

Le réfrigérateur

par **François MARTIN**

Lycée Couffignal - 67100 Strasbourg

RÉSUMÉ

L'utilisation des diagrammes thermodynamiques (dans notre cas le diagramme $\log P = f(H)$ du fluide frigorigène R134a) permet de comprendre de manière simple le fonctionnement d'un grand nombre d'installations dans lesquelles il y a échange d'énergie par circulation d'un fluide. Dans cet article ce sera le réfrigérateur.

INTRODUCTION

Cet article fait suite à l'aide que j'ai apporté à un étudiant de première année de PTSI pour son TIPE (Travaux d'initiative personnelle encadrés).

Objectif

Comprendre le fonctionnement du réfrigérateur sans connaissance préalable en thermodynamique.

Cette étude se décompose en deux parties :

- présentation de toutes les notions nécessaires pour comprendre le fonctionnement du réfrigérateur sans développement mathématique ;
- le réfrigérateur.

Première partie : Les notions de base nécessaires

1. OBJET DE L'ÉTUDE

Nous étudierons le comportement d'un fluide pur (liquide, gaz ou mélange des deux) traversant un certain nombre de systèmes : compresseur, détendeur, échangeurs de chaleur.

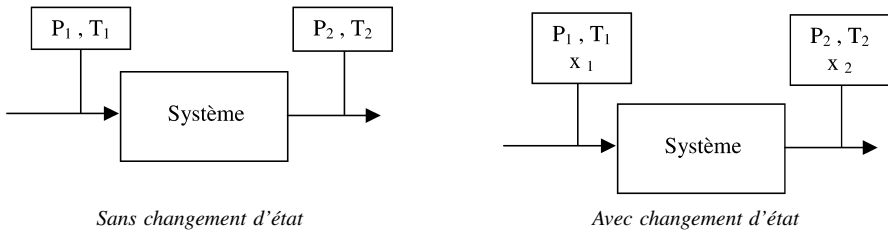


Figure 1

Ce fluide sera caractérisé par :

- sa pression P ;
- sa température T ;
- son pourcentage de vapeur x s'il se trouve simultanément sous deux états (cas d'un changement d'état). x est aussi appelé titre du fluide, il représente le pourcentage de gaz par kilogramme de fluide : exemple : $x = 0,3$ signifie qu'il y a dans 1 kg de fluide 0,3 kg de gaz et 0,7 kg de liquide.

Observation

Dans la suite nous supposons que le fluide est en régime permanent, c'est-à-dire que toutes les grandeurs qui le caractérisent sont indépendantes du temps.

2. APPLICATION DU PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE À UN FLUIDE TRAVERSANT UN SYSTÈME OUVERT

Le premier principe de la thermodynamique régit les échanges d'énergie du fluide.

2.1. Notion de travail et de chaleur

A la traversée d'un système, notre fluide va échanger avec l'extérieur de l'énergie sous deux formes.

♦ Sous forme ordonnée : c'est le travail

C'est ce qui se passe lorsque le fluide traverse un compresseur (pour un gaz), une pompe (pour un liquide). De l'énergie est transmise au fluide par l'intermédiaire des parties mobiles du compresseur ou de la pompe. Pour le compresseur d'un réfrigérateur ces parties mobiles sont représentées par un piston effectuant un va et vient dans un cylindre.

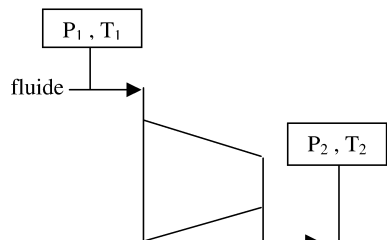


Figure 2 : Compresseur : fluide à l'état gazeux.

♦ **Sous forme désordonnée :
c'est la chaleur**

Le fluide peut échanger de l'énergie avec l'extérieur au travers d'une paroi sans que celle-ci soit en mouvement. C'est ce qui se passe dans un échangeur de chaleur. Le transfert d'énergie entre le fluide et le milieu extérieur se fait par l'intermédiaire des milliers de chocs entre les particules du fluide se trouvant le long de la paroi et les particules constituant cette paroi. C'est pourquoi on dit qu'un tel échange d'énergie est désordonné.

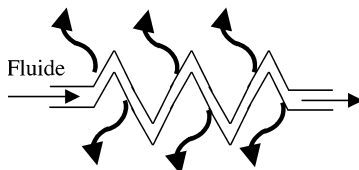


Figure 3 : Échangeur de chaleur.

2.2. Le bilan énergétique

L'étude du premier principe permet de définir une fonction énergétique H appelée ENTHALPIE caractérisant les échanges d'énergie du fluide à la traversée d'un système ouvert. Nous pourrions lire les valeurs de cette fonction sur le diagramme $\log P = f(H)$ caractéristique du fluide qui sera utilisé ultérieurement.

On montre que la variation d'enthalpie du fluide à la traversée d'un système est égale à la somme du travail échangé avec les parties mobiles du système, W_M (appelé travail machine) et de la chaleur Q :

$$\Delta H = H_2 - H_1 = W_M + Q$$

Nous raisonnerons toujours pour **1 kg de fluide** :

- H enthalpie du fluide ;
- W_M travail machine ;
- Q chaleur s'exprime en **KJ / kg**.

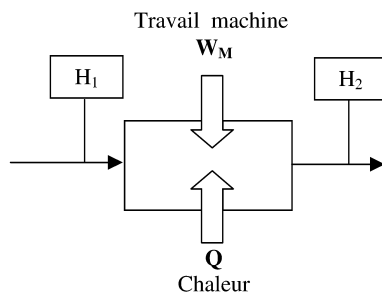


Figure 4

Remarques

- 1 - Le travail est appelé travail machine parce qu'un système possédant des parties mobiles est une machine !
- 2 - Si le fluide reçoit de l'énergie sous forme de travail alors $W_M > 0$; s'il en cède, $W_M < 0$. Il en va de même pour la chaleur : $Q > 0$ si le fluide reçoit de l'énergie sous forme de chaleur, $Q < 0$ si le fluide en cède.

Observation importante

Nous négligerons toutes les variations de vitesse du fluide ce qui est tout à fait justifié dans le cas d'un réfrigérateur.

