

Initiations aux Machine frigorifique et pompe à chaleur :

Notions de base et définitions, composition et principe de fonctionnement

1. Généralités

La chaleur ne peut passer spontanément d'un corps froid vers un corps chaud selon le *second principe* de la thermodynamique. Si l'on veut effectuer le transfert de chaleur, dans le sens anti-naturel, d'un milieu froid à un milieu chaud, il faut, nécessairement, d'une part, mettre en œuvre un système thermique particulier et lui fournir de l'énergie. Ce système thermodynamique mis en œuvre est susceptible de prélever de la chaleur d'un milieu à température inférieure (source froide) et la transférer à un milieu à température supérieure (puits chaud).

Lorsque le but recherché est l'extraction de la chaleur d'un milieu pour le refroidir ou de le maintenir à une température inférieure à celle de l'ambiance, c'est à dire lorsqu'il s'agit de produire du froid, le système thermodynamique qui effectue cette opération prend naturellement le nom de *machine frigorifique*. L'effet utile est la chaleur extraite (ou froid produit) à la source froide.

Si, au contraire, le but recherché est la production de chaleur pour chauffer un milieu ou le maintenir à une température suffisamment haute à partir de chaleur gratuite récupérée à une température plus basse, le système en question est habituellement *pompe à chaleur*. L'effet utile est alors la chaleur rejetée au puits chaud.

Dans certains cas spécifiques, on peut utiliser à la fois le froid produit à la source froide et la chaleur rejetée au puits chaud. Un tel système est alors généralement appelé *thermofrigopompe*.

Pour alimenter le système thermodynamique, on utilise :

- Soit une énergie mécanique; le système comporte alors au minimum une source froide et un puits de chaleur ; il est dit, au moins, *ditherme*. Son schéma de principe est représenté sur la figure 1.1.
- Soit une énergie thermique, le système comporte alors au moins une source thermique supplémentaire, la *source de chaleur motrice*. Le système en question est alors, au moins, *tritherme*. Son schéma de principe est représenté sur la figure 2.1.

Le transfert de chaleur d'un milieu à basse température vers un milieu à température plus élevée nécessite la mise en œuvre :

- d'un phénomène endothermique, s'effectuant à la température T_E de la source froide pour extraire de la chaleur au milieu extérieur froid. Parmi ces phénomènes, on peut citer :
 - La fusion d'un solide
 - La vaporisation d'un liquide
 - La sublimation d'un solide
 - La détente d'un gaz comprimé
- d'un processus thermodynamique, pour augmenter le niveau thermique de cette chaleur de T_E à T_C . On peut citer comme exemple :
 - La compression d'un gaz
 - L'absorption d'un gaz par un liquide
 - L'adsorption d'un gaz par un solide

- d'un phénomène exothermique, s'effectuant à la température T_C du puits chaud pour rejeter la chaleur vers le milieu extérieur chaud, telle que la condensation d'une vapeur.

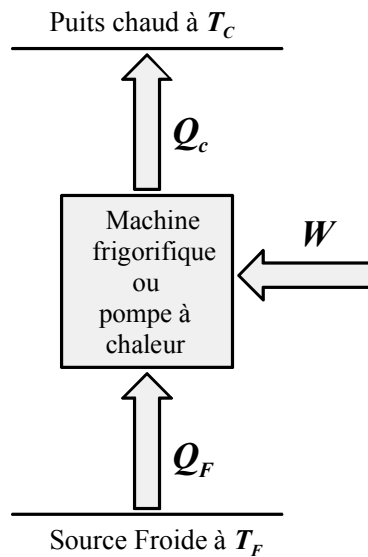


Figure 1.1. Schéma de principe d'un système ditherme.

