

CHAPITRE 5

PRINCIPE DE LA PRODUCTION DE FROID

1. INTRODUCTION

En France, la consommation moyenne annuelle par personne atteint 320 kg de produits réfrigérés, et 30 kg de produits surgelés et crèmes glacées, sur un total de 520 kg. Le marché des plats préparés a connu une augmentation de 20 % par an sur les 10 dernières années. Les plats préparés et produits cuits sous vide sont également très utilisés dans la restauration collective. En France, 5 milliards de repas sont pris hors foyer chaque année, chiffre qui correspond à deux repas par semaine et par personne. Les industries alimentaires et la distribution, pour répondre à la demande des consommateurs, ont allongé la durée de conservation des produits. Malgré le développement de technologies nouvelles, l'abaissement de la température reste le moyen le plus naturel de limiter la croissance des microorganismes, qu'ils soient pathogènes ou d'altération. Le développement des produits réfrigérés présente des enjeux en matière de sécurité et de qualité microbiologique. En effet, plusieurs types de microorganismes peuvent se développer pendant des périodes de stockage prolongées ou pendant des remontées de température. Par ailleurs, les fluctuations de température pendant la chaîne du froid peuvent conduire à des pertes de qualité des produits surgelés. Pour répondre aux attentes des consommateurs et tenir compte de progrès technologiques rapides dans les domaines du froid, de la traçabilité et des méthodes de conservation, les pouvoirs publics révisent régulièrement la législation sur l'hygiène des aliments, afin de prévenir les risques et donner confiance à la population. En ce qui concerne la protection de l'environnement, les entreprises utilisant des équipements frigorifiques doivent s'adapter aux règles internationales visant à bannir les substances appauvrissant la couche d'ozone, et auront à réaliser des efforts importants d'économies d'énergie pour répondre aux objectifs fixés par la limitation des émissions de gaz à effet de serre. Les machines à froid interviennent dans trois types de procédés, à savoir : la réfrigération, la congélation, la surgélation. Il y a bien sûr de nombreuses applications purement industrielles : nous nous

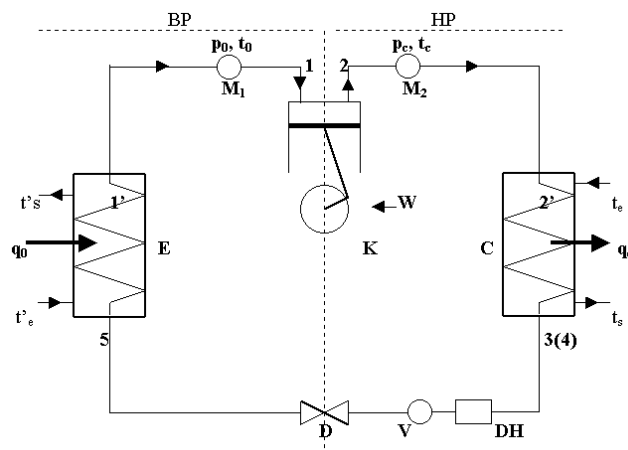
contenterons de donner ici une liste succincte mais néanmoins assez complète des applications du froid dans un domaine privilégié : le domaine de l'agroalimentaire : traitement des viandes, conserves, produits laitiers, œufs, margarines, fruits et légumes, chocolaterie-confiserie, boulangerie – pâtisserie, fabrication et traitement des boissons, transports, agriculture.

2. MACHINES FRIGORIFIQUES A COMPRESSION SIMPLE

Ces machines frigorifiques n'utilisent qu'une compression simple (c'est-à-dire pas de compresseurs en étage). Le compresseur est soit un compresseur à piston, soit un compresseur à membrane ou un compresseur à vis.

2.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une machine frigo comprend principalement quatre éléments et divers accessoires comme le montre la Figure suivante :



Les éléments principaux sont :

- le compresseur K : Il réduit la pression dans l'évaporateur pour permettre au réfrigérant de s'y vaporiser. Il aspire les vapeurs fournies par l'évaporateur permettant ainsi au processus d'évaporation de se renouveler. Il comprime les vapeurs pour les amener à la pression de condensation.
- le détendeur D : Il contrôle l'écoulement du réfrigérant et permet sa détente. Il régule le débit de façon à optimiser le remplissage de l'évaporateur permettant ainsi une production de froid optimale. Il évite au compresseur d'aspirer du réfrigérant liquide.
- le condenseur C : Il reçoit les vapeurs surchauffées sous haute pression et les refroidit de façon à les faire changer d'état. On obtient ainsi du liquide sous haute pression. Ce changement d'état s'appelle la condensation.