2.3. Les différentes transformations que va subir le fluide

2.3.1. Dans un compresseur :

compression adiabatique - compression isentropique

Un compresseur est une machine qui sert à comprimer un gaz c'est-à-dire à augmenter sa pression. Le bilan énergétique du fluide sous forme gazeuse traversant le compresseur s'écrit :

$$\Delta H = (W_M)_{COMP} + Q_{COMP}$$

◆ Compression adiabatique

Les phénomènes se déroulant à l'intérieur du compresseur ne seront pas abordés ici. Ils sont si rapides que nous pouvons supposer que la compression que subit le fluide se fait sans échange de chaleur avec l'extérieur. On dit que **la transformation est adiabatique**. On peut écrire :

$$\Delta H = (W_M)_{COMP}$$

car :

$$Q_{COMP} = 0$$

Le compresseur fournit de l'énergie au fluide :

$$(W_M)_{COMP} > 0$$

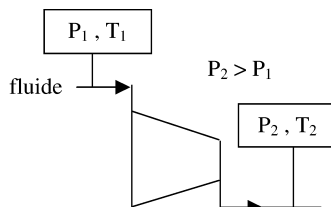


Figure 5 : Compresseur : fluide à l'état gazeux.

Remarque

Évidemment, en réalité ce n'est pas tout à fait le cas. Mais pour comprendre simplement les choses, il nous faut négliger un certain nombre de phénomènes quitte dans un deuxième temps à améliorer les modèles pour mieux coller à la réalité.

◆ Compression isentropique : compression adiabatique idéale

La compression adiabatique peut être idéalisée si nous négligeons :

- la viscosité du fluide ;
- les frottements ;
- la conduction thermique.

Dans ces conditions la transformation adiabatique est dite isentropique c'est-à-dire qu'il existe une fonction thermodynamique appelée **ENTROPIE** notée $\underline{S}$ (unité : **kJ/kg**) caractérisant le fluide et qui reste constante pendant la transformation.

$$\Delta S = 0 \Leftrightarrow S_1 = S_2$$

Nous pourrions lire les valeurs de cette fonction sur le diagramme $\log P = f(H)$ caractéristique du fluide qui sera utilisé ultérieurement.

Observation

Il n'est absolument pas question de développer la notion abstraite d'entropie sous peine de désintéresser un public non initié.

2.3.2. Dans un échangeur de chaleur

Un échangeur de chaleur est une tuyauterie serpentant dans l'endroit où doivent s'effectuer les échanges d'énergie sous forme de chaleur. Un échangeur ne possède pas de parties mobiles. Il n'y a donc pas d'échange d'énergie sous forme de travail machine entre le fluide et le milieu extérieur. Le bilan énergétique du fluide s'écrit :

$$\Delta H = (W_M)_{\text{ECHANGEUR}} + Q_{\text{ECHANGEUR}}$$

$$\Delta H = (Q)_{\text{ECHANGEUR}}$$

car :

$$(W_M)_{\text{ECHANGEUR}} = 0$$

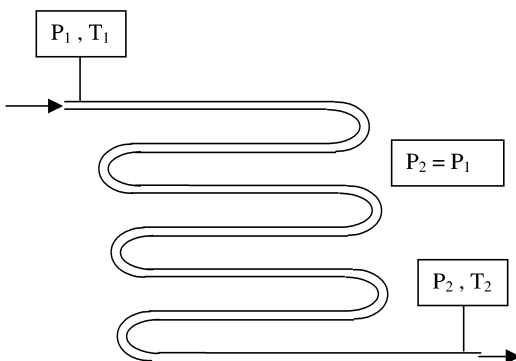


Figure 6

♦ Hypothèse simplificatrice

Nous négligerons dans la tuyauterie les « pertes de pression » dues à la viscosité du fluide et aux frottements de sorte que **la transformation subit par le fluide peut être considérée comme isobare.**

2.3.3. Dans un détendeur

En première approximation, un détendeur est un tube comportant deux parties séparées par un petit orifice dont on peut faire varier le diamètre. Il a pour but de faire chuter la pression du fluide.

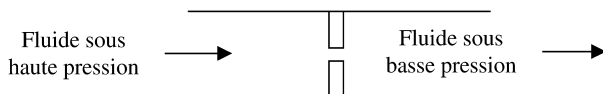


Figure 7

Un détendeur n'est pas une machine : il ne possède pas de partie mobile. Ainsi le fluide n'échange pas d'énergie sous forme de travail machine lorsqu'il traverse un détendeur : $(W_M)_{\text{DETENDEUR}} = 0$

Ce n'est pas dans un détendeur que le fluide doit échanger de l'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi on l'isole thermiquement de l'extérieur avec de la laine de verre par exemple. Ainsi il n'y a pas d'échange d'énergie sous forme de chaleur entre le fluide et le milieu extérieur : $(Q)_{\text{DETENDEUR}} = 0$. Nous pouvons écrire :

$$\Delta H = (W_M)_{\text{DETENDEUR}} + Q_{\text{DETENDEUR}}$$

$$\Delta H = 0$$

car : $(W_M)_{\text{DETENDEUR}} = 0$

et : $(Q)_{\text{DETENDEUR}} = 0$

On dit que la détente est isenthalpique.

3. LES CHANGEMENTS D'ÉTAT D'UN CORPS PUR : VAPORISATION ET CONDENSATION

C'est la dernière notion importante à aborder.

La vaporisation ou la condensation d'un corps pur se fait sous pression et à température constantes. Ces phénomènes se dérouleront essentiellement dans les échangeurs.

3.1. La vaporisation

Exemple : considérons le cas où la pression est maintenue constante.

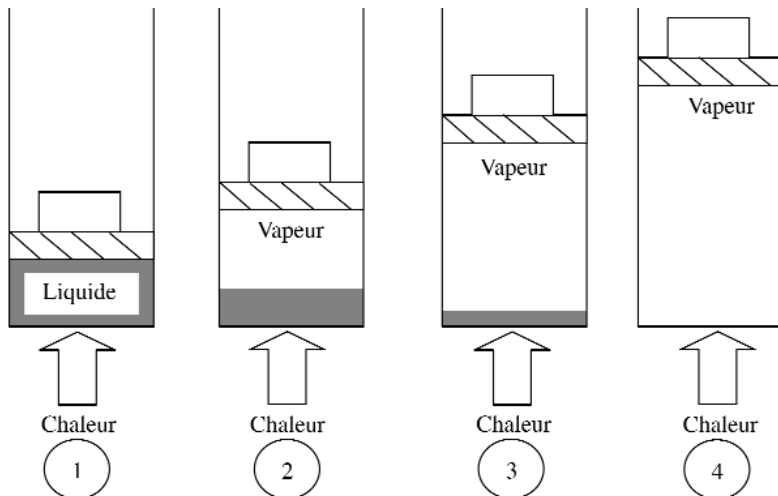


Figure 8

Si un liquide est chauffé, sa température augmente jusqu'au moment où apparaît la première bulle de gaz (cas 1). A partir de cet instant, la température reste constante et toute l'énergie reçue par le fluide lui permet de se vaporiser (cas 2 et 3). Lorsque la dernière goutte de liquide s'est transformée en vapeur, la température se met de nouveau à augmenter (cas 4).

