



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

COURS-RESSOURCES

Pompe à chaleur, que dois-je savoir ?

Objectifs :

- CO1.1 Justifier les choix des matériaux, des structures d'un système et les énergies mises en oeuvre dans une approche de développement durable
- CO2.1 Identifier les flux et la forme de l'énergie, caractériser ses transformations et/ou modulations et estimer l'efficacité énergétique globale d'un système
- CO2.2 Justifier les solutions constructives d'un système au regard des impacts environnementaux et économiques engendrés tout au long de son cycle de vie
- CO3.2 Evaluer la compétitivité d'un système d'un point de vue technique et économique

INTRODUCTION

- I.1 LE MARCHÉ DE LA PAC EN FRANCE
- I.2. L' ASSOCIATION FRANÇAISE DE LA POMPE A CHALEUR

II. ETUDE DE LA POMPE A CHALEUR

- II.1 PRINCIPE DE BASE
- II .2 NOTION DE BASE
- II.3 LA RELATION PRESSION TEMPERATURE D'UN CHANGEMENT D'ETAT
- II.4 LA RELATION PRESSION-TEMPERATURE DANS UNE BOUTEILLE DE FLUIDE FRIGORIGENE
- II.5 PRODUCTION DE FROID PAR DETENTE ET EVAPORATION D'UN FLUIDE FRIGORIGENE
- II.6. LE DIAGRAMME ENTHALPIQUE- LE CYCLE THERMODYNAMIQUE

III LA POMPE A CHALEUR

- III.1 VUE D'ENSEMBLE D'UNE POMPE A CHALEUR AIR/EAU
- III.2. PRESENTATION
- III.3. LES ELEMENTS D'UNE PAC AIR/EAU
- III. 4 LES VALEURS DE REFERENCE
- III.5 LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE PAC

IV. DESCRIPTION DES SYSTEMES

- IV.1. LES PAC GEOTHERMALES (pompes à chaleur avec capteur enterré (sol-sol ; sol-eau ; eau glycolée-eau)
- IV.2. LES PAC dont la source froide est l'air extérieur (Aérothermie)
- IV.3. AUTRES SYSTEMES

V.REGULATION DES POMPES A CHALEUR

- V.1 MODES DE FONCTIONNEMENT
- V.2 ASPECTS SPECIFIQUES AUX SYSTEMES DE POMPES A CHALEUR

VI. REGULATION

- VI.1 LA LOI D'EAU

I. INTRODUCTION

I.1 LE MARCHE DE LA PAC EN FRANCE

Le marché de la pompe à chaleur connaît, en France comme en Europe, un fort développement.

En France, le développement de l'offre produits, associé au programme EDF de développement des PAC dans le cadre général de son offre commerciale *Vivrelec*, a dynamisé très fortement le marché.

Celui-ci d'environ 1 500 réalisations par an avant 1997 a atteint environ 69900 PAC en 2007, hors systèmes Air/Air.

I.2. L' ASSOCIATION FRANÇAISE DE LA POMPE A CHALEUR

Pour conforter cette dynamique, il est en effet apparu nécessaire, aux acteurs en place, de coordonner et de renforcer les efforts engagés par les membres de la filière et de fédérer les intervenants autour d'objectifs qualitatifs communs. **L'AFPAC a donc été créée en 2002.**

Elle s'est donnée pour objectifs :

- d'assurer la promotion et le développement des pompes à chaleur,
- de développer la coordination et l'animation d'échanges scientifiques et techniques
- de faciliter les relations avec toutes les entités ayant une activité dans le domaine des pompes à chaleur tant en France qu'en Europe ;
- de suivre les travaux de normalisation et certification français et européens sur les pompes à chaleur et les systèmes les utilisant.

Les actions ont d'abord été tournées vers la qualité, point de départ de la satisfaction du client et enjeu majeur. Ainsi les règles de dimensionnements et de mise en œuvre ont été mises à jour. Aujourd'hui, les efforts se portent sur la formation des installateurs, la mise en place **d'une charte qualité (Qualipac)** et la mise en place d'une marque **NF Pompe à Chaleur**.

1. La charte qualité Qualipac

Qualipac est une appellation de confiance créée par l'AFPAC en 2007 avec le soutien de l'ADEME et d'EDF. Elle a pour but de faciliter la mise en relation des particuliers et des installateurs spécialistes de la pompe à chaleur.

L'AFPAC, propriétaire de la l'appellation « QUALIPAC » accorde le droit d'utilisation de cette appellation aux entreprises d'installation suivant des critères fixés dans un règlement d'usage de la marque.

2. La marque NF PAC

La marque « NF PAC » est une marque volontaire, délivrée par l'AFAQ-AFNOR Certification, permettant de vérifier la conformité des pompes à chaleur aux différentes normes en vigueur, françaises, européennes et internationales ainsi que le respect des performances minimales fixées par les membres du Comité particulier de la marque NF-PAC au travers du Référentiel.

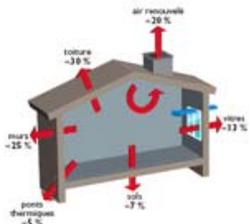
Elle couvre les différentes pompes à chaleur aérothermiques et géothermiques de puissance calorifique inférieure ou égale à 50 kW.

Pour ces différents produits, elle certifie les paramètres suivants :

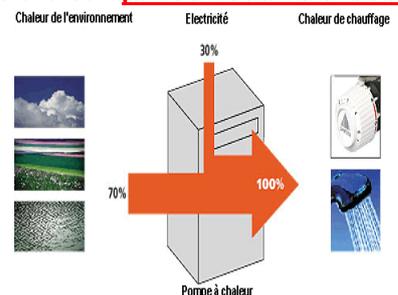
- Les coefficients de performance (COP) avec un seuil minimum pour différents points de fonctionnement ;
- La puissance thermique ;
- Le niveau de puissance acoustique.

II. NOTIONS PREALABLES**II.1 INTRODUCTION**

Le terme pompe à chaleur vient très probablement de sa comparaison avec la pompe à eau. Effectivement, le rôle d'une pompe à eau est de transférer une masse d'eau d'un niveau bas vers un niveau plus élevée. La pompe à chaleur a également pour rôle de transférer une quantité de chaleur d'un niveau bas en température vers un niveau plus élevé.

	<i>hydraulique</i>	<i>Thermique</i>
Écoulement naturel	<p>L'eau coule naturellement d'une certaine altitude à une altitude plus faible</p> 	<p>La chaleur va du chaud (température élevée) vers le froid (température plus faible)</p> 
Écoulement contraire forcé	<p>Il faut une pompe hydraulique pour faire monter de l'eau</p> 	<p>Il faut une pompe à chaleur pour faire monter le niveau de température d'une source froide</p>

La pompe à chaleur se distingue des autres systèmes de production de chaleur **par son coefficient de performance (COP)**. Effectivement, le principe est de récupérer un maximum de chaleur à l'environnement afin de réduire les consommations d'énergie .



$$COP = \frac{\text{Energie Utile}}{\text{Energie Consommée}} = \frac{100 \%}{30 \%} = 3,3$$

Pour atteindre de telles performances, nous faisons appel à un système dit "**thermodynamique**". En quelques mots, **nous allons utiliser un fluide qui à la particularité d'absorber et de restituer beaucoup de la chaleur lors de ses changements d'état.**

II.2 NOTION DE BASE

2.1 Notion de température

La notion de température a son origine dans les sensations du corps humain. Ainsi un objet nous paraît chaud ou froid si en le touchant, nous avons **l'impression** qu'il nous communique de la chaleur ou qu'il nous en enlève. Cette notion est inséparable de celle de chaleur. En conclusion, la température caractérise, sous forme de " niveau " , l'action plus ou moins énergétique de la chaleur sur nos sens. Elle est donnée en ° Celsius

Echelle Celsius

Celsius a choisi deux phénomènes physiques qui se produisent à température constante à la pression atmosphérique. Ces deux phénomènes appelés points fixes de l'échelle thermométrique sont

La glace fondante

L'eau bouillante à pression atmosphérique

2.2 Notion de pression

La pression est le rapport de la force exercée sur une surface.

$$p = \frac{F}{S}$$

Unité de pression

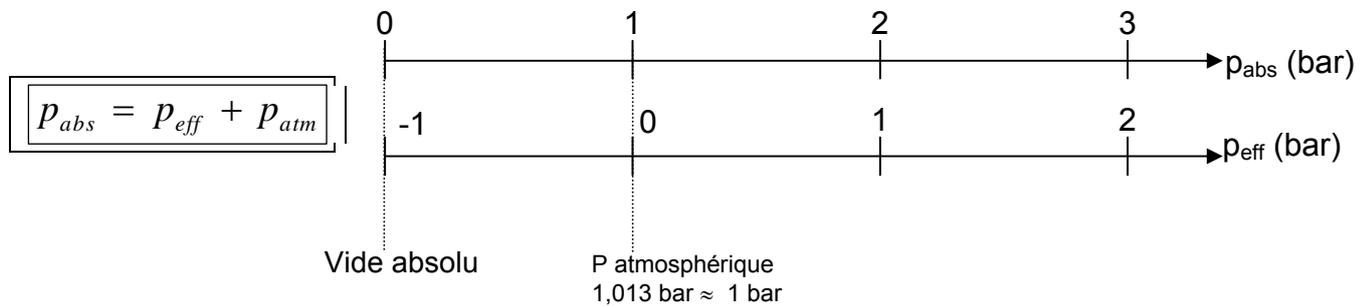
L'unité légale est le Pascal (Pa) qui correspond à une force de 1 Newton exercée sur une surface de 1m²
Certains manomètres sont gradués en kPa

L'unité usuelle est le bar qui correspond à une force exercée par masse de 1kg (environ 10N) sur une surface de 1 cm²

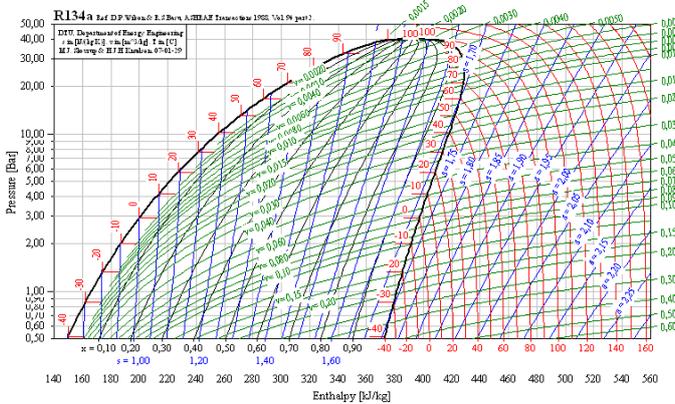
Pression atmosphérique : C'est la pression exercée sur la surface de tous les corps par la couche gazeuse qui constitue l'atmosphère.

Pression relative - Pression absolue

La pression relative est mesurée à partir de la pression atmosphérique (dans ce cas Patm est pris égal à 0)
La pression absolue est mesurée à partir du vide absolu (pression la plus basse qui existe) dans ce cas patm = 101325 Pa

Pression absolue - Pression effective (ou relative)

Les diagrammes utilisent souvent la pression absolue :

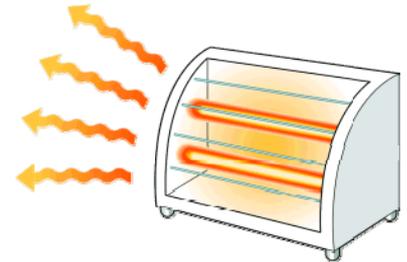


Les manomètre pression relative (ou effective) :

2.4 Transfert de chaleur

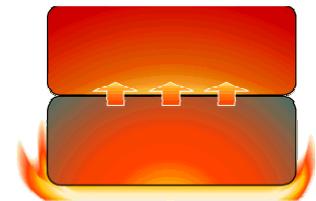
2.4.1 Le rayonnement

Tout corps à une température supérieure à 0 **kelvin** (zéro absolu, soit -273,15°C) émet un rayonnement électromagnétique appelé rayonnement thermique. L'énergie absorbée est convertie en énergie thermique et contribue à l'augmentation de la température de ce corps.



