



A PPAREILS FRIGORIFIQUES - GENERALITES -

Introduction

De nombreux processus technologiques ont lieu à des températures inférieures à celles qui peuvent être obtenues lors du refroidissement naturel par l'eau ou par l'air.

Le refroidissement au-dessous de la température ambiante s'appelle refroidissement artificiel ou forcé. Pour obtenir un froid artificiel les installations frigorifiques utilisent des fluides à bas point d'ébullition sous pression relativement faible.

Il résulte du deuxième principe de la thermodynamique que, pour l'obtention artificielle du froid, il est nécessaire de fournir un travail permanent et d'assurer le transfert de chaleur du corps à refroidir vers l'atmosphère au moyen du fluide frigorigène.

Habituellement, les compresseurs à étages des groupes frigorifiques fonctionnent avec surchauffe des gaz lors de la compression et avec sous-refroidissement du liquide après la condensation.

Principe de fonctionnement

Soit une enceinte calorifugée A dans laquelle on veut maintenir une température très inférieure à la température ambiante. Dans cette enceinte est installé un tube appelé évaporateur comme le montre la figure 1 (tube en U). B est une bouteille contenant un fluide frigorigène dont la propriété essentielle est d'avoir une température d'ébullition très basse sous la pression atmosphérique. Une extrémité du tube en U plonge dans le liquide au fond de la bouteille, l'autre est ouverte à l'air libre. V est une vanne permettant de régler le débit.

1°) Si l'on ouvre la vanne V, le tube est à la pression atmosphérique et à la température de l'enceinte A. Celle-ci étant supérieure à la température d'ébullition du liquide frigorigène relative à cette pression, le liquide entre en ébullition. En traversant le tube en U, il se vaporise en empruntant sa chaleur de vaporisation à l'enceinte A. Si le débit assuré par la vanne de réglage est suffisant, la température de l'enceinte aura pour limite la température d'ébullition du liquide frigorigène sous la pression atmosphérique. Un manomètre et un thermomètre placés à la sortie de la vanne indiquent respectivement la pression atmosphérique et la température d'ébullition correspondante.

2°) Ajoutons au montage précédent un régulateur de pression R, comme le montre la figure 2. Si ce régulateur assure dans l'évaporateur une pression supérieure à la pression atmosphérique, mais telle que la température d'ébullition correspondante soit encore inférieure à la température de l'enceinte à refroidir, le liquide frigorigène entre encore en ébullition, mais à une température moins basse que précédemment.

3°) On désire maintenant récupérer le liquide frigorigène à l'aide d'une pompe dont on fera varier le débit, à l'aide de la vanne de réglage V, pour maintenir dans l'évaporateur la pression désirée (figure 3). Le liquide entre en ébullition à l'entrée de l'évaporateur et se transforme, à mesure qu'il traverse l'évaporateur, en vapeur saturée puis en vapeur sèche. Au bout d'un temps très court, le liquide se sera donc transformé en vapeur et il y aura absorption de chaleur de l'enceinte.

4°) Pour récupérer, dans la bouteille, le fluide frigorigène à l'état liquide, on refroidit la bouteille au moyen d'une circulation d'eau froide (figure 4).