La valeur de la température T de changement d'état ne dépend que de la pression P . Si on change la valeur de la pression, la température de vaporisation change aussi. La figure 8 donne qualitativement l'aspect de la fonction $P=f(T)$ pour le changement d'état de l'eau pure.

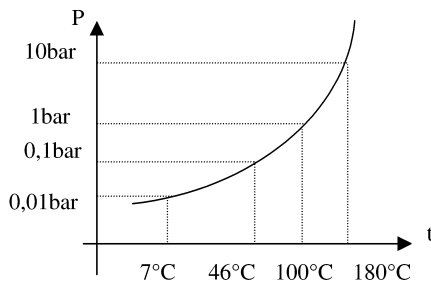


Figure 9 : Cas de l'eau.

3.2. La liquéfaction ou condensation

C'est le phénomène inverse.

Si on refroidit un gaz, sa température diminue jusqu'au moment où apparaît la première goutte de liquide (cas 1). A partir de cet instant, la température reste constante. Le fluide se condense tout en continuant à céder à l'extérieur de l'énergie sous forme de chaleur (cas 2 et 3). Lorsque la dernière bulle de gaz s'est transformée en liquide, la température se met de nouveau à diminuer.

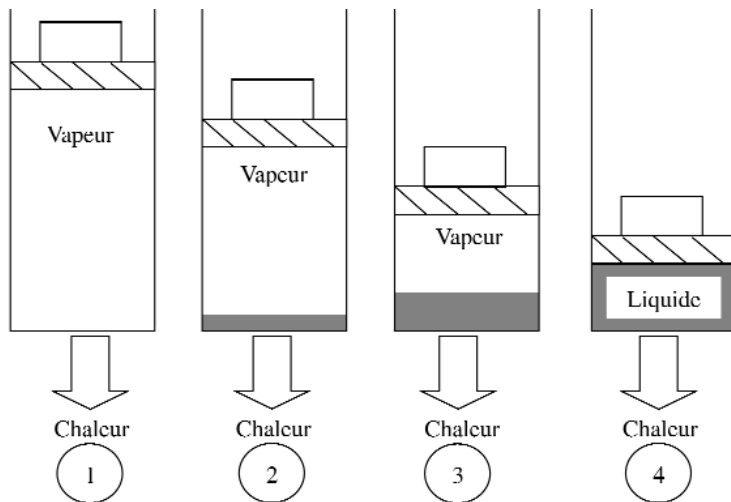


Figure 10

La valeur de la température T de changement d'état ne dépend que de la pression

P. Si on change la valeur de la pression, la température de condensation change aussi.

Pour une pression donnée, la température de condensation est égale à celle de vaporisation.

3.3. Pourquoi s'intéresse-t-on tellement au changement d'état ?

C'est aux cours des changements d'état que les échanges d'énergie sous forme de chaleur sont les plus importants.

Prenons par exemple le cas de l'eau sous pression atmosphérique : Pour élever de 1 °C la température de 1 kg d'eau liquide, il faut lui fournir une énergie de 4,18 kJ. Par contre pour faire passer 1 kg d'eau à 100 °C de la phase liquide en phase gazeuse il faut fournir environ 2260 kJ. L'énergie mise en jeu est environ 540 fois plus élevée au cours du changement d'état.

3.4. Conclusion

Pendant le changement d'état d'un corps pur, la température et la pression restent constantes.

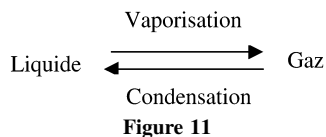
Au cours de sa vaporisation le fluide reçoit du milieu extérieur de l'énergie sous forme de chaleur :

$$Q_{\text{VAPORISATION}} > 0$$

Au cours de sa condensation le fluide cède sous forme de chaleur de l'énergie au milieu extérieur :

$$Q_{\text{CONDENSATION}} < 0$$

Dans les mêmes conditions de température et de pression, ces énergies échangées sont égales en valeur absolue.



Deuxième partie : Le réfrigérateur

Le problème

Soit à refroidir un local pour stocker des denrées alimentaires ou tout autre chose.

Exemple : On désire que la température y soit de - 10 °C. Comment faire ?

1. CHOISIR UN FLUIDE FRIGORIGÈNE

Pour refroidir le local, il faut lui extraire de l'énergie. Un moyen simple est d'y pro-

voquer la vaporisation d'un fluide. En effet au cours de sa vaporisation le fluide absorbe de l'énergie sous forme de chaleur et refroidira ainsi le local. Pour que les échanges d'énergie se fassent dans de bonnes conditions, il faut que le fluide se vaporise à une température plus basse que celle que doit avoir le local. Prenons $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ par exemple.

Question

Existe-t-il un fluide capable de se vaporiser à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Réponse

L'eau ne convient pas.

Il existe des fluides tel que l'ammoniac mais il est dangereux. A l'heure actuelle on utilise surtout le « **R134a** » : **1,1,1,2 Tétrafluoroéthane** $\text{CF}_3 - \text{CH}_2\text{F}$ qui n'attaque pas la couche d'ozone.

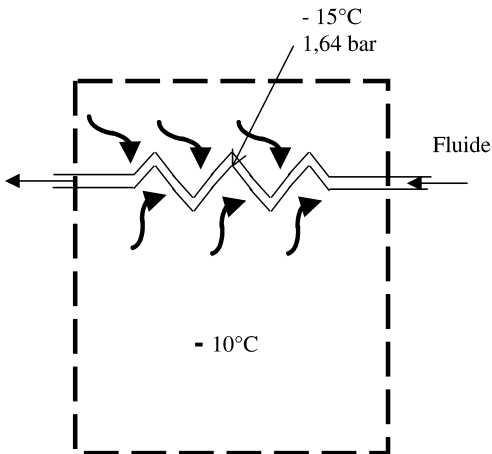


Figure 12

Quelques valeurs caractérisant le changement d'état liquide - vapeur du R134a.