2.4.2 La conduction

Par le transfert de chaleur entre les parties d'une substance ou d'une substance à une autre par un contact direct.



2.4.3 La convection

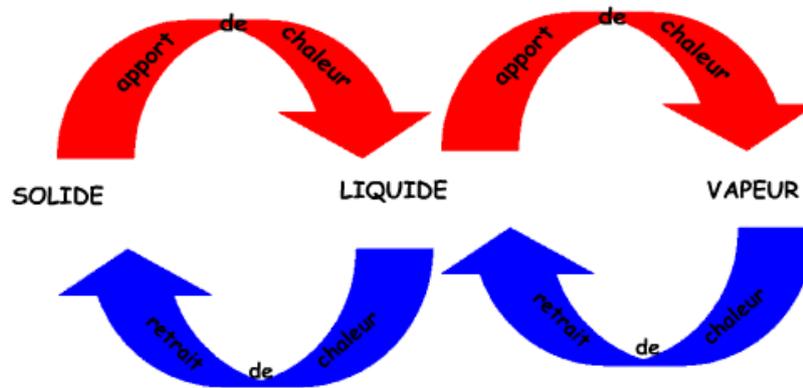
Transfert de chaleur par le mouvement d'un fluide (c'est-à-dire un gaz ou un liquide). le mouvement de ce fluide peut être dû à une différence locale de masse volumique, résultat d'une différence de température



2.4.4 « Second principe de la Thermodynamique »

La chaleur va toujours d'une source plus chaude vers une source moins chaude. En réalité, les molécules les plus actives transfèrent de leur énergie aux molécules moins actives. Ainsi, les molécules les plus actives ralentissent légèrement et les moins actives accélèrent.

2.5 Changement d'état

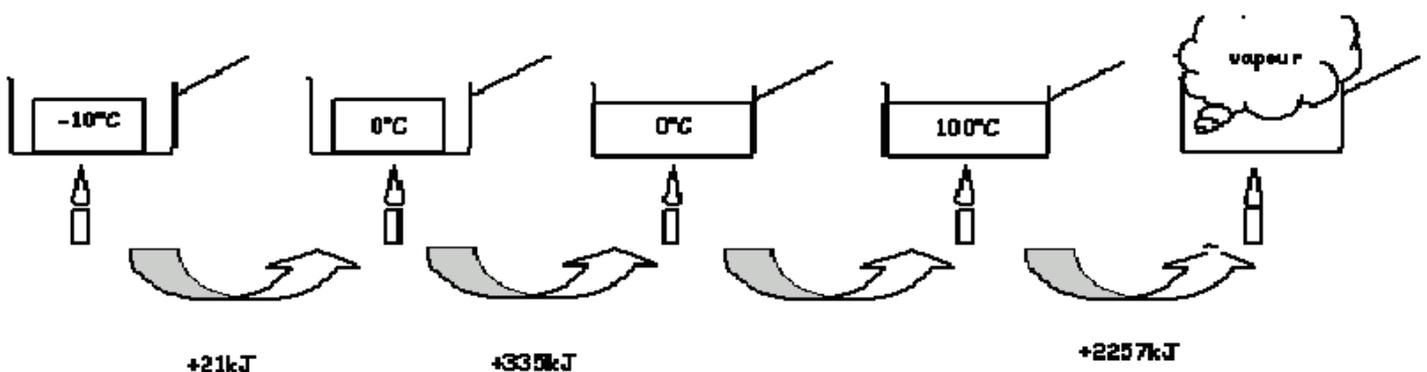


La chaleur peut être transmise d'un corps à un autre par différents processus.

2.6 Notion de chaleur sensible et latente.

La chaleur apparaît comme une notion quantitative. Un contact plus ou moins long avec un corps chaud nous cède une certaine quantité de chaleur, celle-ci dépend de la durée de contact. Quelle que soit sa température, un élément contient toujours une certaine quantité de chaleur. Il ne contient plus de chaleur, seulement lorsque la température atteint le zéro degré absolu soit -273.15°C qui équivaut au 0 de l'échelle Kelvin. En conclusion, le froid n'existe donc pas ; pour refroidir un corps nous sommes bien évidemment obligés de lui retirer de la chaleur.

Exemple : 1 kg d'eau à pression atmosphérique



Evolution de la température en fonction des quantités de chaleur

a) Chaleur sensible

Quand un corps est chauffé, sa température augmente au fur et à mesure que la chaleur augmente. L'augmentation de chaleur est appelée «chaleur sensible».

De façon similaire, quand on refroidit un corps, et que sa température diminue, cette chaleur est aussi appelée «chaleur sensible».

" La chaleur sensible représente la chaleur qui provoque un changement de température dans un corps."

b) Chaleur latente

La chaleur qui provoque le changement d'état d'un corps pur est appelée «**chaleur latente**».

Cependant, la chaleur latente n'affecte pas la température d'un corps, par exemple, l'eau reste à 100°C pendant qu'elle bout. La chaleur apportée pour que l'eau continue de bouillir est de la chaleur latente.

La chaleur latente est la chaleur qui provoque un changement d'état sans pour autant provoquer un changement de température.

La compréhension de cette différence entre la chaleur sensible et la chaleur latente est fondamentale pour comprendre pourquoi un réfrigérant est utilisé dans un système de réfrigération ou de climatisation

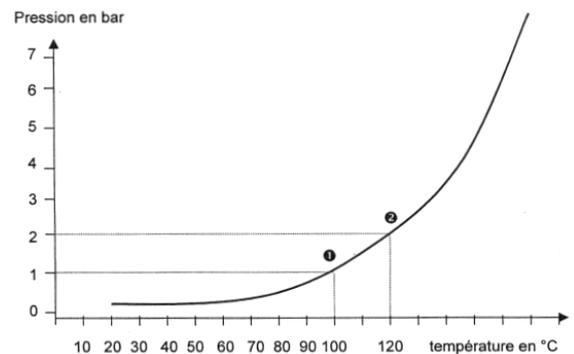
II.3 LA RELATION PRESSION TEMPERATURE D'UN CHANGEMENT D'ETAT

3.1 Relation pression température

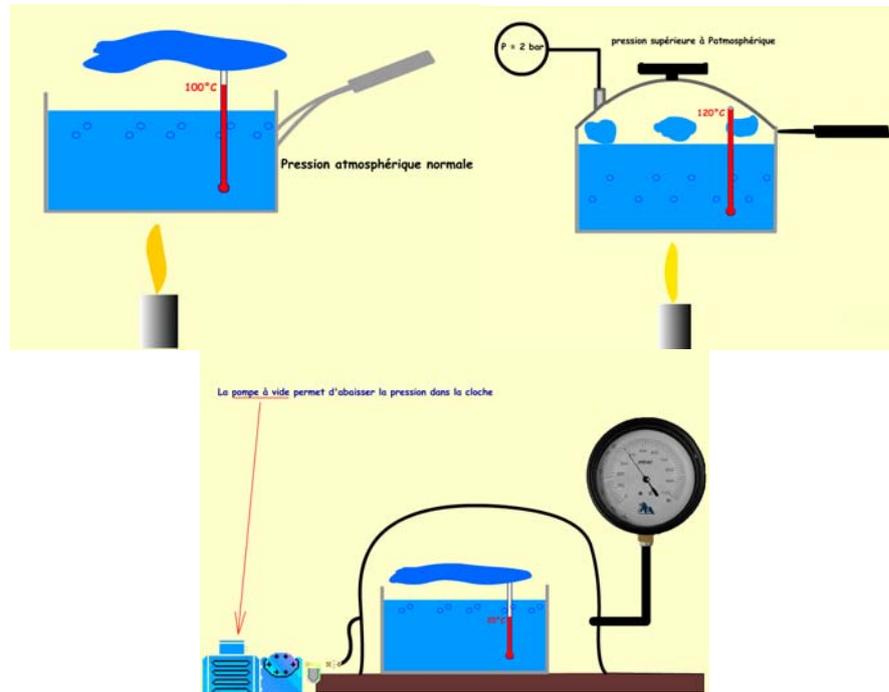
Prenons l'exemple de l'eau

Tout le monde sait que l'eau bout à +100°C, sous une pression égale à la pression atmosphérique au niveau de la mer. Si la pression varie, automatiquement la température d'ébullition varie dans le même sens. Nous pouvons, ainsi, en réalisant une expérience assez simple, mettre en évidence une relation incontournable pour les frigoristes, qui s'appelle "**la relation pression température**".

A titre informatif, vous trouverez sur le diagramme ci-dessous la relation pression-température de l'eau, c'est à dire la température d'évaporation de l'eau en fonction de la pression externe.



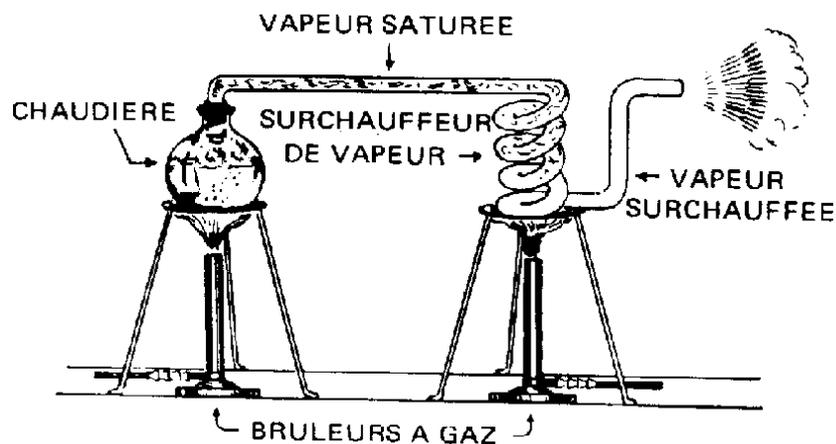
3.2 Expérience



3.3 Notion de surchauffe et de sous-refroidissement

3.3.1 La surchauffe

Expérience:



L'expérience se déroule à la pression atmosphérique normale, dans ces conditions l'eau bout à 100°C. Dans la chaudière l'eau est en ébullition, on dit que la vapeur est *saturante*, car elle est à la température d'ébullition.

Dans le serpentin la vapeur est *surchauffée* car elle est à une température supérieure à la température d'ébullition. Si dans le serpentin la vapeur est à 115°C, la surchauffe est alors $115 - 100 = 15^\circ\text{C}$.

Surchauffe = température vapeur surchauffée - température de changement d'état
(la surchauffe s'exprime en °C ou en K)

3.3.2 Le sous-refroidissement

A pression atmosphérique normale l'eau bout à 100°C.

Si l'eau est à une température inférieure (ex : eau du robinet), on dit qu'elle est sous-refroidie

Exemple si l'eau du robinet est 20°C on peut dire qu'elle est sous-refroidie de $100-20^{\circ}\text{C}=80^{\circ}\text{C}$

Sous refroidissement = température de changement d'état - température du liquide

Conclusion : Un fluide est soit sous-refroidi si sa température est inférieure à la température d'ébullition (état liquide), soit saturant s'il est à la fois liquide et vapeur, soit surchauffé si sa température est supérieure à la température de saturation (gazeux)

II.4 LA RELATION PRESSION-TEMPERATURE DANS UNE BOUTEILLE DE FLUIDE FRIGORIGÈNE

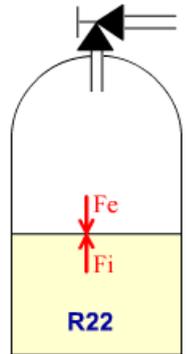
4.1 Analyse des forces mises en jeu dans une bouteille de fluide frigorigène

Dans une bouteille de fluide frigorigène, par exemple, la surface du fluide est soumise à l'action de deux forces :

- ☞ F_e = c'est la force externe exercée par la vapeur de fluide frigorigène sur la surface du liquide
- ☞ F_i = c'est la force interne exercée par le liquide sur sa surface

Le fluide frigorigène établit un équilibre entre ses 2 forces. C'est à dire qu'il essaie de maintenir

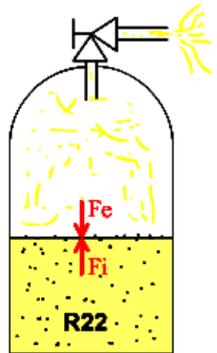
$$F_e = F_i.$$



En ouvrant la vanne de la bouteille, des vapeurs s'échappent. La pression exercée par ces vapeurs sur la surface du liquide diminue.