- Schéma de principe -

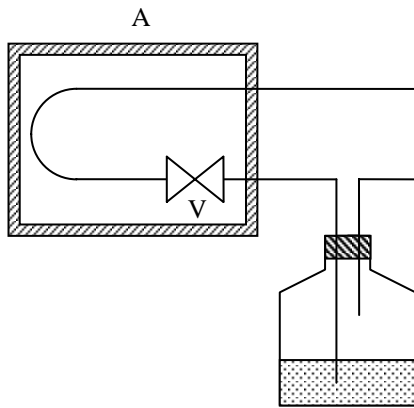


Fig. 1

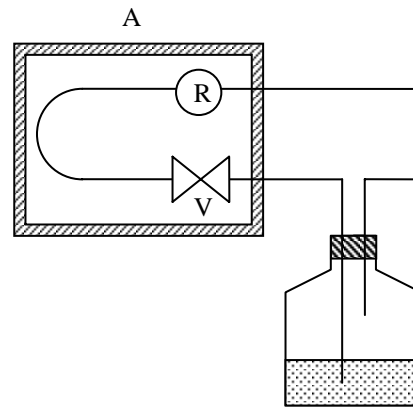


Fig. 2

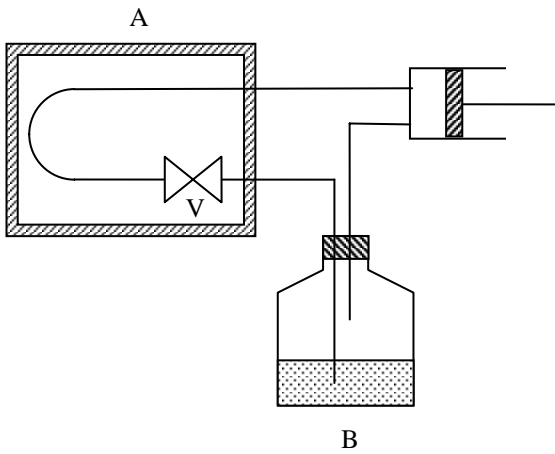


Fig. 3

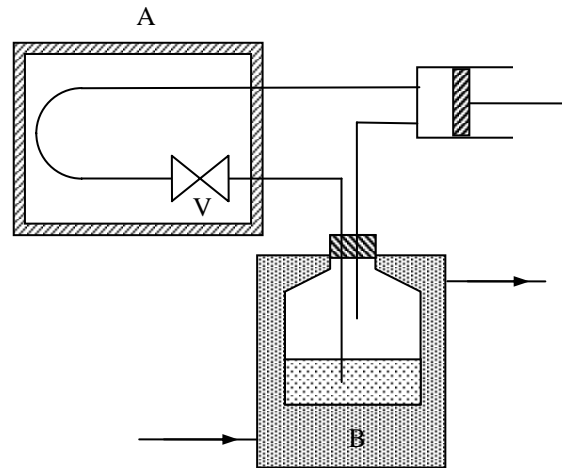


Fig. 4

- Allure du cycle effectué par le fluide frigorigène -

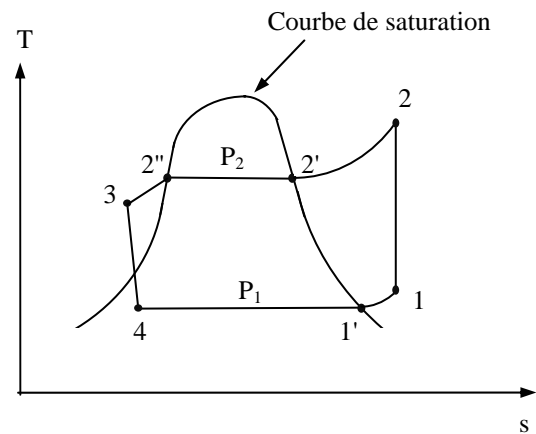
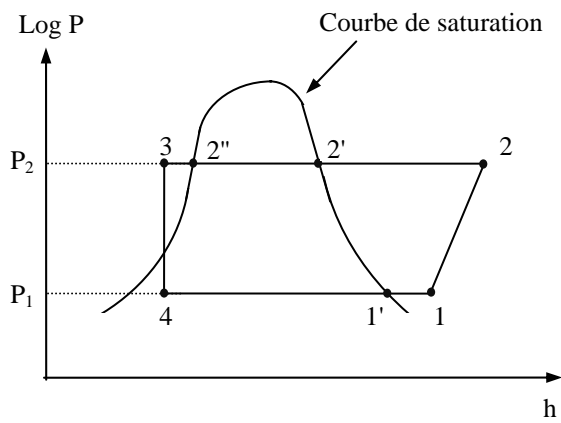


Fig. 5



Schéma & cycles de fonctionnement d'une installation frigorifique

Le figure 4 donne le schéma de l'appareil. La figure 5 montre le cycle de fonctionnement en coordonnées enthalpie massique - logarithme de la pression absolue, ainsi que le cycle en coordonnées entropie massique - température.