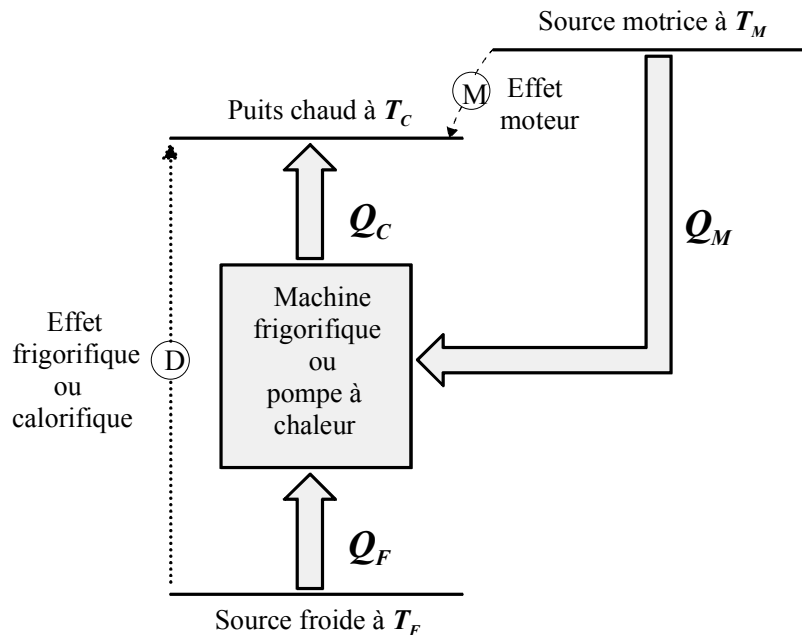


Figure 1.2. Schéma de principe d'un système tritherme.

Lorsque ces phénomènes s'effectuent simultanément dans les diverses parties du système, le déplacement de la chaleur est continu. S'ils s'effectuent séquentiellement (successivement), le déplacement de chaleur est discontinu ou intermittent.

Dans le système frigorifique, le frigorigène est le siège de ces phénomènes. Le frigorigène peut subir une transformation qui le laisse dans état final différent de l'état initial (transformation ouverte) ou bien une série de transformations qui le ramène périodiquement dans le même état (cycle frigorifique).

On se propose d'étudier, dans le cadre de ces travaux pratiques de thermodynamique appliquée, les cycles frigorifiques à compression mécanique de vapeur qui sont les plus répandus dans les domaines de réfrigération et de climatisation.

2. Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique à compression mécanique de vapeur

Une machine frigorifique à compression mécanique de vapeur (réfrigérateur ou pompe à chaleur) est une machine thermique ditherme (figure 1.1) opérant entre une source de chaleur froide et un puits de chaleur chaud, fonctionnant en régime inverse de celui des cycles motrices.

- Une quantité de chaleur Q_E est épuisée à la source de chaleur froide.
- Une quantité de chaleur Q_C est cédée au puits de chaleur chaud.
- Un travail mécanique W est absorbé par la machine pour accomplir le transfert de chaleur du milieu froid au milieu chaud.

Comme le montre la figure 1.3, une machine frigorifique fonctionne entre deux niveaux de pression, la basse pression ou pression d'évaporation (P_E) et la haute pression ou pression de condensation (P_C). Elle comporte quatre composants de base :

- Un **compresseur** dont le rôle est d'assurer un mouvement continu du fluide frigorigène et de le faire comprimer de la P_E (état 1) à la P_C (état 2).
- Un **détendeur** (valve d'expansion) dont le rôle est de régler le débit du réfrigérant circulant dans l'installation et assurer la détente du réfrigérant entre l'état 3 et l'état 4.

Ces deux organes maintiennent les deux niveaux de pression P_E et P_C dans le circuit frigorifique.

- Un **évaporateur** placé dans l'enceinte à refroidir pour assurer l'épuisement de la quantité de chaleur Q_E qu'on appelle **production frigorifique**. Le fluide frigorigène, à température plus basse que celle de la source froide, s'évapore en absorbant la **chaleur latente** nécessaire de la source froide.
- Un **condenseur** placé dans le milieu auquel on désire céder la quantité de chaleur Q_C . Le réfrigérant, à une température plus haute que celle de la source chaude, se condense en livrant sa chaleur latente à la source chaude.