La force F_e qu'elle engendre diminue aussi. Elle devient alors inférieure à F_i .

Le fluide frigorigène se met à bouillir afin de fournir des vapeurs pour rétablir l'équilibre naturel. Malheureusement, comme les vapeurs s'échappent de la bouteille, l'ébullition du liquide ne permet pas de rétablir l'équilibre...



Ainsi, nous pouvons conclure que le fluide frigorigène bout si F_e devient inférieure à F_i .

4.2 Relation pression-température du fluide frigorigène

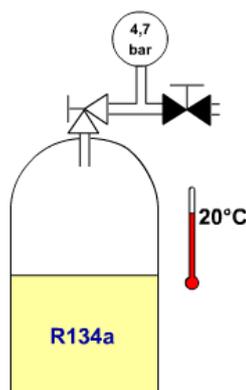
Pour un mélange liquide-gaz

a) Une bouteille de fluide est placée dans une ambiance à +20°C

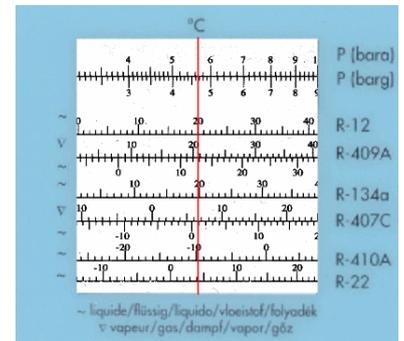
Un mélange liquide-gaz de R134a à 20°C a une pression de 4,7 bar abs.

C'est la relation pression-température pour le mélange liquide-gaz de R134a.

Nous savons désormais que chaque fluide possède sa propre relation pression-température.



Ex : Rechercher la pression absolue pour un mélange liquide-gaz de R22 à 20°C



Conclusion : Connaissant la température d'un mélange liquide-gaz d'un fluide, on peut connaître sa pression et vis-versa.

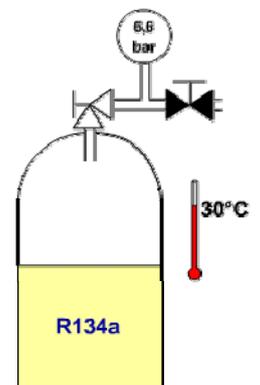
b) Plaçons la bouteille de fluide dans une ambiance à +30°C

Si la température augmente de 10°C, l'agitation moléculaire va augmenter dans le liquide.

La force interne F_i deviendra supérieure à la force externe F_e . Le fluide frigorigène va donc essayer de rétablir l'équilibre entre son liquide et sa vapeur. Pour cela, une faible quantité de liquide va s'évaporer pour fournir des vapeurs.

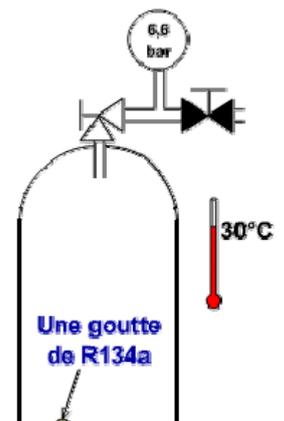
Cette quantité de vapeurs supplémentaire permet à F_e de croître aussi, et dans la même proportion que F_i .

Grâce à l'évaporation de la faible quantité de liquide, le fluide frigorigène a réussi à rétablir l'équilibre entre la force exercée par sa vapeur et celle exercée par son liquide. On retrouve alors $F_e = F_i$.



Comme on retrouve plus de vapeurs, la pression augmente... 6,6 bar, c'est la pression d'un mélange liquide-gaz de R134a à 30°C.

A savoir : Il suffit d'une goutte de liquide pour que la relation pression-température soit applicable.



Bouteille ne contenant plus que des vapeurs

Nous employons désormais le terme de vapeurs surchauffées :

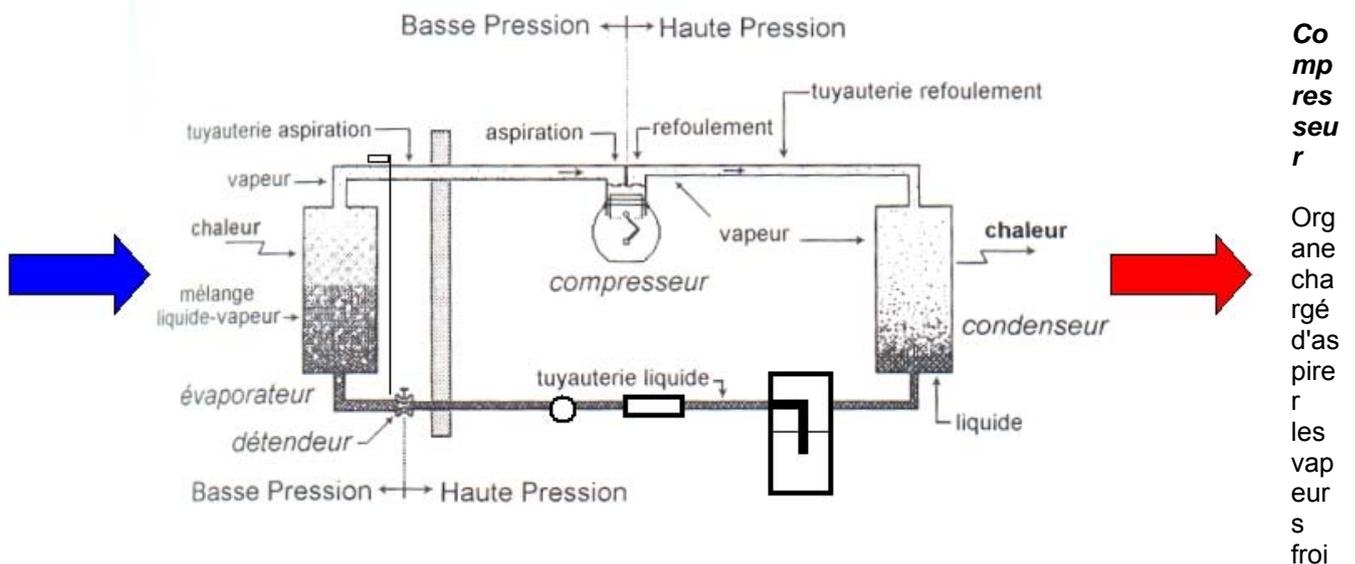
Si nous plaçons la bouteille précédente dans une ambiance à + 40°C. L'agitation moléculaire augmente dans la goutte de liquide qui s'évapore. Malheureusement, elle ne fournit plus suffisamment de vapeurs pour faire augmenter la pression. Celle-ci reste égale à 6,6 bar.

La force exercée par la pression de vapeur F_e ne peut donc plus augmenter. L'élévation de la température ambiante à 40°C a fait évaporer tout le liquide.

Il n'y a donc plus relation pression température.

6,6 bar était la pression d'un mélange liquide gaz de R134a à 30°C. Ici nous avons des vapeurs à 40°C. Elles sont donc surchauffées de 40°C - 30°C = 10°C.

II.5 PRODUCTION DE FROID PAR DETENTE ET EVAPORATION D'UN FLUIDE FRIGORIGENE

Le circuit frigorifique

des (BP) venant de l'évaporateur et de les comprimer afin de les rendre condensable.

Condenseur

C'est un échangeur thermique dont le but est d'évacuer la chaleur absorbée par l'évaporateur. L'évacuation de cette chaleur entraîne la condensation du fluide frigorigène (changement d'état du fluide frigorigène).

Détendeur

Cet organe sert à ajuster le débit du liquide en fonction des besoins. Son petit orifice entraîne une chute de pression. Le fluide frigorigène entre dans cet élément à l'état de liquide haute pression et sort à l'état de liquide basse pression.

Le réservoir de liquide

Il permet de compenser les variations de demande de débit du détendeur thermostatique.

Le deshydrateur

Cet appareil permet d'éliminer l'humidité qui pourrait être contenu dans notre installation frigorifique. Elle est absorbée et emmagasinée. Le deshydrateur peut par conséquent, empêcher une éventuelle formation de glace au détendeur.

Il peut emmagasiner les acides nuisibles se produisant dans le circuit frigorifique empêchant ainsi toute corrosion. Il retient également les particules étrangères (boues et produits de décomposition de l'huile).

Le voyant de liquide

Il sert à indiquer l'état du fluide frigorigène dans la conduite liquide de l'installation. Nous pouvons également grâce à cet appareil, vérifier si notre installation frigorifique est humide ou pas (système de pastille changeant de couleur en fonction de l'humidité contenu dans le circuit).

Les fluides frigorigènes

Le fluide frigorigène circule dans le système et absorbe l'énergie de l'évaporateur à basse température et retransmet l'énergie au condenseur à haute température. Cela est réalisé au moyen de la transformation du fluide frigorigène de l'état liquide à l'état gazeux dans l'évaporateur et de l'état gazeux à l'état liquide dans le condenseur.

a) Types de fluides frigorigènes

Les fluides frigorigènes sont classés en différents groupes selon leur composition moléculaire.

CFC	Chloro-Fluoro-Carbone ex. R12
HCFC	Hydro-Chloro-Fluoro-Carbone : ex. R22
HFC	Hydro-Fluoro-Carbone , ex R134a

b) Propriétés requises

Les fluides frigorigènes doivent posséder nombreuses propriétés indispensables. Ils doivent être :

- inoffensifs pour l'environnement
- « écoénergétiques », c'est-à-dire aptes à transporter d'importantes quantités de chaleur par kg de matière
- de préférence non inflammables
- de préférence non toxiques
- simples à manipuler
- compatibles avec les huiles et les élastomères (raccords et joints toriques)
- chimiquement stables

Ils doivent également

- permettre une utilisation dans de grandes plages de température et pression
- produire du gaz chaud à basse température après le compresseur
- Aucune substance unique ne peut remplir à elle seule toutes ces exigences – Il faudra toujours trouver un compromis.

c) Remplacement du fluide frigorigène dans les vieilles unités

Idéalement, après une réparation, les systèmes frigorifiques et les pompes à chaleur doivent être remplis avec le fluide frigorigène d'origine. Certains fluides frigorigènes ont toutefois été interdits pour des raisons d'impact défavorable sur l'environnement, comme R12, R22 . Ce qui signifie que les vieilles unités peuvent avoir besoin d'un réglage ou d'une conversion pour utiliser d'autres fluides frigorigènes alternatifs dans le cadre de la réparation. Il est bien sûr important de déterminer l'état et la durée de vie restante de l'unité avant les réparations et le changement de fluide frigorigène . Dans de nombreux cas, il peut être économiquement avantageux d'acheter du nouveau matériel employant un fluide frigorigène agréé.

Avant d'envisager un changement de fluide frigorigène, il convient d'étudier si le nouveau fluide frigorigène affectera le matériau et les composants de la pompe à chaleur. Il est capital de déterminer si l'huile du système doit être changée. Si l'huile comme le fluide frigorigène doivent être changés, les coûts seront plus élevés. En effet, toutes les traces de l'huile précédente devront être éliminées du système.

Ancien fluide frigorigène	Fluide frigorigène de remplacement en neuf	Fluide frigorigène de remplacement en substitution
<i>R12</i>	<i>R134a</i>	
<i>R502</i>	<i>R404A</i>	
R22	R407C, R410A	R417A

Le marché propose de nombreux fluides frigorigènes « de substitution » qui peuvent être utilisés à la place des anciens. Ces fluides frigorigènes permettent à l'utilisateur, comme leur nom l'indique, le remplacement direct sans aucune autre mesure. En général, les fluides frigorigènes « de substitution » altèrent la pompe à chaleur et il est important d'expliquer cela clairement au propriétaire de la pompe à chaleur avant d'effectuer le remplacement.