- l'évaporateur E : Le réfrigérant s'y vaporise en prenant la chaleur de l'enceinte à refroidir. C'est le siège d'un changement d'état appelé l'évaporation (passage du liquide au gaz)
- le réservoir de liquide : Il permet de compenser les variations de demande de débit du détendeur thermostatique.

Les accessoires les plus courants sont :

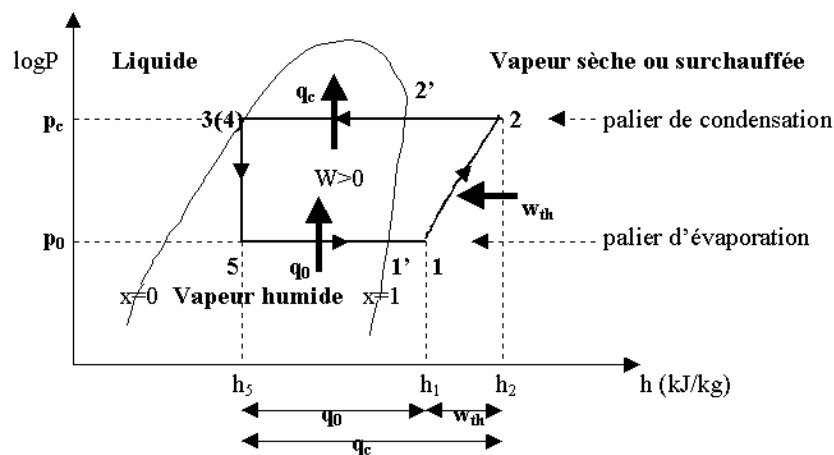
- un déshydrateur DH
- un voyant liquide V
- deux manomètres HP (M2) et BP (M1).

2.2. LE CYCLE THEORIQUE DE MOLLIER DE LA MACHINE FRIGO.

Afin de pouvoir exploiter et contrôler une machine frigo, on utilise un cycle théorique d'une machine idéale en admettant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- la compression du fluide 1-2 est isentropique (pas de perte de chaleur) ;
- il n'y a pas de perte de charge dans la tuyauterie et les échangeurs (les paliers de condensation et d'évaporation sont à pression constante, c'est-à-dire des isobares) ;
- la détente 4-5 est isenthalpique ($H = \text{cte}$).

On représente alors ce cycle idéalisé dans un diagramme ($\log P, h$) par la Figure suivante.



Les caractéristiques du cycle sont les suivantes :

- la compression 1-2 est isentropique avec apport de travail W_{th} de l'extérieur ;
- la vapeur surchauffée à la sortie du compresseur se désurchauffe de 2-2', dans la tuyauterie et au contact de l'eau dans le condenseur ;

- à partir du point 2', la vapeur se condense progressivement dans le condenseur C de 2'-3 (mélange L+V), et au point 3(4) on n'a plus que du liquide (titre $x = 0$) ;
- ensuite, le liquide se détend à enthalpie constante de 4-5 ;
- la vapeur humide (mélange L+V) s'évapore progressivement dans l'évaporateur E de 5-1 ;
- la portion 1'-1 correspond à une surchauffe de la vapeur dans l'évaporateur.

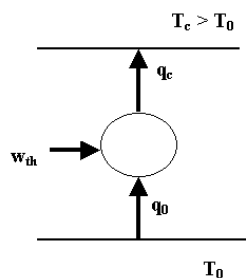
2.3. Bilan d'énergie de la machine MF

En vertu du premier principe de la Thermodynamique, il y a conservation de l'énergie : c.à.d que la quantité de chaleur rejetée au condenseur (Q_C) doit être égale à la chaleur extraite à l'évaporateur (Q_0) plus le travail (W_{th}) consommé pour faire tourner le compresseur, d'où l'équation $Q_C = Q_0 + W_{th}$, cette équation traduit donc le bilan d'énergie de la machine frigo idéalisée. Le choix d'échelle en abscisse (enthalpie H en kJ/kg) est très pratique pour l'exploitation quantitative du cycle car il permet de lire directement les énergies H_i aux différents points i (1,2,3,4) du cycle de la machine. On vérifie ainsi le premier principe sur l'échelle en abscisse, car on constate que :

- la quantité de chaleur dégagée au condenseur : $Q_C = H_2 - H_4$
- la quantité de froid produite à l'évaporateur : $Q_0 = H_1 - H_5$;
- le travail dépensé au compresseur : $W_{th} = H_2 - H_1$

2.4. Coefficients de performance COP ou efficacité ε

Dans les machines dynamo-thermiques, on remplace le terme de rendement par son coefficient de performance (COP) η , car le rendement serait > 1 (paradoxe de Kelvin). Le COP de la machine frigo η_F est défini par $\eta_F = \frac{\text{Froid produit}}{\text{travail fourni}} = \frac{Q_0}{W_{th}}$.



