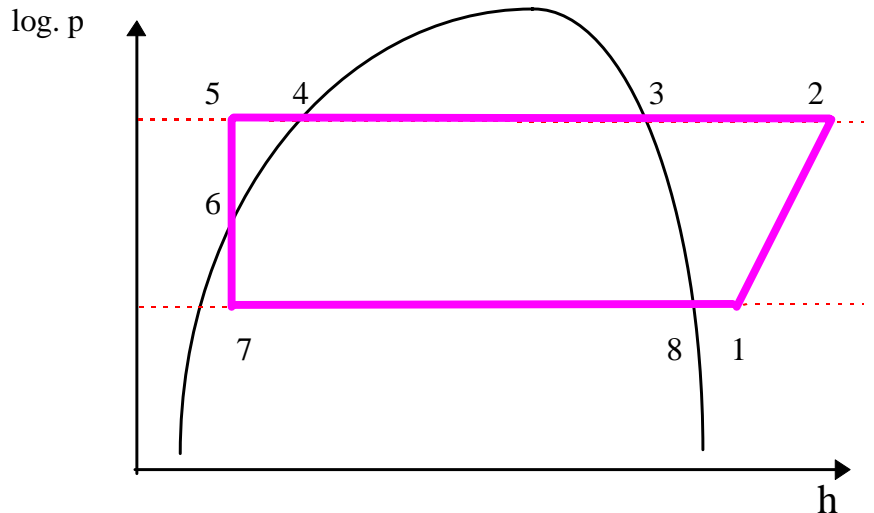
Tout le liquide étant vaporisé dans l'évaporateur, les vapeurs se réchauffent légèrement à la sortie de l'évaporateur ainsi que dans la tuyauterie d'aspiration.



163) Représentation d'un cycle frigorifique:

Représentation d'un cycle **pratique**:

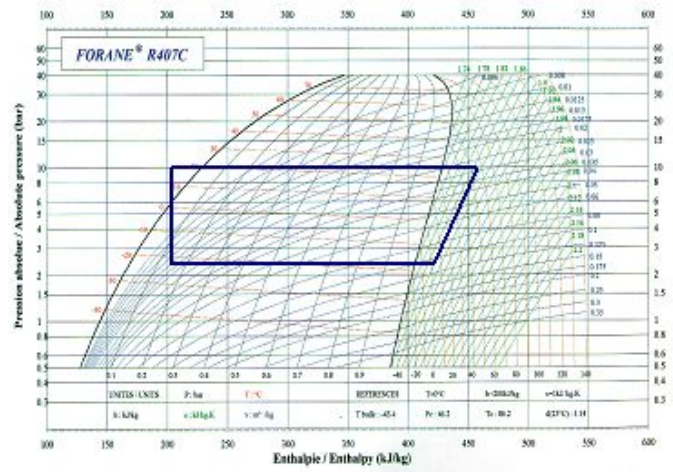
Si l'on reporte sur le diagramme enthalpique tous ces phénomènes (sans pertes de charges) on obtient le cycle suivant:



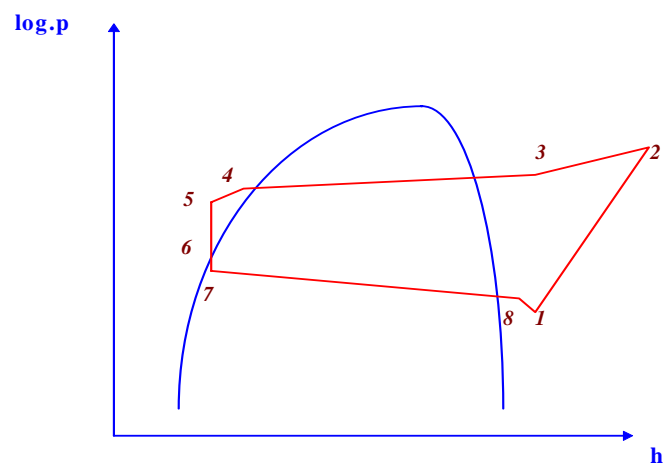
Représentation d'un cycle avec **fluide à glissement**:

Nota:

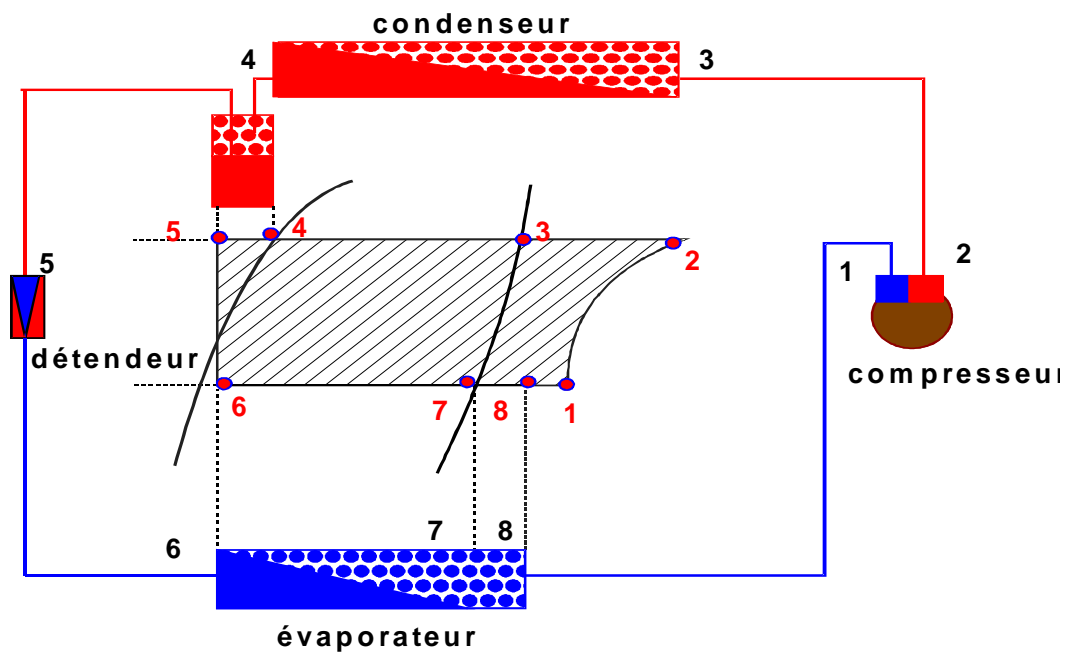
l'isotherme dans la zone de mélange ne suit pas l'isobare



Représentation d'un cycle frigorifique réel:



17) Représentation des quatre organes principaux sur le diagramme enthalpique:



NOTES:

Le COP de Carnot:

$$\text{Le COP de Carnot} = T_o / T_c - T_o$$

Le cycle de Carnot de la machine frigorifique est un cycle ditherme. C'est à dire qu'il s'effectue entre deux sources qui sont:

- l'évaporateur,
- le condenseur.

La chaleur piégée à l'évaporateur étant Q_o et la chaleur piégée au condenseur étant Q_c .

De ce fait:

$$Q_c = Q_o + W_{cp}$$

Il faut savoir qu'aucune machine frigorifique n'atteint un tel coefficient d'efficacité. L'intérêt cycle de Carnot est de permettre la comparaison avec d'autres cycles (Rankine, Molier, Enthalpique) ou d'un cycle réel.