II.6. LE DIAGRAMME ENTHALPIQUE- LE CYCLE THERMODYNAMIQUE

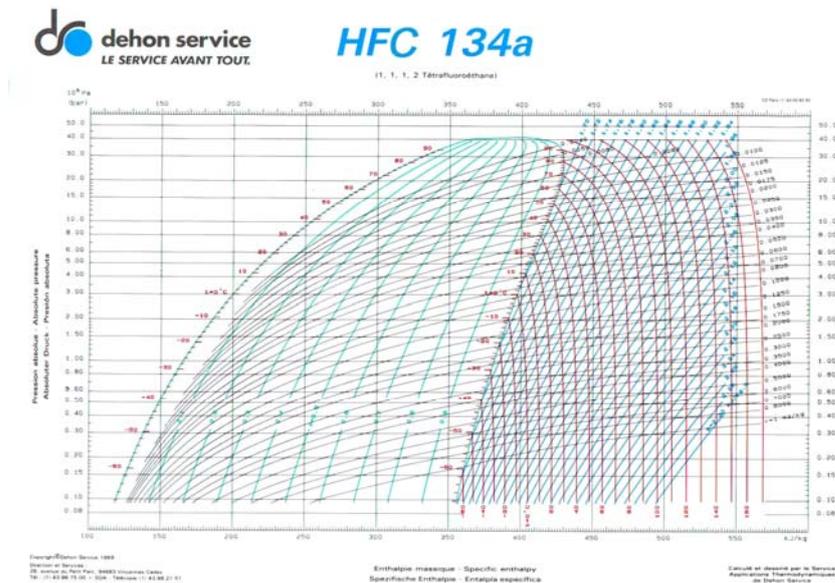
6.1 Le diagramme enthalpique

Rôle

Le diagramme enthalpique nous permettra de tracer **le cycle frigorifique** de notre machine et d'en déterminer différentes grandeurs. Nous pourrons, désormais, calculer une puissance frigorifique et calorifique et connaître l'état du fluide en différents endroits.

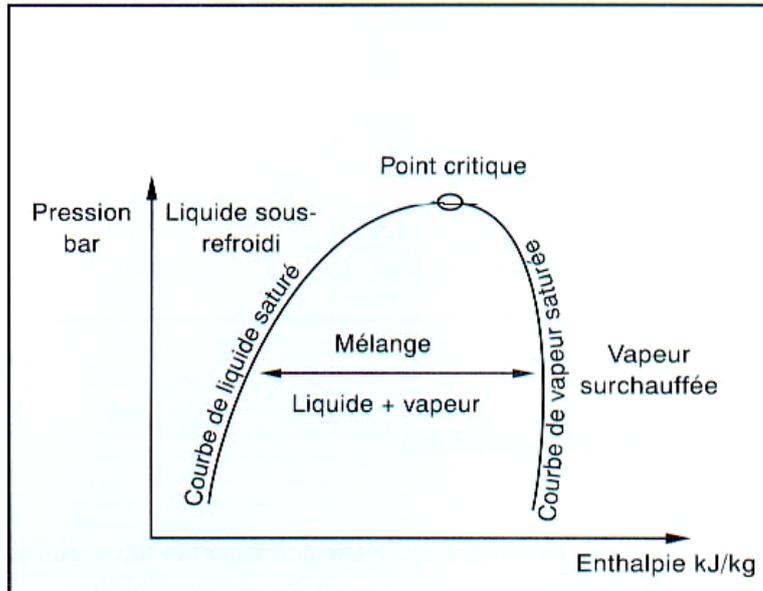
Exemple de diagramme (Le R 134 a)

Vous avez sous les yeux le diagramme enthalpique du R 134 a. Nous allons le décomposer afin d'étudier ces courbes plus en détails.



Descriptiona) Les zones

Le diagramme enthalpique ou diagramme pression/enthalpie à l'aspect suivant :



Le diagramme est délimité en abscisse par l'échelle des enthalpies et en ordonnée par l'échelle des pressions. Les courbes de saturation se rejoignent au point critique et divisent le diagramme en 4 zones :

La zone 1 : Elle se situe au-dessus de l'isotherme critique. Ici, la vapeur ne peut absolument pas être condensée quelle que soit la pression à laquelle elle est soumise.

La zone 2 : C'est la zone de la vapeur à l'état surchauffée. Elle est située entre l'isotherme critique et la courbe de saturation vapeur.

La zone 3 : La zone 3 se situe à l'intérieur de la courbe de saturation, c'est la phase de changement d'état. Nous avons donc, ici, un mélange liquide + vapeur.

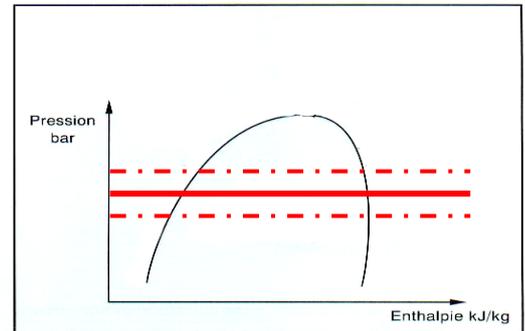
La zone 4 : C'est la zone où le fluide est à l'état de liquide sous-refroidi. Elle est située entre l'isotherme critique et la courbe de saturation liquide.

b) Grandeurs constituant un le diagramme

LA PRESSION (EN BAR)

L'échelle des pressions (en bar absolu) évolue parallèlement à l'axe des enthalpies.

LES ISOBARS sont des lignes perpendiculaires à l'axe des pressions



L'ENTHALPIE (EN KJ/KG)

L'enthalpie (H) est la quantité d'énergie contenue dans une substance en fonction de sa température, de sa pression et de son état (solide, liquide, gazeux ou intermédiaire). Pour un gaz, l'enthalpie se calcule de la façon suivante :

$$H = Q + p \cdot V \quad [J]$$

Q est la quantité de chaleur que contient le gaz, **p** la pression et **V** le volume.

L'enthalpie spécifique est l'enthalpie divisée par la masse, et elle se calcule ainsi : **$h = H/m$ [J/kg]**.

Une variation d'enthalpie (ΔH) est due à **l'apport ou au retrait de chaleur** et/ou d'énergie mécanique. Contrairement à la chaleur spécifique, l'enthalpie spécifique peut prendre en compte les changements d'état et la pression lorsque la substance chauffe ou refroidit.

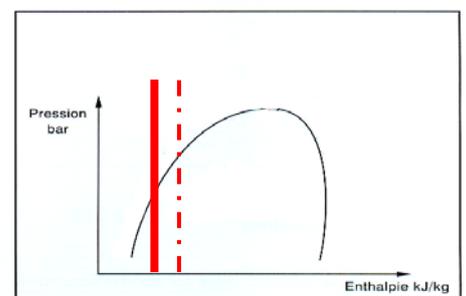
La notion d'enthalpie est particulièrement importante pour comprendre les cycles de réfrigération. En effet, les **différences d'enthalpie** déterminent **le taux de transfert** de chaleur correspondant au cycle de la pompe à chaleur.

$$Q = m \cdot \Delta h = kg \cdot \frac{J}{kg} = J$$

$$P = \dot{m} \cdot \Delta h$$

\dot{m} est la masse de fluide frigorigène circulant dans le circuit de la pompe à chaleur pour chaque unité de temps (kg/s).

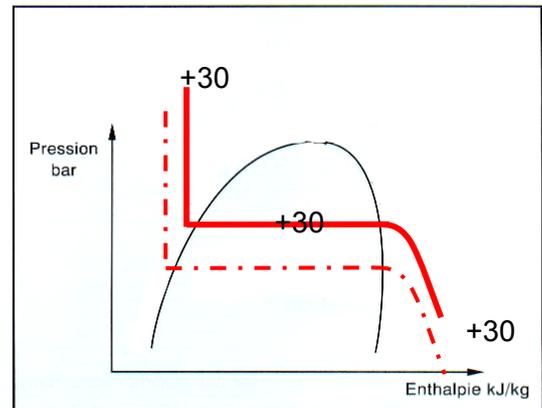
LES ISENTHALPES sont des lignes perpendiculaires à l'axe des enthalpies



LA TEMPERATURE (EN °C)

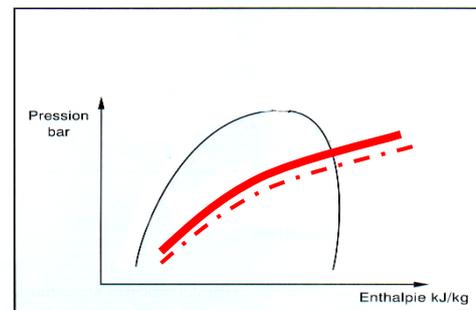
Dans la zone de mélange liquide + vapeur, la température et la pression sont liées (relation Pression / Température). Dans les autres zones la température et la pression ne sont pas liées. Elle est représentée par :

LES ISOTHERMES (t) sont des lignes où la température reste constante.

LE VOLUME MASSIQUE (EN M³/KG)

Le volume massique représente le volume occupé par 1 kilogramme de fluide frigorigène.

LES ISOCORES (v ") donnent la valeur du volume massique du fluide suivant sa pression et sa température.

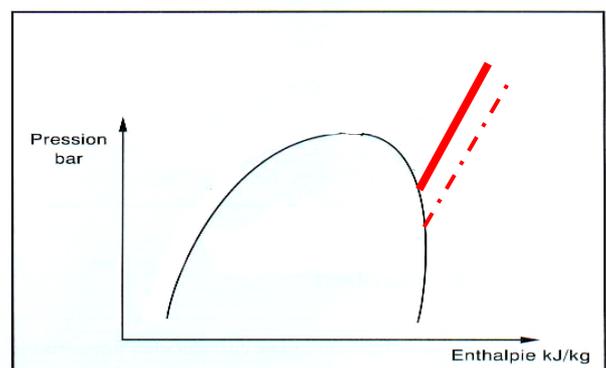
L'ENTROPIE (EN KJ/KG.K)

Comme l'enthalpie, l'entropie (S) est l'une des propriétés des systèmes thermodynamiques. Au cours d'un processus, les variations d'entropie spécifique (s) d'une substance permettent de mesurer l'irréversibilité de ce processus ainsi que l'énergie qui a cessé d'être disponible pour le travail.

L'entropie est aussi utile que l'enthalpie si l'on veut comprendre les cycles de réfrigération. Les différences d'entropie déterminent l'efficacité du cycle de la pompe (**plus les différences d'entropie sont importantes, plus les pertes sont importantes elles aussi**).

L'entropie représente l'énergie interne emmagasinée par 1 kg de fluide frigorigène et par Kelvin.

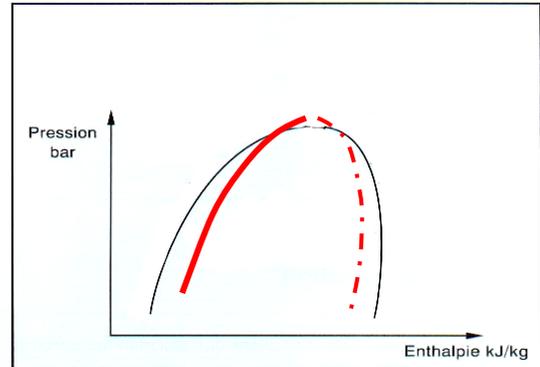
LES ISENTROPES (s) seront toujours représentées à partir de la courbe de saturation vapeur.



LE TITRE DE VAPEUR

Le titre représente le pourcentage de vapeur par rapport au liquide. Si le titre reste constant, on parle de :

LES ISOTITRES (x) sont des courbes à titre de vapeur constant et se trouvent toutes à l'intérieur de la courbe de saturation. Elles passent toutes par le point critique.