Or, $Q_C = Q_0 + W_{th}$ et $\eta_F = \frac{Q_0}{W_{th}} = \frac{(H_1 - H_5)}{(H_2 - H_1)}$. On constate alors, que le COP $\eta_F > 1$ (car T_C

$> T_0$) et dans la pratique, $\eta_F = 3$ à 5 . Par conséquent, on extrait plus de calories à la source froide T_0 que d'énergie-travail fourni au moteur : ceci explique l'intérêt des machines DT pour le chauffage et la climatisation des bâtiments et maisons.

2.5. GRANDEURS CARACTERISTIQUES DE LA MACHINE FRIGO

Une machine ou installation frigo est d'abord caractérisée par :

- son régime nominal de fonctionnement défini par (T_C , T_0 , T_{SR}), c'est-à-dire par le choix des températures de ses paliers de condensation (T_C), d'évaporation (T_0) et de sa température de sous-refroidissement ($T_{SR} = T_4$).
- sa puissance frigorifique Φ_0 donnée en fg/h ou kJ/kg avec ($1 \text{ fg/h} = 1 \text{ kcal/h}$).

On définit en plus un certain nombre de grandeurs caractéristiques de la MF, ces grandeurs sont rapportées :

- soit, à l'évaporateur (production frigo massique Q_0 , production frigo par m^3 aspiré Q_0 , débit massique q_m , débit volumique aspiré V_a ou balayé V_b , puissance frigo...);
- soit, au condenseur (quantité de chaleur à évacuer Q_C , puissance calorifique P_C ...)
- soit, au compresseur (travail théorique W_{th} ou réel W_r , puissance théorique P_{th} et réelle P_r , puissance absorbée par rapport à la puissance frigo $N(\text{kW})$...).

L'évaluation de ces diverses grandeurs à partir du diagramme de Mollier ou d'un logiciel dédié, permet de caractériser et contrôler la machine MF. Le relevé des pressions et températures en divers points du circuit et le tracé du cycle de Mollier permet de contrôler le bon fonctionnement de la machine automatisé ou non.

Le technicien ou l'ingénieur sont confrontés à deux types de problèmes :

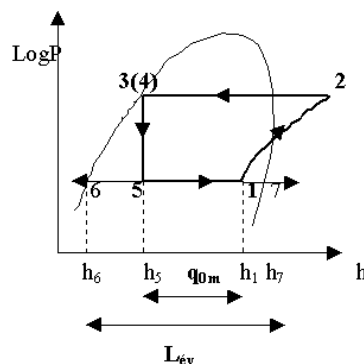
- la détermination des caractéristiques géométriques du compresseur (puissance développée, course, alésage, nombre de pistons et d'étages...) et des échangeurs (dimensions et types...), connaissant la puissance frigo souhaitée par le client.
- le contrôle et la maintenance de l'installation frigo en fonction du régime nominal défini et de la puissance frigo imposée en relevant périodiquement les paramètres mesurables (T , p , débit, puissance...).

On compare également l'efficacité ε de la machine frigo, défini comme le rapport du COP cycle de Mollier par le cycle de Carnot inverse, soit :

$$\varepsilon = \frac{\eta_F}{\eta_C} \text{ avec } 0 \leq \varepsilon \leq 1 \text{ et } \eta_F = \frac{Q_0}{W_{th}} = \frac{(H_1 - H_5)}{(H_2 - H_1)} \text{ et } \eta_C = \frac{T_0}{T_C - T_0}$$

2.6. MODIFICATION DU CYCLE FONCTIONNEL DE LA MACHINE MF

Le but d'une machine frigo est de produire du froid (c.à.d des frigories) par extraction de calories à la source froide, en évaporant un fluide frigorigène et d'abaisser la température de cette source de + 5°C à - 30°C selon l'usage (frigo ou congélateur, chambre froide). En terme d'économie d'énergie et de rentabilité, on cherche donc à optimiser la production de froid Q_0 avec une dépense de travail W_{th} consommé minimum, soit donc à avoir un COP élevé. D'après la définition du COP de la machine frigo η_F , il faut donc augmenter la production frigo massique $Q_{0m} = H_1 - H_5$, représentée par le segment $[h_5 h_1]$.