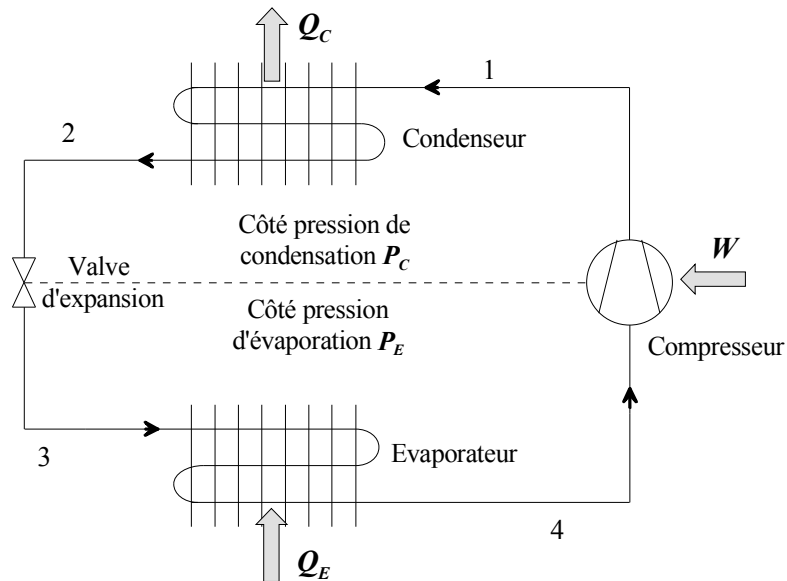


Figure 1.3. Principe de fonctionnement d'une machine frigorifique à compression de vapeur.

3. Composants d'un circuit frigorifique

Pour illustrer la composition d'un circuit frigorifique et le rôle de chaque composant, on représente sur la figure 1.4 l'exemple d'une installation commerciale comportant deux évaporateurs l'un desservant une chambre de congélation à -20°C et l'autre une chambre froide à $+5^{\circ}\text{C}$. Les éléments de base sont les évaporateurs **A** et **B**, le compresseur **C**, le condenseur **D** et les détendeurs thermostatiques **TE**. L'installation comporte en plus un réservoir de liquide **E**.

A sa sortie du réservoir de liquide, le fluide frigorigène traverse un *filtre déshydratant* **DX** ainsi qu'un *voyant de liquide* **SGI**. Un *robinet* **BM** d'isolement manuel placé de chaque côté du filtre permet son remplacement.

On trouve une *électrovanne* **EVR** commandée par un *thermostat* **KP 61** en amont de chaque détendeur **TE**. Le thermostat a pour rôle d'ouvrir ou de fermer l'électrovanne en fonction de la température détectée par le *capteur* **F**.

Un *clapet de non-retour* **NRV** est placé sur la conduite d'aspiration venant de l'évaporateur le plus froid. Ce clapet permet d'éviter que le fluide frigorigène ne refoule dans cet évaporateur pendant les périodes d'arrêt du compresseur.

Un *régulateur de pression d'évaporation* **KVP** est monté sur la conduite d'aspiration venant de l'évaporateur **B**. Le rôle de ce régulateur est de maintenir une pression d'évaporation constante correspondant à une température située 8 à 10°C en dessous de la température requise pour la chambre froide.