6.2 Tracé du cycle

En pratique, suivons le parcours du fluide frigorigène dans les différents équipements et repérons le tracé de l'évolution du fluide frigorigène sur le diagramme

Sur une installation au R404 A en fonctionnement on a relevé:

$p_k = 15 \text{ bar } (35^\circ\text{C})$
 $p_0 = 3.5 \text{ bar } (-10^\circ\text{C})$
 $\theta \text{ aspiration compresseur} = 5^\circ\text{C}$
 $\theta \text{ entrée détendeur} = 30^\circ\text{C}$

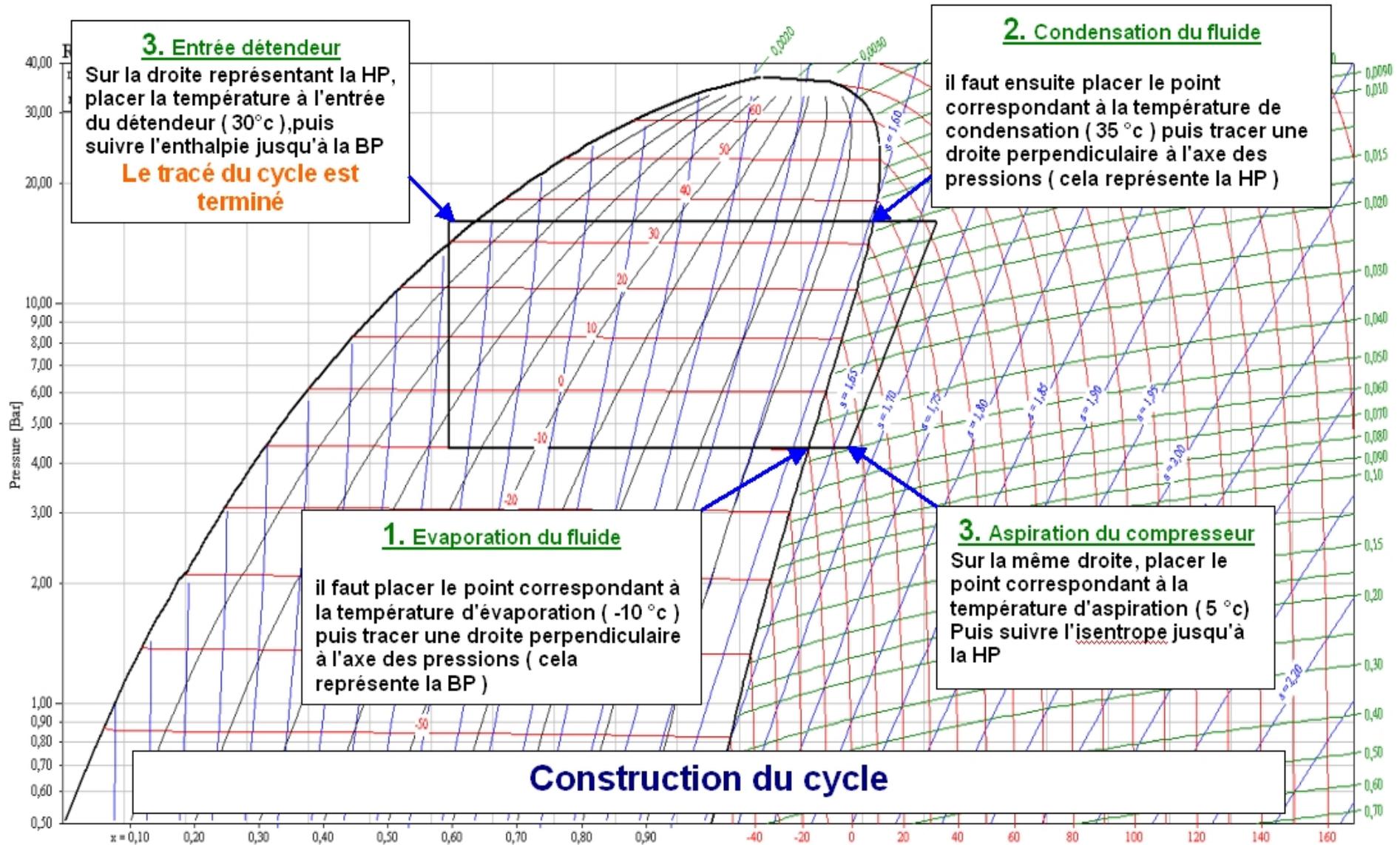
Utilisation des relevés :

les manomètres nous indiquent une pression relative hors le diagramme est gradué en pression absolue, il convient donc de transformer:

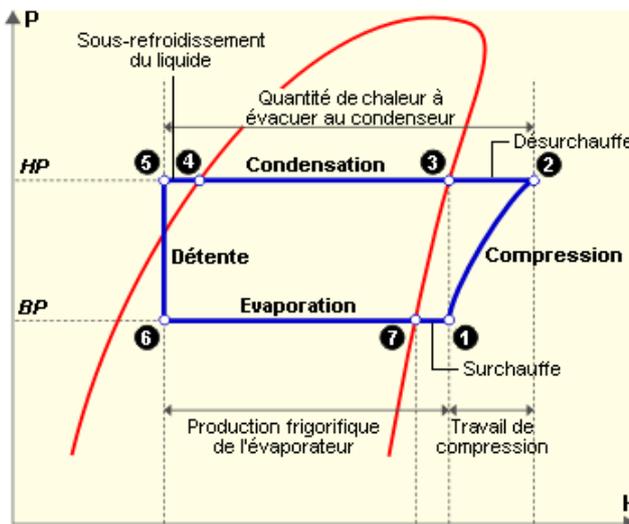
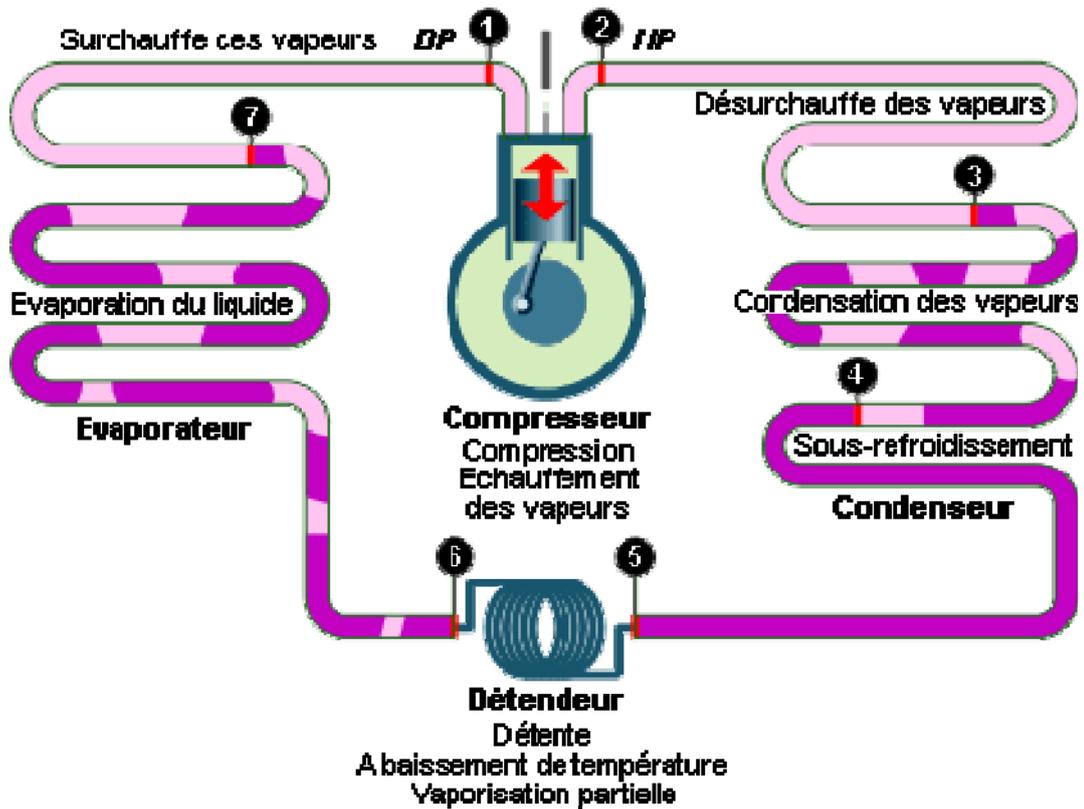
$$p_k \text{ abs} = 15 + 1 = \mathbf{16 \text{ bar}}$$

$$p_0 \text{ abs} = 3.5 + 1 = \mathbf{4.5 \text{ bar}}$$

Nous pouvons repérer sur le diagramme les deux isobares sur lesquels le fluide va évoluer. Chaque point du cycle sera situé sur l'une ou l'autre des isobares.



Fonctionnement complet



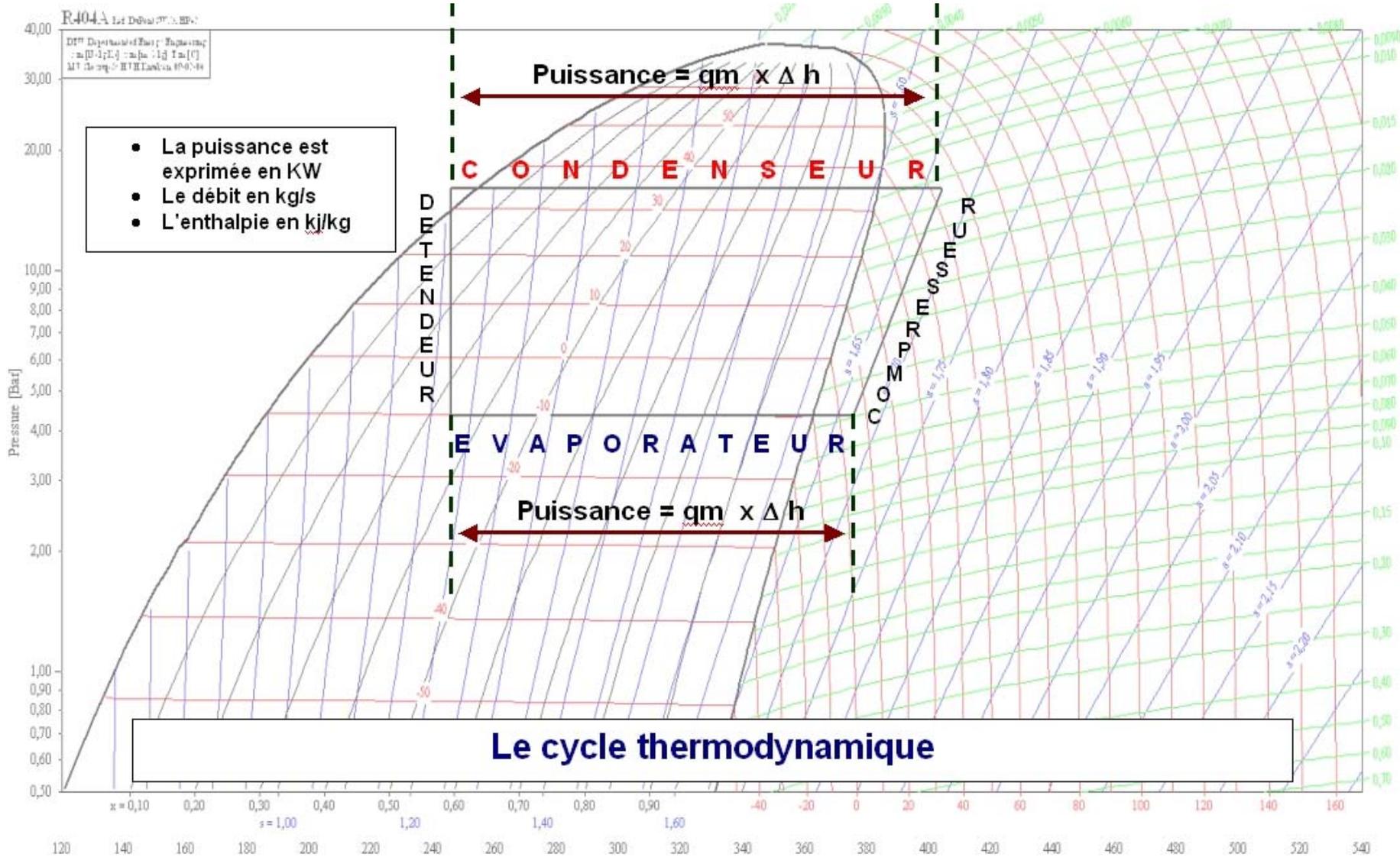
6.3 Exploitation

1 Détermination de la puissance frigorifique

$$\phi_o = Qm (H_s - H_e)_{evap}$$

2 Détermination de la puissance calorifique rejetée au condenseur

$$\phi_k = Qm (H_e - H_s)_{cond}$$



4. Détermination des performancesEn chauffage

En mode chauffage, la pompe à chaleur est définie par les caractéristiques suivantes

- Puissance thermique dissipée au condenseur
- Puissance électrique totale absorbée en fonction de la température extérieure.