On cherche donc à augmenter Q_{0m} , c.à.d la longueur du segment $(h_1 - h_5)$, on a donc intérêt à utiliser au maximum la chaleur latente d'évaporation $(h_7 - h_6)$.

L'augmentation de la quantité de froid produite Q_{0m} est alors obtenue :

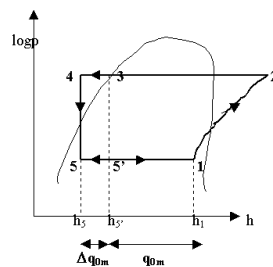
- en déplaçant le point 1 vers la droite, grâce à une surchauffe du fluide,
- en déplaçant le point 5 vers la gauche, grâce à un sous-refroidissement du fluide

1) Sous-Refroidissement du liquide

Le fluide frigorigène à l'état liquide à la sortie du condenseur (point 3) est sous-refroidi (c.à.d on abaisse sa température en déplaçant le point 3 vers la gauche), ceci est réalisé :

- soit, dans le condenseur lui-même en augmentant ses dimensions (c.à.d sa surface d'échange)
- soit, dans une bouteille d'accumulation (BA) placée à la sortie du condenseur
- soit, dans un échangeur interne situé entre le condenseur et l'évaporateur.

On peut procéder soit à un seul sous-refroidissement (de 3-4) ou à deux sous-refroidissements successifs (de 3-4 et ensuite de 4-4'), voir la Figure suivante : en déplaçant le point 3 vers la gauche, on déplace automatiquement le point 5 vers la gauche et on augmente ainsi la partie de la chaleur latente non exploitée.



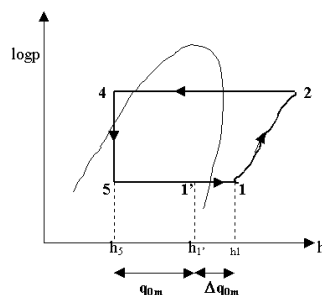
Sous-refroidissement du liquide

2) Surchauffe de la vapeur

Le fluide frigorigène à l'état de vapeur humide est surchauffé (c.à.d on élève sa température en déplaçant le point 1 vers la droite), ceci est réalisé (voir Figure 12) :

- soit, dans l'évaporateur lui-même en augmentant ses dimensions,
- soit, dans une bouteille anti-coups liquide (BACL) placée à la sortie de l'évaporateur
- soit, dans un échangeur interne situé entre les deux échangeurs

En déplaçant le point 1 vers la droite, on augmente également la portion de chaleur latente d'évaporation non utilisée.



En procédant à des sous-refroidissements et à des surchauffes dans les installations frigorifiques, on augmente donc le froid produit dans l'évaporateur et le segment Q_{0m} s'approche de la chaleur latente d'évaporation : on extrait alors plus de

calories à la source froide en exploitant au maximum la chaleur libérée par l'évaporation du fluide.

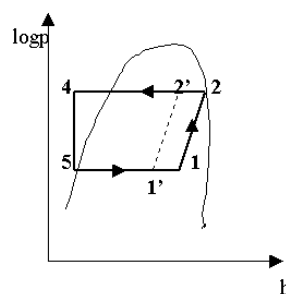
2.7. REGIMES DE FONCTIONNEMENT

Une machine frigorifique peut fonctionner selon deux types de régimes, à savoir :

- le régime humide utilisé dans les premières machines MF
- le régime sec conseillé et utilisé actuellement

Ces régimes de fonctionnement sont illustrés dans les 2 Figures suivantes.