En 4, le fluide frigorigène sort du détendeur (vanne) et entre dans l'évaporateur. Il s'agit là d'un milieu diphasique (ébullition à la température t_4 sous la pression correspondante P_1).

De 4 à 1, le fluide évolue dans l'évaporateur successivement à l'état d'ébullition (4 à 1'), de vapeur saturée (1') , puis de vapeur sèche (1' à 1). On suppose que ces transformations ont lieu à pression constante (pertes de charge négligeables). Le travail est donc nul et la quantité de chaleur fournie au fluide par l'enceinte est :

$$q_{evap} = h_1 - h_4$$

De 1 à 2, la vapeur subit une compression supposée isentropique. D'une manière générale, nous pouvons écrire que :

$$w_{1-2} + q_{1-2} = h_2 - h_1$$

Mais la compression étant isentropique (adiabatique réversible) :

$$q_{1-2} = 0$$

Donc le travail peut s'exprimer par :

$$w_{1-2} = (h_2 - h_1)$$

En 2, la vapeur, par suite de la compression jusqu'à la pression P_2 , se trouve à la température de surchauffe t_2 dont la valeur dépend de la température d'ébullition t_4 et de la température de condensation t_3 .

De 2 à 3, le fluide évolue à pression constante P_2 et passe successivement de l'état de vapeur sèche 2 à l'état de vapeur saturante 2' et se condense de 2' à 2'' ($t_2 = t_2''$). Dans la canalisation allant du condenseur au détendeur, le liquide se refroidit de la température de condensation jusqu'à t_3 . Il n'y a pas de travail extérieur (pertes de charges négligeables). La quantité de chaleur enlevée au fluide frigorigène est donc :

$$q_{cond} = h_3 - h_2$$

De 3 à 4, le fluide se détend à travers la vanne (détendeur). Travail et chaleur sont nuls, donc l'enthalpie se conserve ($h_3 = h_4$).

Le «rendement thermodynamique» d'une installation frigorifique, est caractérisé par un coefficient \mathcal{E} appelé coefficient d'effet frigorifique, qui a pour expression :

$$\mathcal{E} = \frac{q_{evap}}{w} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$



Les qualités du fluide frigorigène

Les fluides frigorigènes ont pour rôle d'assurer les transferts de chaleur entre l'évaporateur et le condenseur de la machine. Ils évoluent cycliquement dans le circuit de la machine absorbant de la chaleur dans l'évaporateur et en cédant de la chaleur dans le condenseur.

Divers fluides frigorigènes sont utilisés dans l'application des machines frigorifiques et des pompes à chaleur, le choix du fluide étant effectué en tenant compte des problèmes thermiques particuliers ainsi que d'un certain nombre de critères : thermiques, physiques, chimiques et économiques.

I - QUALITES THERMIQUES

La chaleur enlevée à l'enceinte est égale à la chaleur de vaporisation du liquide frigorigène (chaleur latente entre 4 et 1') plus la chaleur à lui fournir pour le faire passer de la température d'ébullition à la température t_1 (chaleur sensible à l'état gazeux entre 1' et 1). Le fluide frigorigène devra donc posséder :

- une chaleur latente de vaporisation élevée.
- une forte chaleur spécifique à l'état vapeur.