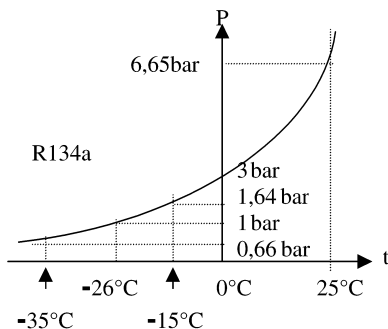


Figure 13

Ces valeurs pourront se lire sur le diagramme $\log P = f(H)$ que nous étudierons au paragraphe 3.

Ainsi, il suffit de vaporiser dans le local le fluide R134a initialement sous forme liquide à la pression de 1,64 bar. Le fluide absorbera de l'énergie provenant du local et, ainsi, le refroidira. Nous le ferons circuler dans un échangeur de chaleur que nous appellerons **évaporateur**.

2. PRINCIPE DU RÉFRIGÉRATEUR

2.1. Le condenseur

Pour des raisons d'économie et de non pollution, le fluide est recyclé après son évaporation. Il doit être ramené dans son état initial. *Deux conditions sont nécessaires :*

- il faut que le fluide restitue l'énergie qu'il a emmagasiné lors de sa vaporisation ;
- il faut le condenser c'est-à-dire le liquéfier.

L'énergie peut être cédée à l'air ambiant comme cela se fait la plupart du temps (on pourrait envisager autre chose). Supposons que l'air soit à 20 °C. Pour que l'échange d'énergie entre le fluide et l'air puisse se faire dans de bonnes conditions, il faut que le fluide soit à une température supérieure à celle de l'air : prenons 25 °C. Le fluide doit se condenser à 25 °C. Pour cela sa pression doit être de 6,65 bar. Cette valeur pourra aussi se lire sur le diagramme $\log P = f(H)$.

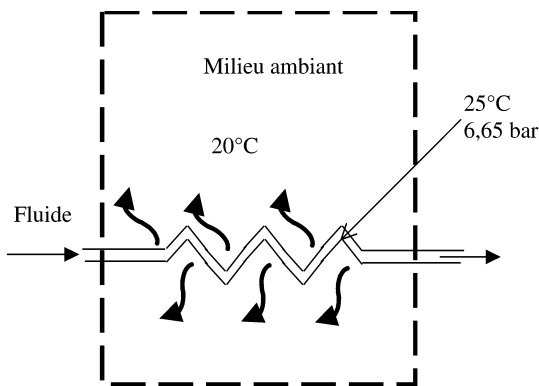


Figure 14

Conclusion

On fera circuler dans un échangeur placé dans l'air le fluide à 25 °C sous 6,65 bar pour qu'il puisse s'y condenser. Cet échangeur est appelé le **condenseur**.

2.2. Le compresseur

Le fluide sort de l'évaporateur sous forme gazeuse à la pression de 1,64 bar. Il faut l'amener au condenseur toujours sous forme gazeuse, à la pression de 6,65 bar, d'où la nécessité de disposer d'un compresseur pour comprimer le gaz.

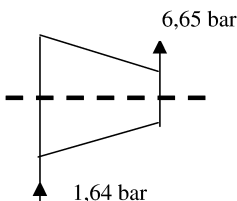


Figure 15 : Compresseur : fluide à l'état gazeux.

2.3. Le détendeur

Le fluide sortant du condenseur sous forme liquide à la pression de 6,65 bar, il faut le ramener à l'évaporateur à la pression de 1,64 bar, d'où la nécessité de disposer d'un détendeur.

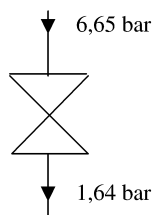


Figure 16 : Symbole du détendeur.