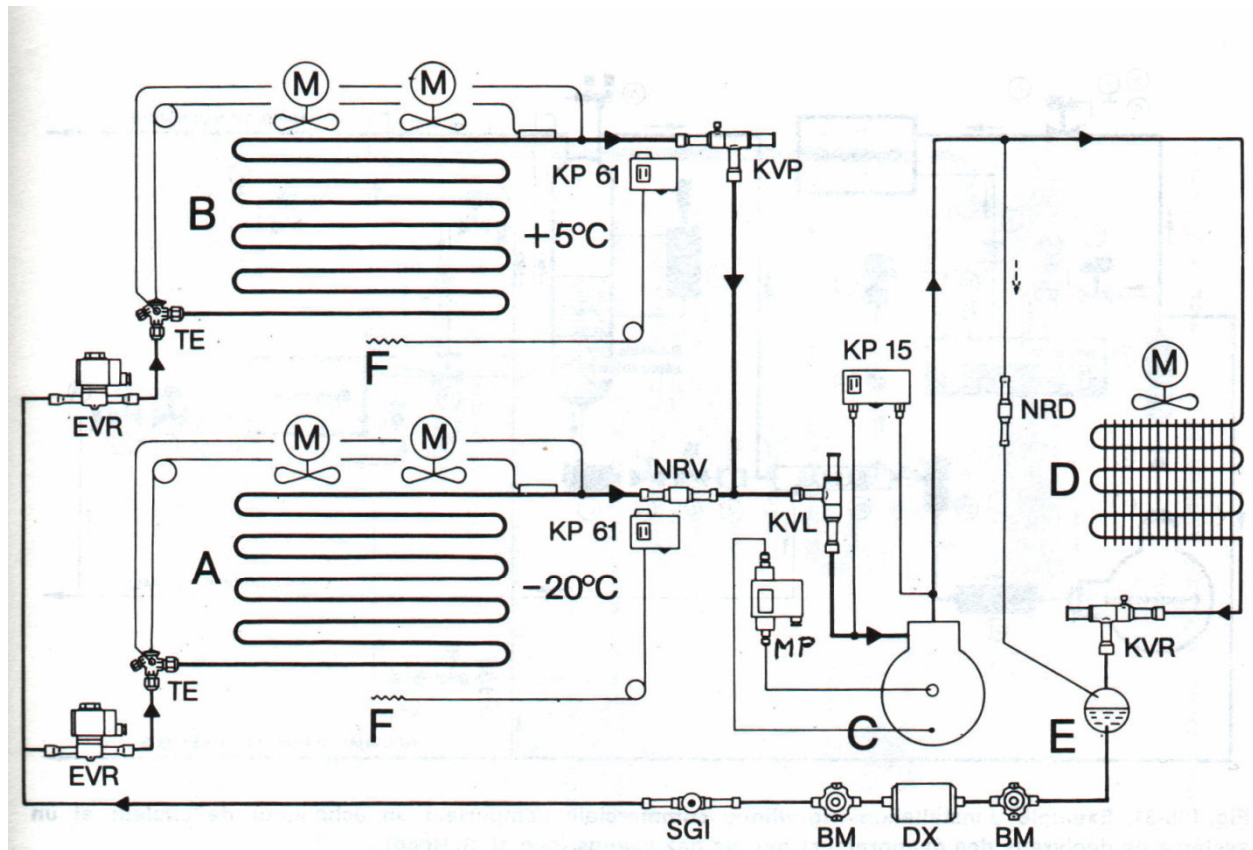


Fig. 136-30. Exemple d'installation frigorifique commerciale comportant deux évaporateurs desservant l'un A une chambre de congélation à - 20 °C et l'autre B une chambre froide à + 5°C (doc. Danfoss)
C compresseur ; **D** condenseur ; **E** réservoir de liquide ; **TE** détendeur ; **DX** filtre déshydrateur ; **SGI** voyant de liquide ; **BM** robinet manuel d'isolement ; **EVR** électrovanne ou robinet magnétique ou robinet solénoïde ; **KP 61** thermostat ; **NVR** clapet de non-retour ; **KVP** régulateur de pression d'évaporation ; **KVL** régulateur de démarrage ; **MP** pressostat différentiel ; **KP 15** régulateur combiné haute pression/basse pression ; **KVR** régulateur de pression de condensation ; **NRD** vanne à pression différentielle ; **M** moteurs des ventilateurs des évaporateurs.

Figure 1.4. Exemple de machine frigorifique commercialisée avec ses divers composants.