II - QUALITES PHYSIQUES

Le fluide devra présenter en outre :

- une pression d'évaporation supérieure à la pression atmosphérique ce qui permet une détection plus aisée de fuites éventuelles et empêche l'air et l'eau de pénétrer dans le circuit.
- une faible température d'ébullition afin d'éviter d'installer un vide poussé pour obtenir l'ébullition.
- un faible volume spécifique de la valeur saturé, ce qui augmentera la production de frigories, pour un même volume de vapeur aspiré par le compresseur.
- une pression de condensation modérée ce qui assure une meilleure sécurité des joints dans la partie haute-pression et un meilleur rendement volumétrique du compresseur.
- une température critique élevée pour éviter l'emploi de récipients à parois épaisses.
- l'inflammabilité, l'inexplosibilité et la non toxicité.
- une température de refoulement du compresseur (caractéristique intrinsèque de chaque fluide pour des conditions de fonctionnement données) relativement basse pour une plus grande longévité du compresseur.

III - QUALITES CHIMIQUES

D'un point de vue chimique, le fluide devra :

- ne présenter aucune action corrosive sur les métaux employés.
- posséder des caractéristiques stables aux différentes températures auxquelles il est soumis.
- ne pas altérer les caractéristiques chimiques de l'huile de lubrification du compresseur.



I NSTALLATION FRIGORIFIQUE

I - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le schéma de principe de l'installation est présenté sur la figure 2 et l'évolution du fluide frigorigène est conforme à la description faite dans les généralités.

L'installation se compose :

- D'un compresseur .
- D'un moteur électrique d'entraînement.
- D'un condenseur.
- D'un détendeur.
- D'un évaporateur.

L'évaporateur peut être placé directement dans le local à refroidir, mais l'effet frigorigène peut aussi être réalisé par circulation d'un fluide secondaire (saumure) entre l'enceinte à refroidir et l'évaporateur.

L'évolution du fluide frigorigène se compose donc (figure 1) :

- D'une compression : 1-2 (rendement isentropique de compression η_{is})
- D'une condensation à pression constante : 2-3
- D'une détente isenthalpique : 3-4
- D'une évaporation à pression constante : 4-1

Suivant l'installation et le régime de fonctionnement choisi on peut observer les particularités suivantes :

1°) Le point 1 peut être situé sur la courbe de saturation ou à l'extérieur de celle-ci (cas représenté) la vapeur étant alors surchauffée.

2°) Le point 3 peut être situé sur la courbe de saturation ou dans la région liquide (cas représenté), il y a alors sous-refroidissement du fluide frigorigène.