Elle comprend :

- la puissance électrique du compresseur,
- la puissance électrique du ou des ventilateurs,
- la puissance électrique de la pompe de circulation.

Le **COP réel** est le rapport quantité de chaleur évacuée au condenseur / quantité d'énergie totale absorbée par l'installation thermodynamique.

$$COP = \frac{\Phi_{condenseur}}{P_{absTotale}}$$

Il représente la quantité de chaleur récupérable au niveau du condenseur par rapport à la quantité d'énergie réellement consommée par la machine.

C'est un élément de comparaison du niveau de performance des différents systèmes.

Exemples pour une PAC air/eau Les seuils de coefficient de performance machine doivent être au moins égaux à:

- 3,3** pour le point d'essai 7 °C / 6 °C, + 35 °C
- 2,0** pour le point d'essai -7 °C / -8 °C, + 35 °C

En rafraîchissement ou climatisation

En mode rafraîchissement, la pompe à chaleur fonctionne en machine frigorifique. Elle est définie par les caractéristiques suivantes :

$$\varepsilon_f = \frac{\Phi_{frigorifique}}{P_{absTotale}}$$

III LA POMPE A CHALEUR

III.1 VUE D'ENSEMBLE D'UNE POMPE A CHALEUR AIR/EAU

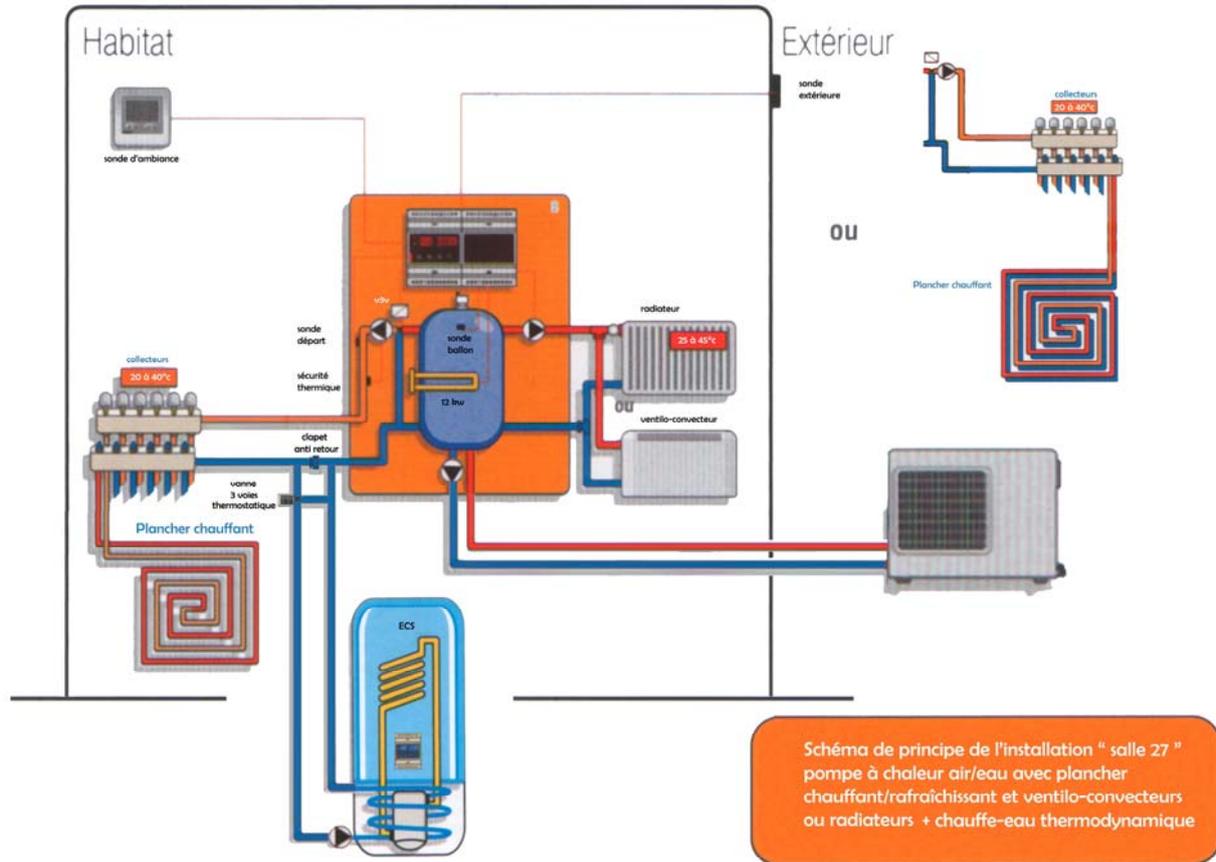
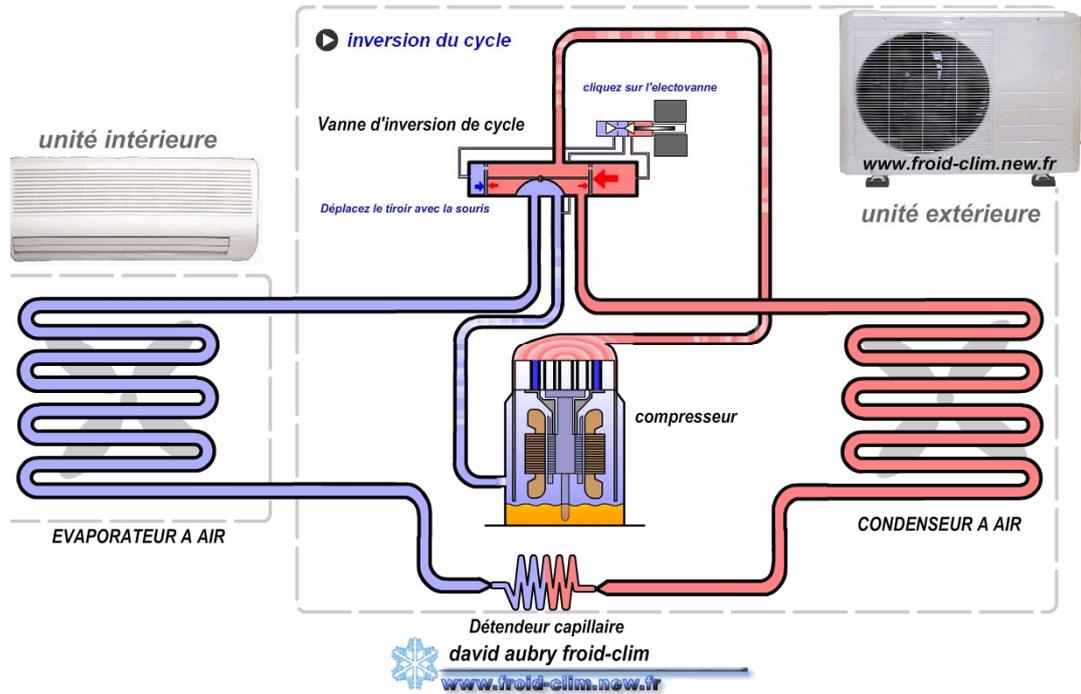


Schéma PAC D.AUBRY 2007

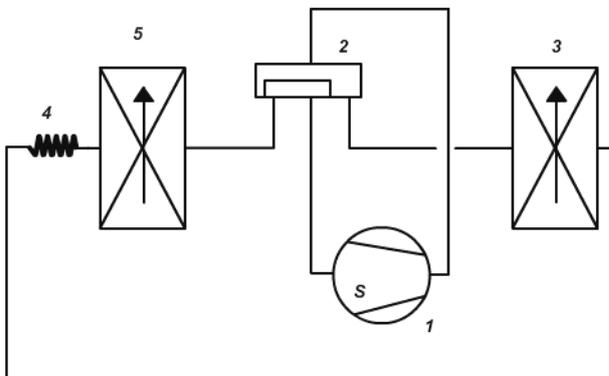
III.2. PRESENTATION

Les pompes à chaleur sont, la plupart du temps des systèmes dit réversibles. Inverser le cycle frigorifique signifie qu'en fonction des besoins (fonctionnement été/hiver), l'évaporateur devient condenseur et que le condenseur devient évaporateur. Ces pompes à chaleur appelés " réversibles " sont équipés d'une vanne à 4 voies qui permet cette inversion de cycle (mode été/hiver). On utilise également ce dispositif pour dégivrer l'évaporateur.

1. Schéma de principe d'un climatiseur Split-system réversible



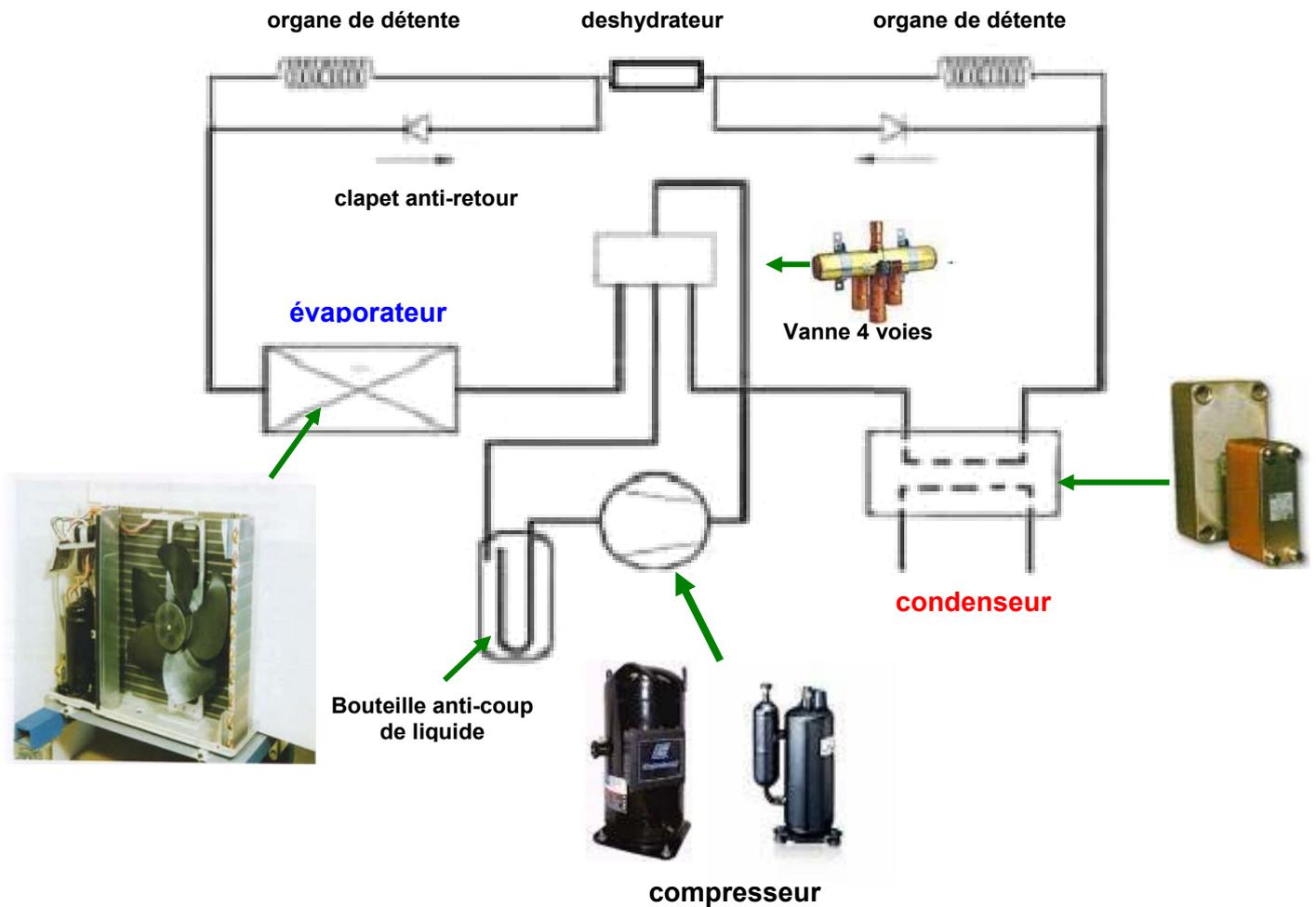
Représentation normalisée



1. Compresseur à spirales
2. Vanne 4 voies
3. Echangeur thermique (ici condenseur à air)
4. Détendeur capillaire
5. Echangeur thermique (ici évaporateur à air)