En amont du compresseur, on trouve un *régulateur de démarrage KVL* qui assure la protection du moteur du compresseur contre toute surcharge au démarrage.

Le *pressostat différentiel MP* arrête le compresseur si la pression d'huile n'est pas suffisante.

Le *pressostat KP 15* est une régulation combinée haute pression/basse pression qui protège l'installation contre une pression d'aspiration trop faible et une pression de refoulement trop haute au compresseur.

Enfin, comme la pression dans la conduite de refoulement doit être suffisante dans toutes les conditions de fonctionnement pour que le fluide frigorigène parvienne bien au détendeur, on prévoit un *régulateur de pression de condensation KVR* et une vanne à pression différentielle **NRD**.

4. Cycle frigorifique dans le diagramme enthalpique

Les cycles frigorifiques sont, le plus souvent, représentés sur le diagramme (H - $\ln P$). Sur la figure 1.5, on représente les différentes évolutions thermodynamiques à un paramètre constant dans le diagramme enthalpique (isotherme, isobare, isochore, etc...).

La figure 1.6 schématise le cycle d'une machine frigorifique au réfrigérant R22 fonctionnant entre les pressions $P_E = 2.9$ bar et $P_C = 11.9$ bar. Le condenseur est refroidi à l'eau. Les températures d'évaporation et de condensation correspondantes sont respectivement -15°C et 30°C . La compression est supposée isentropique (adiabatique et réversible).

Les différents points de l'installation sont définis comme suit :

- 1 : aspiration compresseur
- 2 : refoulement compresseur
- 1-2 : compression
- 3 : entrée condenseur
- 2-3 : désurchauffe initiale à l'air ambiant
- 4 : débit de condensation
- 3-4 : désurchauffe complémentaire
- 5 : fin de condensation
- 4-5 : condensation
- 6 : sortie condenseur
- 5-6 : sous-refroidissement initial
- 7 : entrée détenteur
- 6-7 : sous-refroidissement complémentaire
- 8~9 : entrée évaporateur
- 10 : fin d'évaporation
- 9-10 : vaporisation
- 11 : sortie évaporateur
- 10-11 : surchauffe à l'évaporateur
- 11-1 : surchauffe dans la tuyauterie d'aspiration