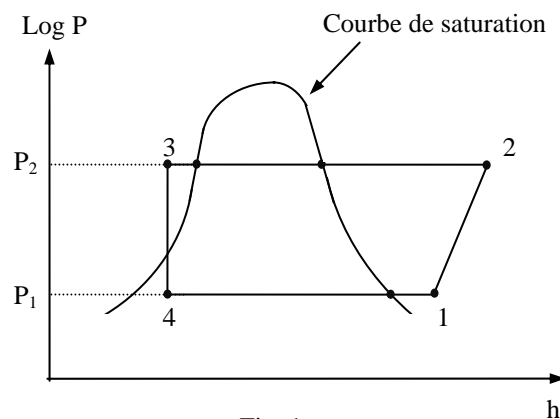
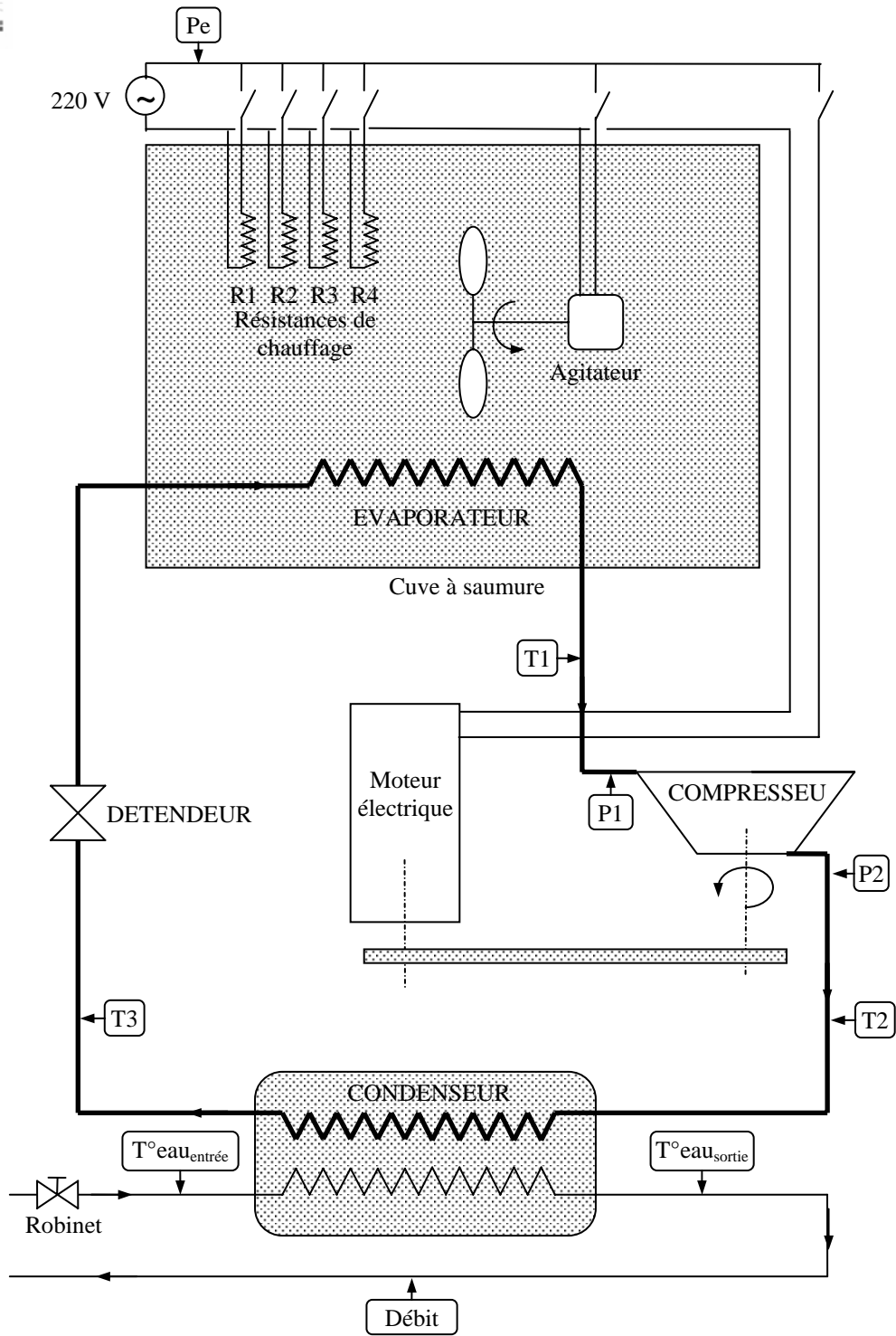


Fig. 1



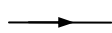


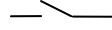
-  Circuit d'eau
-  Circuit de fréon
-  Point de mesure
-  Interrupteur

Fig. 2



II - COEFFICIENT D'EFFET FRIGORIFIQUE

On définit les coefficients suivants :

$$\varepsilon = \frac{Q_{4l}}{W_{12}} \quad \varepsilon_a = \frac{Q_{4l}}{W_a} \quad \varepsilon_g = \frac{\dot{m} \cdot Q_{4l}}{p_e}$$
$$\varepsilon_a = \varepsilon \eta_m \quad \varepsilon_g = \varepsilon \eta_g$$

- ε = Coefficient d'effet frigorigène du cycle.
- Q_{4l} = Chaleur absorbée par le fréon dans l'évaporateur.
- W_{12} = Travail réel de compression reçu par le fréon.
- W_a = Travail absorbé sur l'arbre du compresseur (travail nécessaire à son entraînement).
- \dot{m} = Débit massique du fluide frigorigène.
- p_e = Puissance électrique fournie au moteur d'entraînement.
- η_m = Rendement mécanique du compresseur.
- η_g = Rendement global de l'installation.