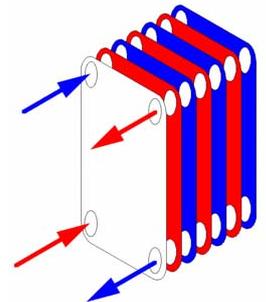
III.3. LES ELEMENTS D'UNE PAC AIR/EAU

Schéma de principe d'un système réversible



3.1. Les échangeurs de chaleur

L'évaporateur (sauf pour la pompe à chaleur air / eau) et le condenseur des pompes à chaleur sont principalement des échangeurs de chaleur à plaques en acier inoxydable. Au contraire des échangeurs de chaleur à faisceaux de tubes, les échangeurs de chaleur à plaques présentent une meilleure transmission thermique. De plus, leurs dimensions très réduites économisent de la place.



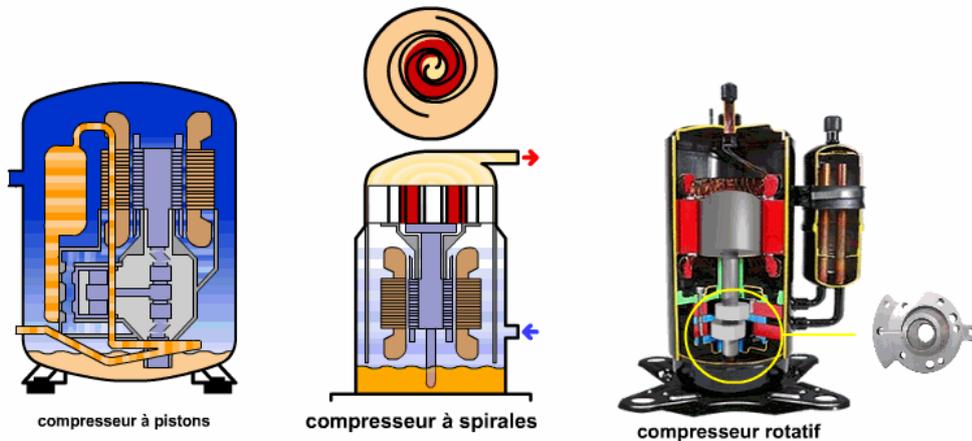
3.2. Les compresseurs

Les compresseurs utilisés pour les pompes à chaleur sont généralement hermétiques. On retrouve trois technologies :

On retrouve trois technologies

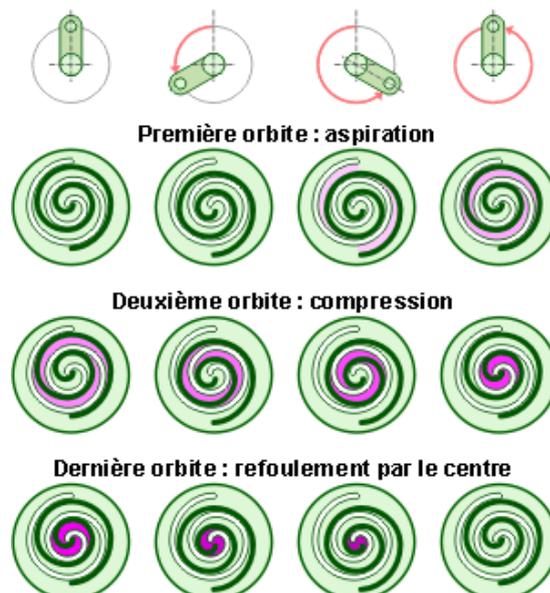
- Le compresseur à spirales (scroll)
- Le compresseur à pistons
- Le compresseur rotatif (piston roulant)

Les compresseurs utilisés en climatisation et pompe à chaleur



a) Compresseur spiro-orbital, dit "scroll"

Le compresseur SCROLL est composé de deux spirales. La première est fixe, la seconde mobile. Le mouvement orbital entraîne le déplacement vers le centre des poches de gaz, ce déplacement est accompagné d'une réduction progressive de leur volume jusqu'à disparition totale. C'est ainsi que s'accomplit le cycle de compression du fluide frigorigène.



La réduction du nombre de pièces par rapport à un compresseur à pistons de même puissance est de l'ordre de 60 %. L'unique spirale mobile remplace pistons, bielles, manetons et clapets. Moins de pièces en mouvement, moins de masse en rotation et moins de frottements internes, cela se traduit par un rendement supérieur à celui des compresseurs à pistons.

A noter également sa faible sensibilité aux coups de liquide.

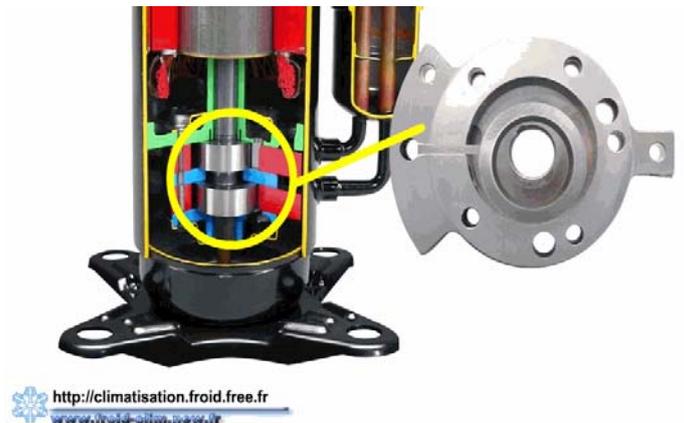
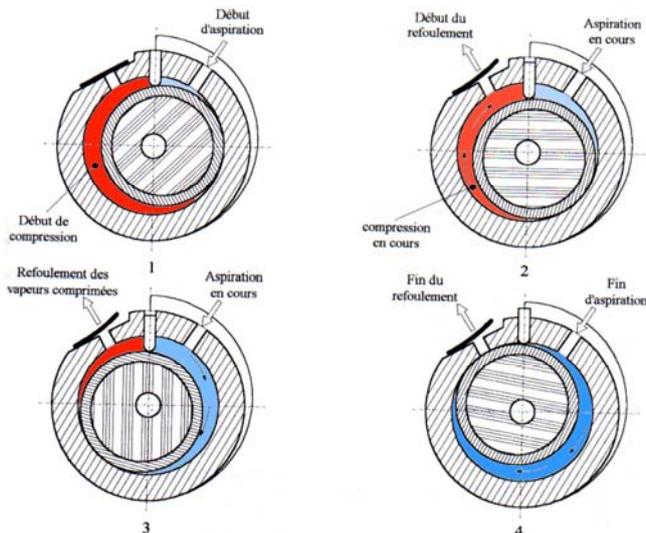
b) Compresseur rotatif

C'est un compresseur volumétrique qui trouve de l'avenir grâce aux nouveaux matériaux composites.

On rencontre deux technologies :

- [le compresseur rotatif à piston roulant.](#)
- [le compresseur rotatif à palettes.](#)

Dans les deux cas un stator cylindrique renferme un rotor excentré par rapport à l'axe du stator. Un volume en forme de croissant est piégé. Du fluide frigorigène y est introduit (aspiration) et la rotation du rotor va comprimer cet espace jusqu'à atteindre la pression souhaitée (refoulement).



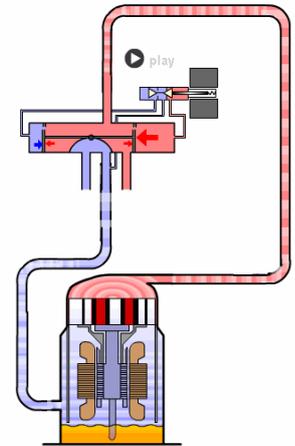
3.3 .La vanne d'inversion de cycle

Fonctionnement de la vanne d'inversion de cycle

1. Constitution générale

Lorsque nous examinons le schéma de la vanne, nous constatons qu'elle est constituée d'une vanne principale à 4 voies et d'une petite électrovanne pilote à 3 voies montée sur le corps de la vanne principale.

Nous remarquons que sur les 4 raccordements de la vanne principale, 3 sont placés côte à côte (l'aspiration du compresseur est toujours raccordée sur celui du milieu) et que le quatrième raccordement se trouve seul de l'autre coté (on y raccorde toujours le refoulement du compresseur) .



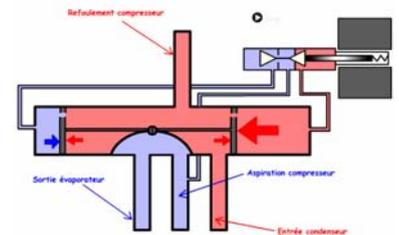
2. principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est basé sur un tiroir situé à l'intérieur de la vanne principale. En se déplaçant de gauche à droite ou de droite à gauche, il inverse les échangeurs. Le déplacement du tiroir est commandé par la petite électrovanne pilote.

a) Constitution générale

Lorsque nous examinons le schéma de la vanne, nous constatons qu'elle est constituée :

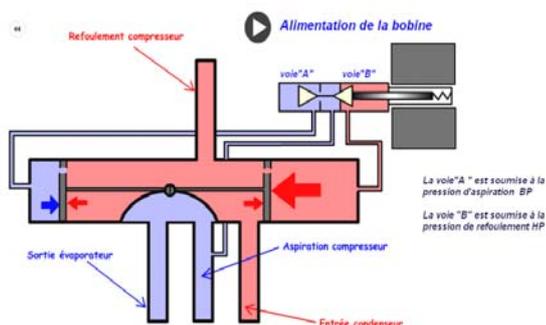
- ❑ d'une vanne principale à 4 voies munie d'un tiroir et de deux orifices d'équilibrage
- ❑ d'une électrovanne pilote à 3 voies dotée de capillaires



b) principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est basé sur un tiroir situé à l'intérieur de la vanne principale. En se déplaçant de gauche à droite ou de droite à gauche, il inverse les échangeurs. Le déplacement du tiroir est commandé par la petite électrovanne pilote.

Bobine non alimentée



La voie A est ouverte, la voie B est fermée.