2.4. Récapitulatif : schéma de principe du réfrigérateur

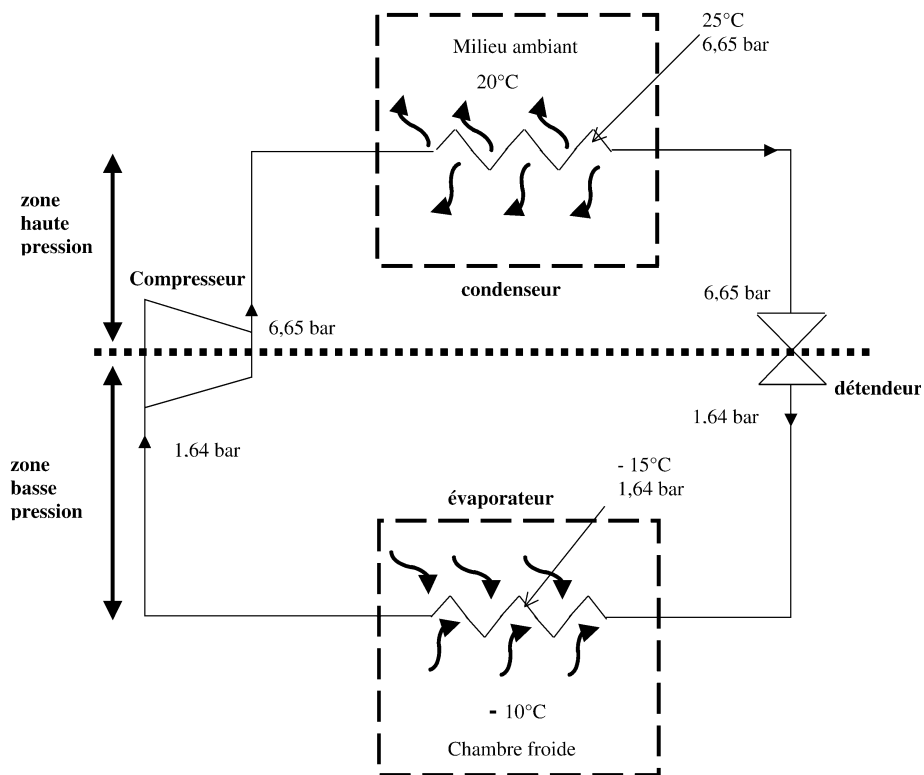


Figure 17

3. SUIVI DE L'ÉVOLUTION DU FLUIDE À PARTIR DE SON DIAGRAMME $\log P = f(H)$

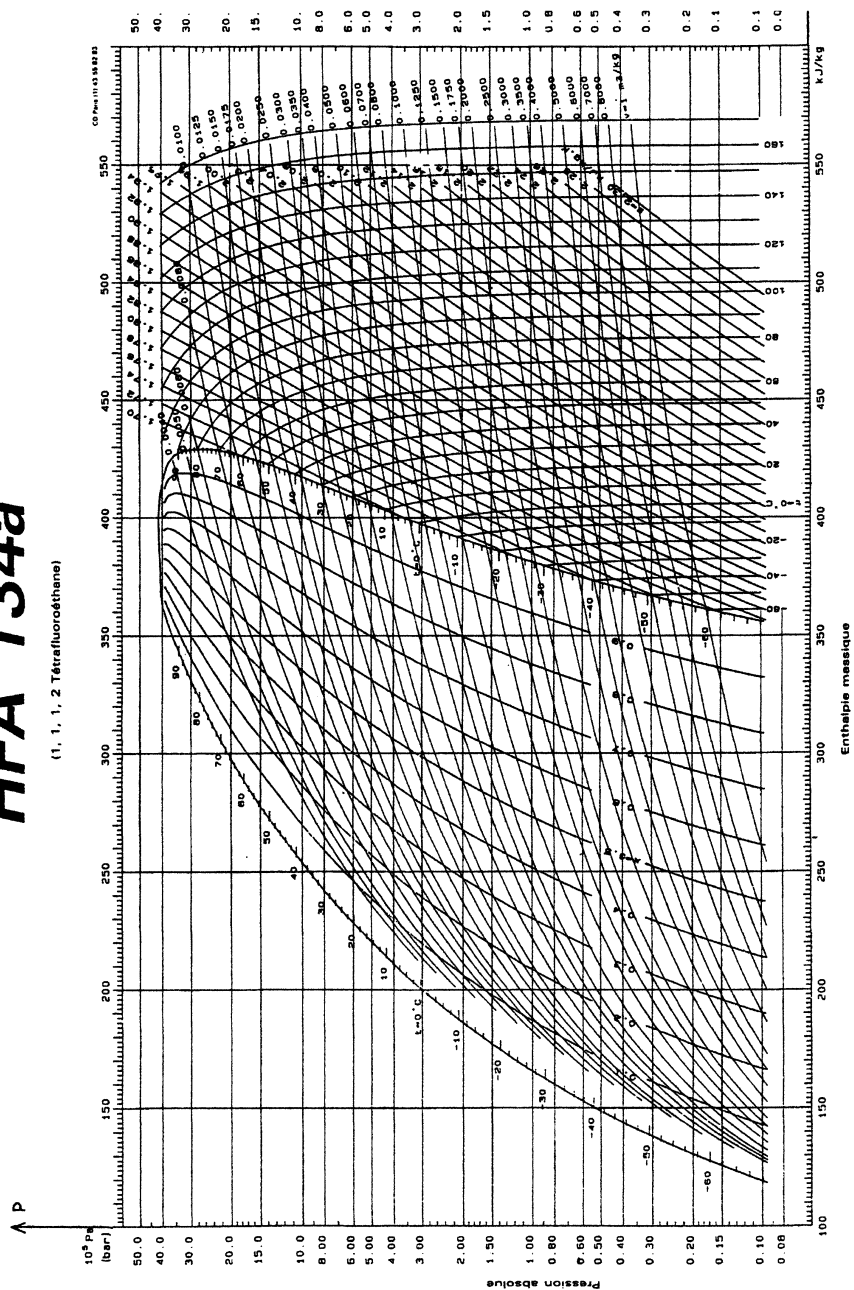
3.1. Diagramme $\log P = f(H)$ du fluide R134a (cf. page ci-contre)

Pour suivre de façon plus détaillée l'évolution du fluide dans notre réfrigérateur, il nous faut utiliser le diagramme des frigorisites $\log P = f(H)$ relatif au R134a. Ce diagramme, très complet, nécessite une brève description pour pouvoir être utilisé.

- ◆ Tout d'abord, on distingue deux zones :
 - la zone 1 où coexistent les phases liquide et vapeur ; elle se trouve entre les courbes $x = 0$ et $x = 1$;
 - la zone 2 dans laquelle le fluide est uniquement sous phase vapeur.
- ◆ *Les isothermes*
 - Dans la zone 1 du changement d'état, les isothermes sont horizontales confondues avec les isobares (droites horizontales non représentées). En effet, au cours d'un changement d'état, pression et température restent constantes. Et à une certaine pression correspond une certaine température et vice versa.
 - Dans la zone 2 les isothermes sont presque verticales. Nous n'en donnerons pas la raison.
- ◆ *Les isentropiques*

Seules sont représentées les isentropiques en phase gazeuse : ce sont les seules utiles. Sur le diagramme, les valeurs de l'entropie s'échelonnent de 1,70 kJ/Kkg à 2,30 kJ/Kkg.
- ◆ On observe aussi des isochores (courbes à volume massique constant) en m^3/kg que nous n'utiliserons pas.
- ◆ Les isenthalpiques sont des droites verticales parallèles à l'axe des ordonnées.
- ◆ Les isobares, droites horizontales, ne sont pas représentées.

(1, 1, 1, 2 Tétrafluoroéthane)