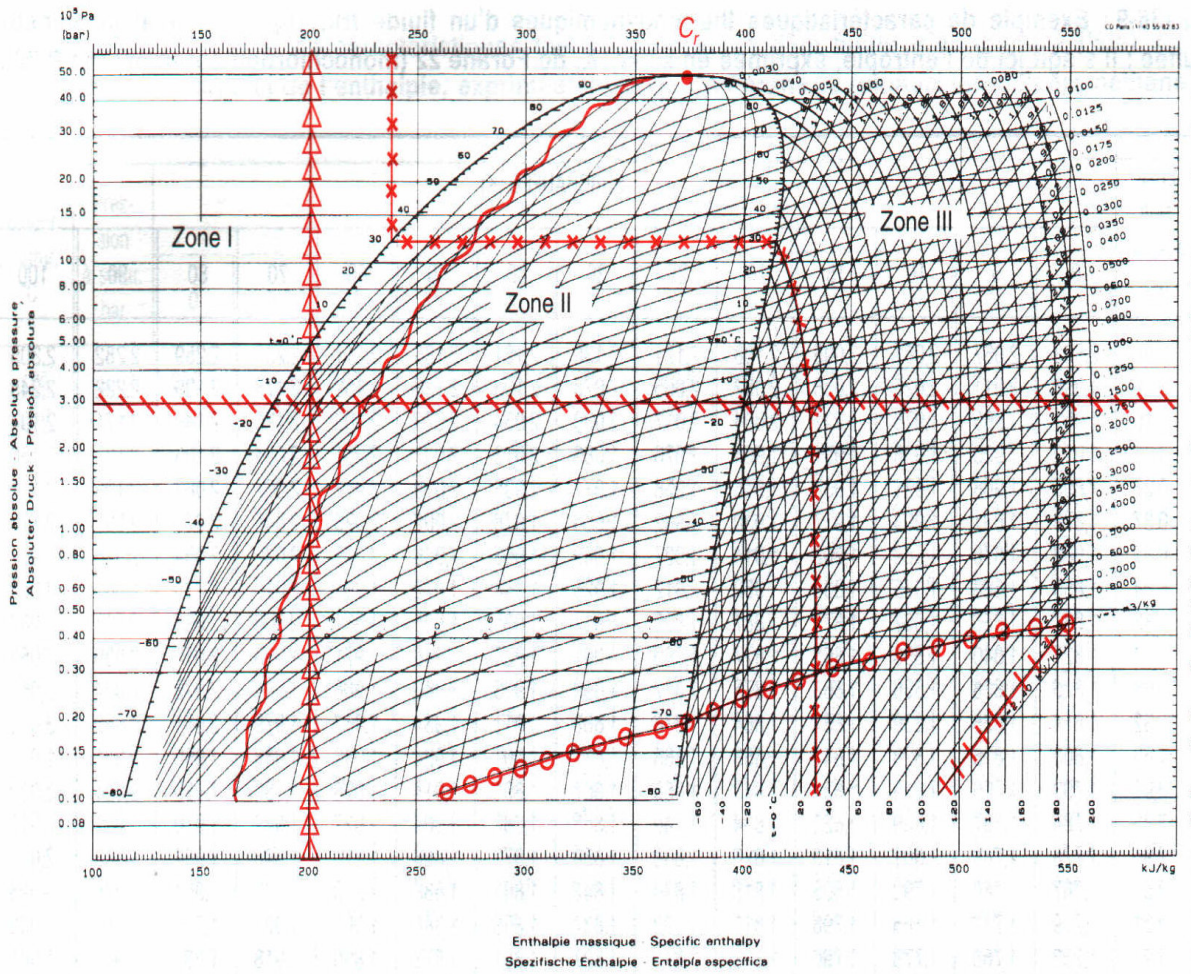


Fig. 136-99. Interprétation d'un diagramme $h, \lg p$.

- $\dashv\dashv\dashv\dashv\dashv\dashv$ courbe à pression absolue constante (isobare $p = 3$ bar sur la figure) ;
- $\times \times \times \times \times \times \times$ courbe à température Celsius constante (isotherme $t = + 30^\circ \text{C}$ sur la figure) ;
- \sim courbe à titre en vapeur constant (isotitrique $x = 0,2$ soit 20 % de vapeur et 80 % de liquide sur la figure) ;
- $\triangleleft \triangleleft \triangleleft \triangleleft \triangleleft \triangleleft \triangleleft$ courbe à enthalpie constante (isenthalpe ou adiabate $h = 200$ kJ/kg sur la figure) ;
- $+++++$ courbe à entropie constante (isentrope $s = 2,38$ kJ/kg · K sur la figure) ;
- $\circ \circ \circ \circ \circ \circ \circ$ courbe à volume massique constant (isochore $v = 1$ m³/kg sur la figure) ;
- Zone I** zone de fluide frigorigène homogène (liquide) ;
- Zone II** zone de fluide frigorigène hétérogène (liquide + vapeur) ;
- Zone III** zone de fluide frigorigène homogène (vapeur surchauffée) ;
- Cr** point critique.

Figure 1.5. Diverses transformations thermodynamiques dans le diagramme ($h, \ln p$).