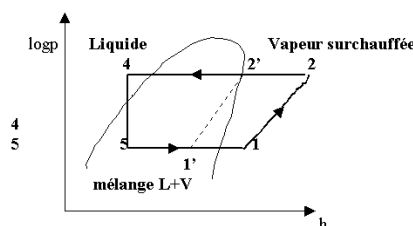
1) Régime humide



Fonctionnement en régime humide

Dans ce régime, la compression 1-2 se termine juste à l'état sec (point 2). Ce régime présente des risques pour le compresseur K (coups de bélier), du fait d'une présence possible d'un résidu liquide en fin de compression (déplacement du point de 1 à 1'). Ce régime réduit la production frigo Q_{0m}

2) Régime sec



Pour éviter ces risques de coups de bélier en fin de compression (dommageable au compresseur), on préfère donc travailler en régime sec, en déplaçant le point 1 vers la droite grâce à une surchauffe dans l'évaporateur ou une bouteille BACL. On déplace alors le point du régime de vapeur humide (mélange L+V) vers le régime de vapeur sèche ou surchauffée. Si la surchauffe est réalisée dans l'évaporateur lui-même, alors l'augmentation du froid produit augmente les performances de la machine MF. En cas d'inversion du sens de circulation du fluide frigorigène par une

vanne d'inversion à quatre voies, une BACL s'impose pour éviter d'aspirer du liquide dans le compresseur.

2.8. LA POMPE A CHALEUR

Les machines dynamothermiques transfèrent de la chaleur d'une source froide à une source chaude et de ce fait combine deux fonctions essentielles :

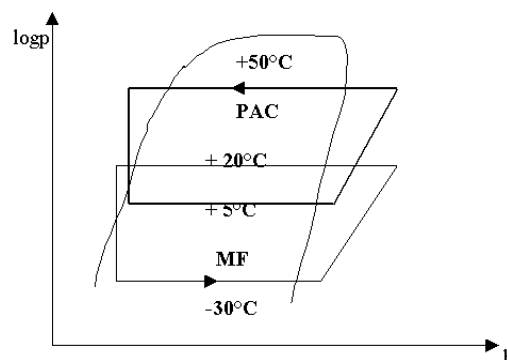
- La production de froid au niveau de l'évaporateur, par absorption de calories à la source froide (machine frigo)
- la production de chaleur au niveau du condenseur, par dégagement de calories à la source chaude (pompe à chaleur)

On dispose donc, d'une machine capable de :

- produire du froid (réfrigérateur, congélateur, chambre froide,...)
- de produire du chaud pour chauffer un local, un bâtiment (pompe à chaleur)
- d'assurer à la fois le chauffage et le refroidissement d'un local (climatisation) en utilisant une vanne d'inversion, qui échange le rôle des échangeurs selon les saisons ETE ou HIVER

La pompe à chaleur (PAC) se distingue donc uniquement de la machine frigo (MF) par son régime nominal de fonctionnement, c.à.d par les valeurs des températures de condensation T_c et d'évaporation T_0 :

- dans une machine MF, on veut obtenir des températures T_0 basses (+5° à -30°C)
- dans une machine PAC, on veut obtenir des températures plus élevées pour T_c (40 à 60°C)



3. Les fluides frigorigènes

Avant d'entreprendre l'étude des fluides frigorigènes actuellement en service dans les installations frigorifiques de moyennes et petites puissances, il est nécessaire de

rappeler les éléments qui apporteront de grands changements dans la nature des fluides frigorigènes utilisés et poser, par la même, le problème de leur remplacement par des fluides de substitution pour les installations neuves en règle générale. Afin d'assurer une continuité de service pour les installations existantes, les producteurs de fluides frigorigènes ont élaboré des fluides dits « de transition » à base de HCFC (R22, R124, R142b, R152a, R409A) qui permettent une conversion du fluide d'origine par un produit à faible action sur la couche d'ozone, et des fluides définitifs (corps purs ou mélanges) : R23, R32, R125, R134a, R404A, R407C, R507... sans action sur la couche d'ozone. Des études ont montré l'impact des CFC et des BrFC sur la couche d'ozone. A la suite de ces constatations, les aérosols dont les propulseurs étaient des CFC avaient été interdits aux USA. En 1987, le Protocole de Montréal révisé en Juin 1990 a gelé pour quelques années l'utilisation des CFC avant leur interdiction définitive. Puis lors d'une réunion des Nations Unies, en 1992, les délais d'utilisation des CFC programmés à Londres ont été réduits. Des réglementations françaises et européennes indiquent précisément l'échéancier lié à l'utilisation des HCFC.