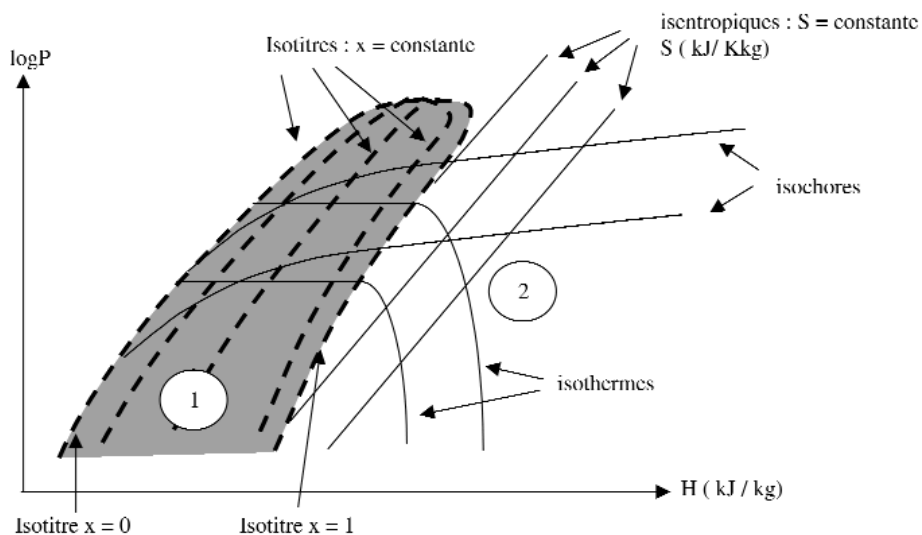


Figure 18

Pression et température des changements d'état

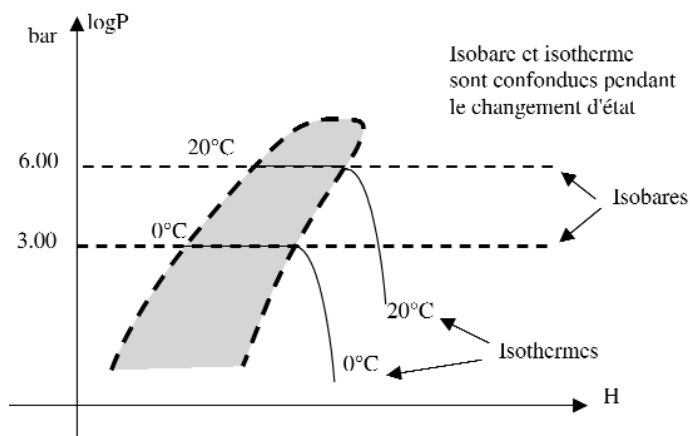


Figure 19

Il est extrêmement facile de lire les valeurs des pressions et des températures correspondantes aux changements d'état, sachant que isothermes et isobares sont confondues pendant ces changements d'état. Par exemple, pour une pression de 6 bar, la température de changement d'état est de 20 °C.

3.2. Évolution du fluide R134a dans le réfrigérateur

Voir le diagramme (cf. page suivante).

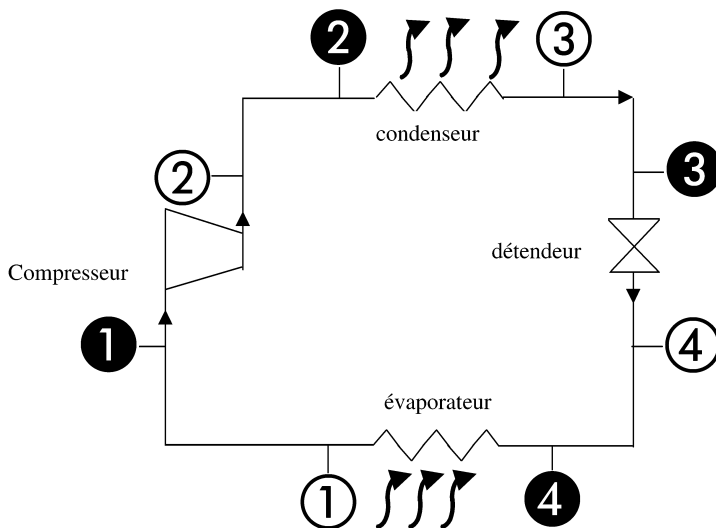


Figure 20

Hypothèses

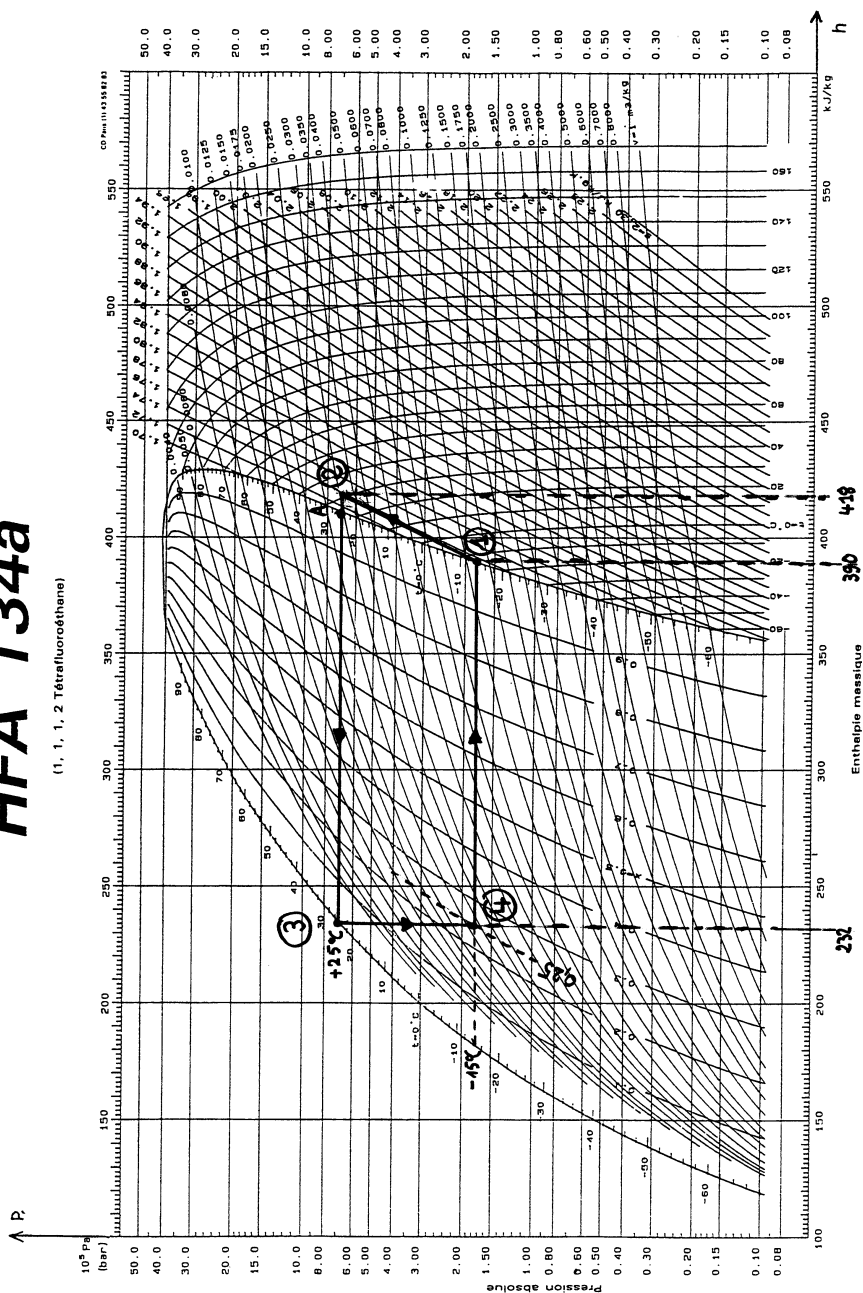
Les conduites reliant les différents appareils (compresseur, détendeur, échangeurs) sont parfaitement calorifugées donc il n'y a pas d'échange d'énergie avec le milieu extérieur. Les frottements et la viscosité du fluide sont négligeables. Ainsi les chutes de pression dans les conduites sont considérées comme nulles : pression et température y restent constantes. Dans ces conditions : les points (①, ①) sont confondus sur le diagramme : même pression, même température. Il en va de même pour les points (②, ②) ; (③, ③) ; (④, ④).