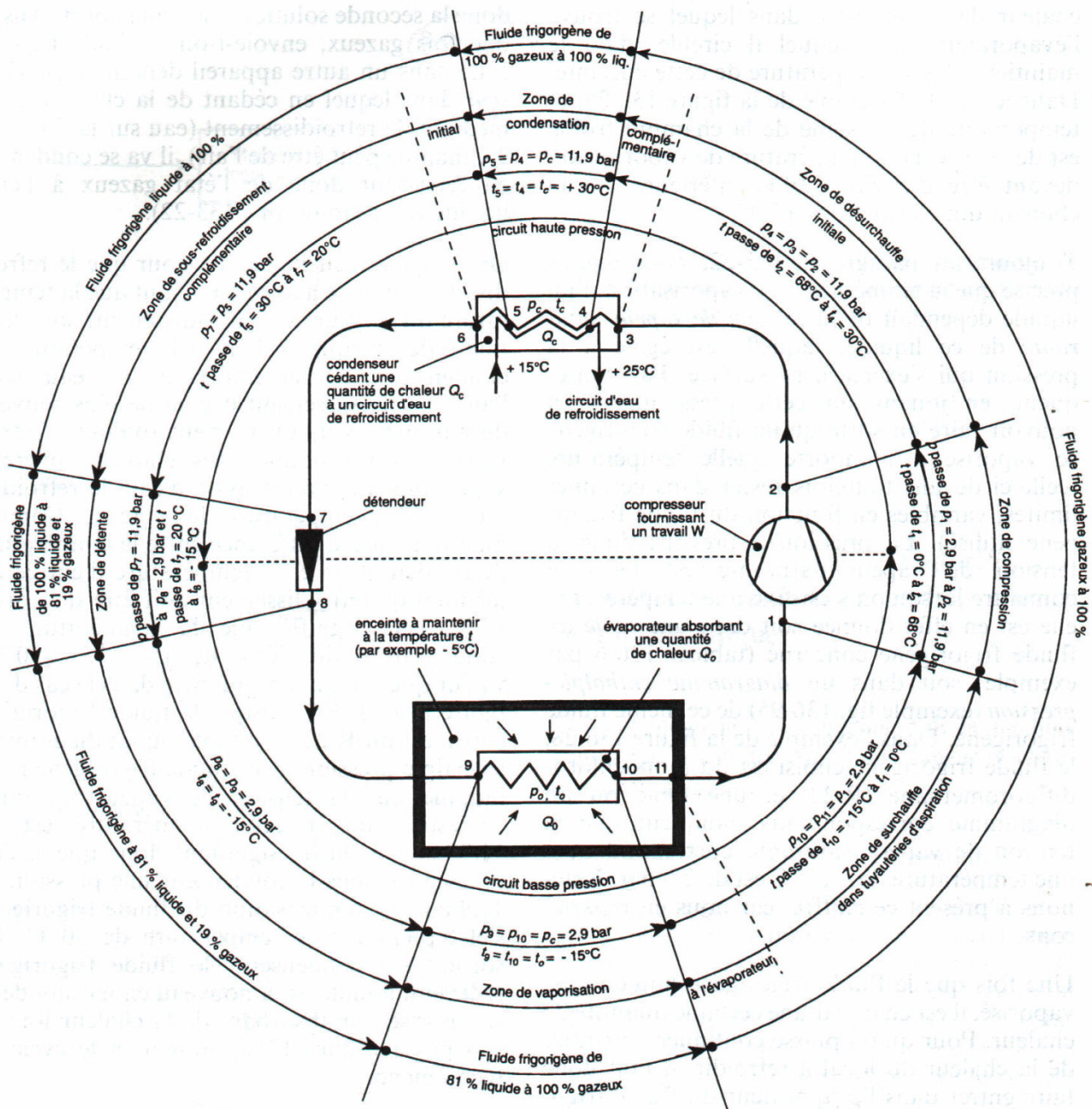


Fig. 136-28. Schéma de principe d'une machine frigorifique élémentaire à compression d'une vapeur et changement de phase avec exemple d'évolution simplifié (on n'a pas tenu compte par exemple des pertes de charge dans les tuyauteries) des pressions et des températures du fluide frigorigène (il s'agit dans cet exemple de R 22).

Figure 1.6. Schéma de principe d'une machine frigorifique à compression de vapeur.