CFC : Chlorofluorocarbone – entièrement halogéné

HFC : hydrofluorocarbone – ne contient pas de chlore

HCFC : hydrochlorofluorocarbone – contient du chlore non entièrement halogéné

DrFC : bromofluorocarbone

3.1. La réglementation

La France faisant partie de l'Union européenne se doit d'appliquer les règlements européens qui sont de plusieurs formes :

- les règlements européens : ils sont applicables dès leur parution ;
- les directives européennes : les états membres de l'Union européenne ont l'obligation d'intégrer ces directives dans leur législation ;
- les lois : elles donnent les grandes lignes d'un règlement et sont fixées par le pouvoir législatif ;
- les décrets : ils sont promulgués en application des lois votées au parlement ;
- les arrêtés : ils donnent des précisions pour l'application des décrets.

La réglementation française essentielle :

- Décret n°92.1271 du 7 décembre 1992 modifié par le décret n°98-560 du 30 juin 1998. Relatif à certains fluides frigorigènes utilisés dans les équipements frigorifiques et de climatisation.
- Arrêté du 12 janvier 2000. Contrôle d'étanchéité dans les équipements frigorifiques et de climatisation.

La réglementation européenne principale :

Règlement européen CE 2037/2000 du 29 juin 2000 applicable au 1^{er} octobre 2000. Relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Elle stipule :
Pour les CFC : la commercialisation est interdite depuis le 1^{er} octobre 2000 ;
l'utilisation pour la maintenance est interdite depuis le 31 décembre 2000.

Pour les HCFC : l'utilisation pour les installations neuves est limitée. L'échéancier est le suivant :

- Interdiction à partir du 1^{er} janvier 2000. Dans les entrepôts frigorifiques du secteur public et de la distribution. Pour les équipements ayant une puissance absorbée sur l'arbre égale ou supérieure à 150 kW.
- Interdiction à partir du 1^{er} janvier 2001. Pour tous les équipements de réfrigération. Pour les équipements de climatisation des puissances supérieures à 100 kW à l'exception des PAC et des systèmes réversibles.
- Interdiction à partir du 1^{er} janvier 2002. pour les systèmes de climatisation fabriqués après le 30 juin 2002 à l'exception des PAC et des systèmes réversibles.
- Interdiction à partir du 1^{er} janvier 2004. Pour les systèmes de climatisation réversibles fabriqués après le 30 décembre 2002.
- A partir du 1^{er} janvier 2010. L'utilisation des HCFC « neufs » est interdite pour la maintenance et l'entretien des équipements existants à cette date. Seul l'emploi des HCFC recyclés est toléré.
- A partir du 1^{er} janvier 2015. L'utilisation l'ensemble des HCFC est interdite.

Les appareils mis sur le marché doivent porter une plaque signalétique précisant la nature et la quantité du fluide frigorigène.

3.2. LES FLUIDES FRIGORIGENES UTILISES

La codification

La codification est numérique et se réfère à différents critères :

- formules chimiques pour les corps purs ;

- pour les mélanges azéotropes (série 500) ou zéotropes (série 400), la numérotation se base sur leur date d'apparition dans l'industrie frigorifique et de climatisation.

Pour les séries R10 à R50, R100, R200 :

- le chiffre des unités indique le nombre d'atomes de fluor
- le chiffre des dizaines indique le nombre d'atomes d'hydrogène plus un ;
- le chiffre des centaines indique le nombre d'atomes de carbone moins 1.
- Une lettre minuscule en fin de numérotation une asymétrie plus (b) ou moins (a) grande de la molécule.

Pour la série des R400 :

- ce sont des mélanges zéotropiques (présentent un glissement de température dans les zones de changement d'état).
- Les numérotations sont chronologiques par ordre d'enregistrement.
- Dans le cas de mélanges de corps purs identiques mais dans des proportions différentes, on associe une lettre majuscule (A,B,C) en fin de numérotation dans l'ordre chronologique d'apparition.

Pour la série des R500 :

- ce sont des mélanges azéotropiques ;
- les numérotations sont chronologiques par ordre d'enregistrement

Pour la série des R600 : cette série comprend les hydrocarbures. R600 : butane ; R600a : l'isobutane.

4. RELATION TEMPERATURE-PRESSION

Lorsqu'un fluide frigorigène est contenu dans un réservoir fermé (bouteille de charge, réservoir de liquide ou évaporateur), sa pression est fonction de sa nature et de sa température. A toute variation de température correspond une variation de pression, les deux variations ayant lieu dans le même sens.

A la même température, des fluides frigorigènes différents contenus dans des réservoirs fermés ne sont pas soumis à la même pression.