Description d'un cycle du fluide à travers le réfrigérateur

- ① Le fluide doit sortir de l'évaporateur sous forme gazeuse pour ne pas détériorer le compresseur ne pouvant aspirer de la vapeur humide (fluide à la fois sous forme gazeuse et liquide). Le liquide, n'étant pas compressible, peut provoquer la rupture de certaines pièces mécaniques. Le cas limite est celui où le fluide vient tout juste d'achever son évaporation : sa pression est de 1,64 bar, sa température de -15°C , son titre est $x = 1$.
- ① → ② Le fluide circule à pression et température constantes dans la conduite reliant l'évaporateur et le compresseur. ① et ② sont confondus sur le diagramme.
- ② → ③ Compression isentropique du fluide de la pression 1,64 bar jusqu'à la pression

HFA 134a

(1, 1, 1, 2 Tétrafluoroéthène)



de 6,65 bar. Sur le diagramme, le fluide « suit » l'isentrope issue de point ❶ jusqu'au point ❷ intersection avec l'isobare 6,65 bar.

- ❷ → ❷ Le fluide circule à pression et température constantes dans la conduite reliant le compresseur au condenseur. ❷ et ❷ sont confondus sur le diagramme.
- ❷ → ❸ Le fluide sous forme gazeuse subit une transformation isobare dans le condenseur. Il se refroidit d'abord sous forme gazeuse jusqu'au A se trouvant sur l'isotitre $x = 1$, puis il se condense jusqu'au point ❸ sur l'isotitre $x = 0$. Si l'échangeur est correctement dimensionné et le réfrigérateur correctement réglé, au point ❸ le fluide est, à peu près sous forme de liquide à la sortie du condenseur.
- ❸ → ❹ Le fluide circule à pression et température constantes dans la conduite reliant le condenseur du détendeur. ❸ et ❹ sont confondus sur le diagramme.
- ❹ → ❺ Le fluide subit une détente isenthalpique à travers le détendeur de la pression 6,65 bar à la pression de 1,64 bar. Sur le diagramme, le fluide « suit » l'isenthalpique, verticale reliant les points ❸ et ❺. On constate qu'il se vaporise partiellement. Au point ❺, son titre est $x \approx 0,25$ (25 % de vapeur, 75 % de liquide).
- ❺ → ❻ Le fluide circule à pression et température constantes dans la conduite séparant le détendeur de l'évaporateur. ❺ et ❻ sont confondus sur le diagramme.
- ❻ → ❶ Le fluide continue de se vaporiser mais de manière isobare dans l'évaporateur.

Conclusion

Dans le réfrigérateur, le fluide décrit deux isobares, une isentropique et une isenthalpique.

4. BILAN ÉNERGÉTIQUE DU FLUIDE AU COURS D'UN CYCLE

4.1. L'énergie « utile » : $(Q)_{\text{EVAPORATEUR}}$

Ce qui nous intéresse, en tant qu'utilisateur, c'est l'énergie reçue par le fluide dans l'évaporateur puisqu'elle correspond à celle arrachée au local à refroidir. Le bilan énergétique du fluide traversant l'évaporateur qui est un échangeur est :

$$\Delta H_{4 \rightarrow 1} = H_1 - H_4 = (Q)_{\text{EVAPORATEUR}}$$

Sur le diagramme, on lit : $H_4 = 390 \text{ kJ/kg}$ et $H_1 = 232 \text{ kJ/kg}$

$$(Q)_{\text{EVAPORATEUR}} = H_1 - H_4 = 158 \text{ kJ/kg}$$

4.2. L'énergie « qui coûte » : $(W_M)_{\text{COMP}}$

Par contre il faut payer l'énergie mise en jeu au niveau du compresseur. En effet le compresseur doit être entraîné par un moteur électrique absorbant de l'énergie électrique

facturée par EDF. Le bilan énergétique du fluide traversant le compresseur est :

$$\Delta H_{1 \rightarrow 2} = H_2 - H_1 = (W_M)_{COMP}$$

Sur le diagramme, on lit : $H_2 = 418 \text{ kJ/kg}$ et $H_1 = 390 \text{ kJ/kg}$

$$(W_M)_{COMP} = H_2 - H_1 = 28 \text{ kJ/kg}$$

4.3. Efficacité du réfrigérateur : ε

4.3.1. Définition de l'efficacité

$$\varepsilon = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie qui coûte}} = \frac{Q_{\text{évaporateur}}}{W_{\text{compresseur}}}$$

$$\varepsilon = \frac{158}{28} = 5,64$$

4.3.2. Commentaire

Pour 1 kJ d'énergie dépensée à entraîner le compresseur, le fluide arrache 5,64 kJ d'énergie à la chambre froide !! Voilà qui est intéressant. Mais en réalité l'efficacité est plus faible si on supprime toutes les hypothèses simplificatrices.