III - INSTALLATION ETUDIÉE

Le fluide frigorigène est du Fréon 12 (CF₂ CL₂). Le groupe a une puissance frigorigène de 2980 frigories (une frigorie = - 1 kcal) pour une température de - 10°C à l'évaporation et + 30°C à la condensation. Il est composé d'un compresseur à piston à deux cylindres absorbant une puissance de 3 ch. à 1450 t/mn.

Les résistances électriques plongées dans la saumure ont pour but de compenser la puissance frigorigène produite par le groupe et ainsi de maintenir la température du bain sensiblement constante durant la manipulation. L'agitateur a pour but d'homogénéiser la température du bain.

IV - MESURE & CALCUL DES PUISSANCES

Puissance électrique

La puissance électrique est consommée par le moteur entraînant le compresseur et par les quatre résistances réchauffant le bain. Le wattmètre donne la puissance globale consommée par l'installation. Pour effectuer la mesure séparée des puissances consommées par chaque appareil, on éliminera pendant un court instant, l'appareil du circuit.

Puissance sur l'arbre du compresseur

Les courbes de la figure 3 donnent la puissance mécanique absorbée par le compresseur en fonction des températures de saturation au condenseur et à l'évaporateur.

Puissance calorifique

La puissance calorifique produite peut être déterminée de la manière suivante :



$$\dot{Q}_{41} = \dot{m}_{ff} \cdot Q_{41}$$

Travail de compression

Le travail réel fourni par le compresseur au fluide frigorigène peut être calculé grâce à :

$$W_c = \frac{W_{cis}}{\eta_{is}}$$

Où :

- η_{is} est le rendement isentropique de compression déterminé à l'aide de la courbe de la figure 4.
- W_{cis} est le travail isentropique de compression mesuré sur le diagramme thermodynamique.

Débit d'eau et de fréon

Le débit d'eau est mesuré à l'aide d'un compteur volumétrique. Le débit de fréon est donné par :

$$\dot{m}_{ff} = \eta_{vo} \cdot \dot{m}_e$$

Où \dot{m}_e est le débit massique engendré à t_1 sous P_1 et :

$$\dot{m}_e = \frac{\dot{q}_{ve}}{v_1}$$

Où \dot{q}_{ve} est le débit volumique engendré aux conditions standards :

$$\dot{q}_{ve} = 8,850 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{donnée constructeur})$$

et v_1 (m^3/kg) est le volume massique à l'aspiration du compresseur (valeur fournie par le diagramme thermodynamique).

η_{vo} est le rendement volumétrique du compresseur. Sa valeur peut être obtenue à l'aide de la figure 4.

VII - RESULTATS DEMANDES

- Tracer sur le diagramme log p-H du Fréon 12 le cycle du fluide frigorigène.
- Calculer le débit massique de fréon traversant le compresseur.
- Calculer le travail W_c et en déduire la quantité de chaleur Q_{12} échangée.
- Déterminer la valeur des différents coefficients d'effet frigorifique de l'installation et la puissance frigorifique produite. Comparer cette puissance à celle déduite de la figure 3 (donnée constructeur).
- Faire le bilan thermique au niveau du condenseur et de l'évaporateur.
- Interpréter les résultats.



Nom(s) :

Date :

	T1 (° C)	T2 (° C)	T3 (° C)	P1 (bar)	P2 (bar)	T. eau entrée (° C)	T.eau sortie (° C)	Débit eau (l/s)
Point 1								
Point 2								

	P. élect. totale (Watt)	P. élect. moteur (Watt)	P. élect. agitateur (Watt)	P. élect. R1 (Watt)	P. élect. R2 (Watt)	P. élect. R3 (Watt)	P. élect. R4 (Watt)	
Point 1								
Point 2								

Fig. 3