4.4. Efficacité d'un réfrigérateur idéal : ε

Le réfrigérateur idéal qui fonctionnerait entre les mêmes températures (+ 25 °C et - 15 °C) est celui décrit par Carnot : le fluide y subit deux transformations isothermes et deux transformations isentropiques. On montre que son efficacité a pour expression :

$$\varepsilon = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

T_F « température de la source froide » en Kelvin : $T_F = (273 - 15) = 258$

T_C « température de la source chaude » en Kelvin : $T_C = (273 + 25) = 298 \text{ K}$

$\varepsilon = 6,45$. Notre réfrigérateur n'en est pas trop éloigné.

5. LE RÉFRIGÉRATEUR RÉEL

5.1. Le cycle réel décrit par le fluide

Il est différent du cycle théorique (cf. figure 21).

La transformation subit par le fluide dans le compresseur n'est pas isentropique. Il y a des pertes de charge (chutes de pression) dans les deux échangeurs et les tuyaux. Le fluide s'est déjà complètement vaporisé avant d'entrer dans le compresseur. Il s'est aussi déjà complètement liquéfié avant de sortir du condenseur.

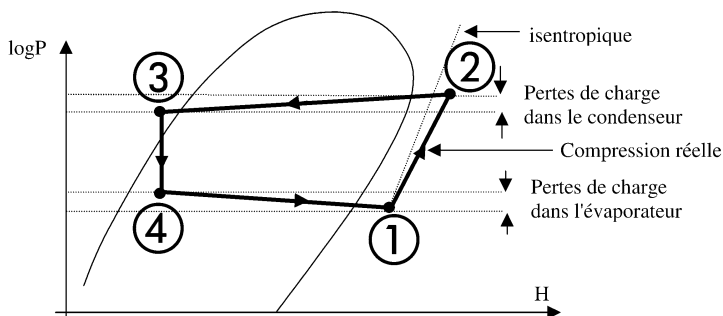


Figure 21

5.2. Le détendeur thermostatique

Le compresseur ne doit pas aspirer de la vapeur humide (fluide à la fois sous forme gazeuse et liquide). Le liquide, n'étant pas compressible, peut provoquer la rupture de certaines pièces mécaniques telles que bielle, piston, clapets, ... Il faut donc contrôler à chaque instant l'état du fluide à la sortie de l'évaporateur et agir sur le détendeur se trouvant en amont.

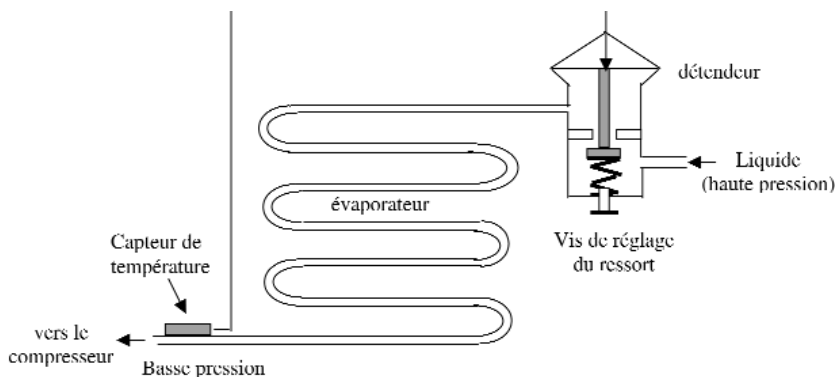


Figure 22

Le détendeur contrôle le débit massique du fluide par le réglage de son ouverture.

Le débit, en régime permanent, est fixé de telle manière que la température de sortie soit égale à une valeur dite de consigne T_0 supérieure à celle du changement d'état. Ainsi on est sûr que le fluide s'est entièrement vaporisé avant de sortir de l'évaporateur : on dit qu'il sort sous forme de vapeur surchauffée.

Principe de fonctionnement du détendeur

Si la température en sortie est T_0 , le réfrigérateur est en fonctionnement stable.

- ◆ Supposons que la température en sortie devienne inférieure à la consigne T_0 c'est-à-dire que sa valeur se rapproche de celle du changement d'état : il y a donc un risque que le fluide sorte de l'évaporateur sous forme de vapeur humide (fluide non entièrement vaporisé). Le capteur de température détecte ce défaut et agit sur le détendeur en diminuant son ouverture pour faire chuter le débit de fluide. La durée de passage du fluide dans l'évaporateur augmente et la zone où la dernière goutte de liquide se vaporise s'éloigne de la sortie : les échanges d'énergie sous forme de chaleur se font mieux à faible vitesse. Ainsi la température en sortie va réaugmenter pour se rapprocher de T_0 car un fluide entièrement vaporisé, voit sa température croître lorsqu'il absorbe de l'énergie.
- ◆ Si la température en sortie devient supérieure à la valeur de consigne, c'est le phénomène contraire qui se produit. La zone où la dernière goutte de liquide s'est vaporisée s'est éloignée de la sortie de l'évaporateur. C'est pourquoi la température du fluide augmente lorsqu'une fois vaporisé il continue de se déplacer dans l'évaporateur. Le capteur de température détecte ce défaut et agit sur le détendeur en augmentant son ouverture pour accroître le débit du fluide. La durée de passage du fluide dans l'évaporateur diminue et la zone où la dernière goutte de liquide se vaporise se rapproche de la sortie : les échanges d'énergie sous forme de chaleur se font moins bien à grande vitesse. Ainsi la température en sortie va diminuer car le fluide va achever sa vaporisation en un endroit plus proche de la sortie de l'évaporateur et donc sa température n'aura pas le temps de croître de manière importante par rapport à sa température de changement d'état.

CONCLUSION

L'emploi des diagrammes (ici $\log P = f(H)$ mais il en existe d'autres) en thermodynamique est une manière concrète et simple d'aborder l'étude de tous les systèmes techniques telles que les pompes à chaleur, les turbines à gaz ou à vapeur, les réacteurs d'avion, les centrales thermiques...

BIBLIOGRAPHIE

- ◆ VAN WYLEN, SONNTAG et DESROCHERS. *Thermodynamique appliquée*. Édition du Renouveau Pédagogique (Montréal).
Je ne saurais trop conseiller cet ouvrage abordant la thermodynamique d'une manière moins scolaire que la plupart des livres traitant de la question.
- ◆ Bailly M. *Thermodynamique technique* (tome 1 et 2). Bordas, 1971.
- ◆ Thermodynamique série Schaum
- ◆ Sujets des concours d'entrée aux écoles d'ingénieurs.
- ◆ Sujets de sciences physiques du BTS Cira (BTS contrôle et régulation) (de 1990 à 2000).