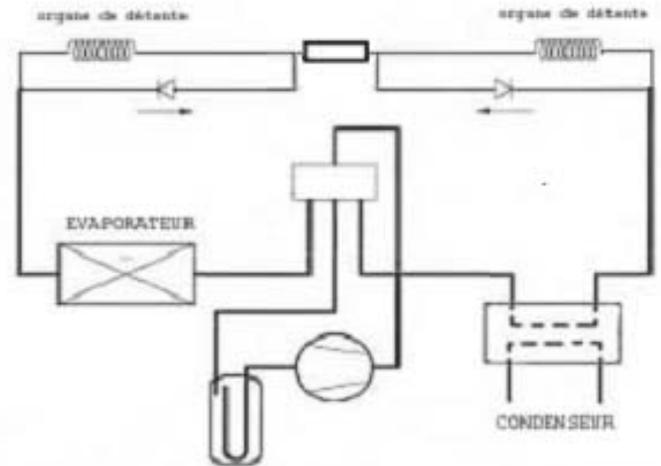
Voie A ouverte :

Elle permet de mettre l'aspiration (BP) en contact avec la partie gauche de la vanne

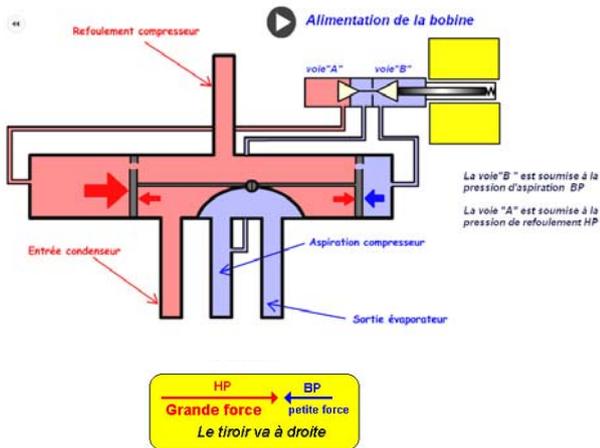
Voie B fermée:

Associée à l'orifice d'équilibrage. Elle permet de mettre le refoulement (HP) en contact avec la partie droite de la vanne.

Conséquence: Le tiroir va à gauche



Bobine alimentée



La voie B est ouverte, la voie A est fermée.

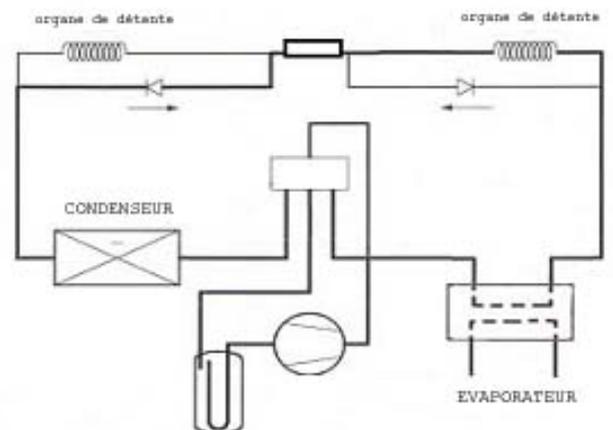
Voie A fermée :

Associée à l'orifice d'équilibrage. Elle permet de mettre le refoulement (HP) en contact avec la partie gauche de la vanne.

Voie B ouverte:

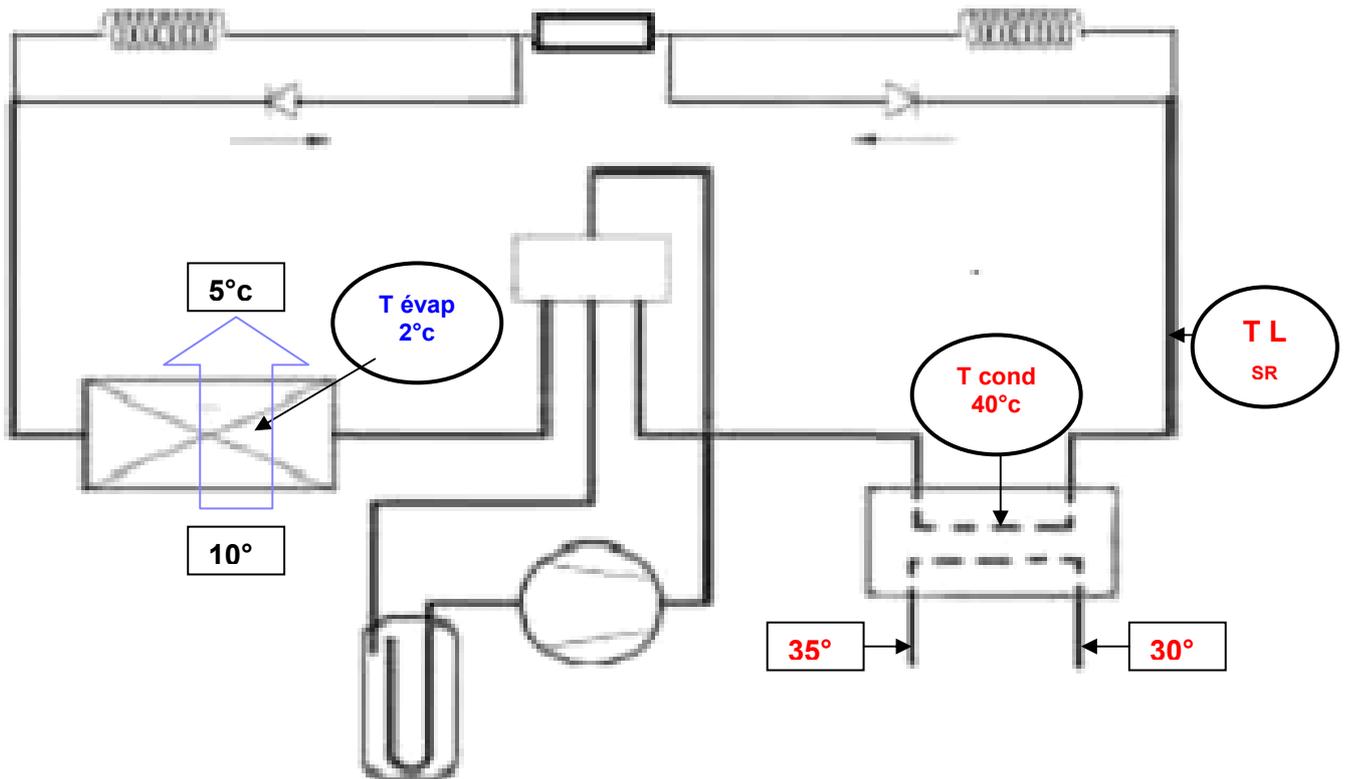
Elle permet de mettre l'aspiration (BP) en contact avec la partie droite de la vanne

Conséquence: Le tiroir va à droite



III. 4 LES VALEURS DE REFERENCE

Exemple de relevés



EVAPORATEUR	
Ecart de température sur l'air	5 K
Ecart de température entre la température d'entrée d'air et l'évaporation	5 à 10 K
Surchauffe dans l'évaporateur	5 à 8 K

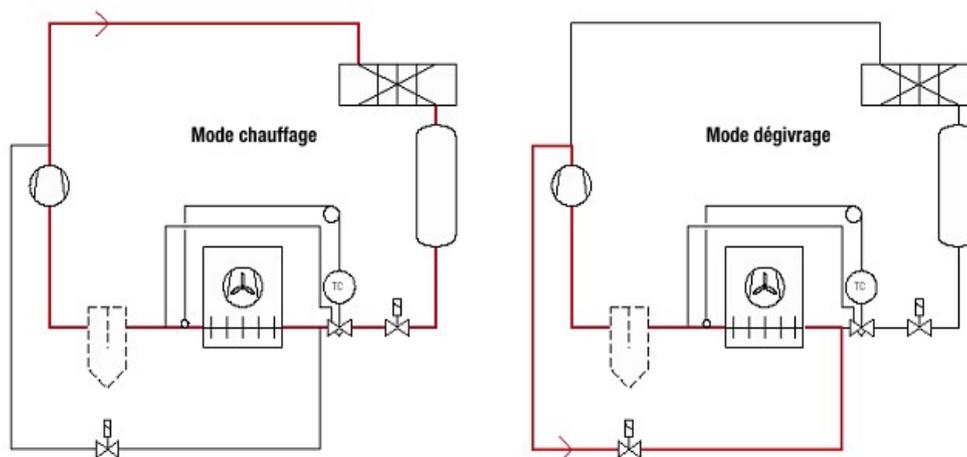
CONDENSEUR	
Ecart de température sur l'eau	5 K
Ecart de température entre la condensation et la sortie d'eau	5 K
Sous refroidissement de liquide dans le condenseur	2 à 5 K (Généralement 5 k)

III.5 LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE PAC

1. Les pompes à chaleur air/eau basse température

1.2 Schémas des pompes à chaleur BT

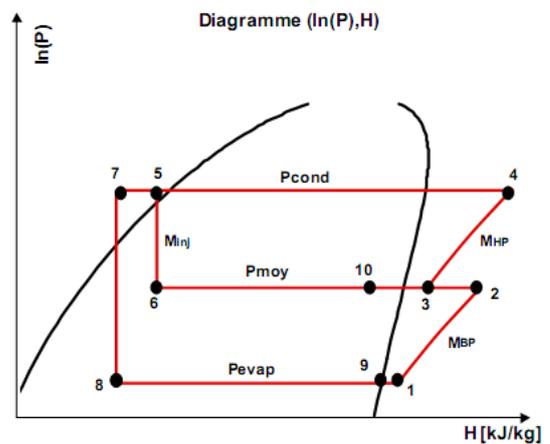
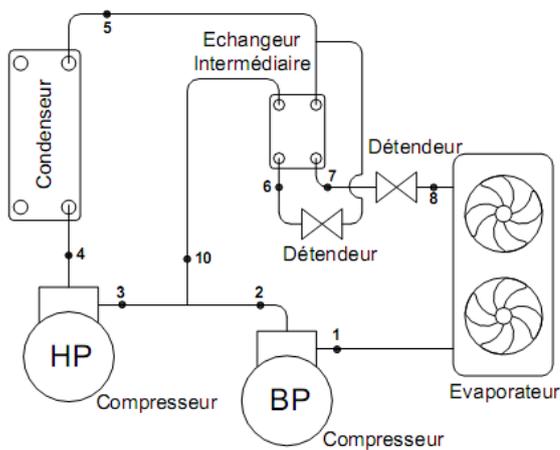
Pompe à chaleur non réversible avec dégivrage par gaz chauds



Pendant le processus de dégivrage, le condenseur est contourné au moyen d'un by-pass, et le gaz sous pression provenant du compresseur est directement envoyé vers l'évaporateur. Il est ici très important que la pression soit maintenue élevée en aval du compresseur. La puissance nécessaire pour le dégivrage correspond pratiquement à la puissance électrique absorbée par le compresseur.

2. Pompe à chaleur haute température

2.1 Système bi-étagé à injection partielle

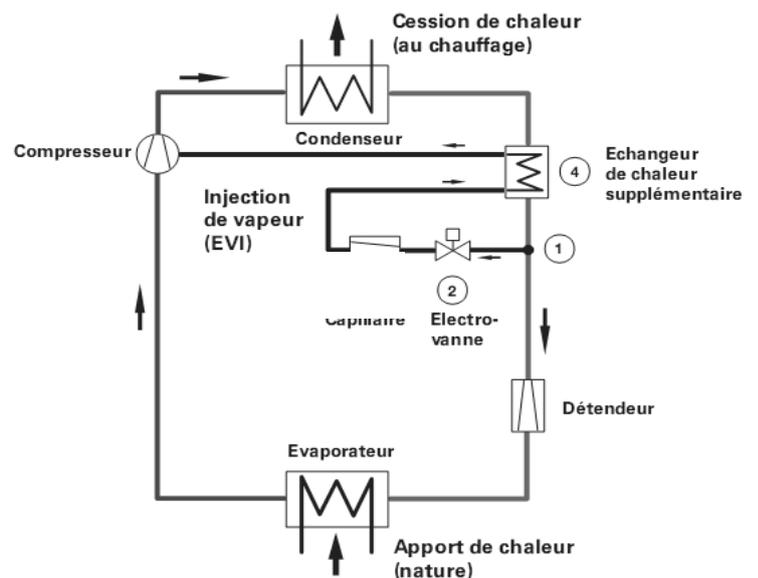


Les étapes du cycle sont :

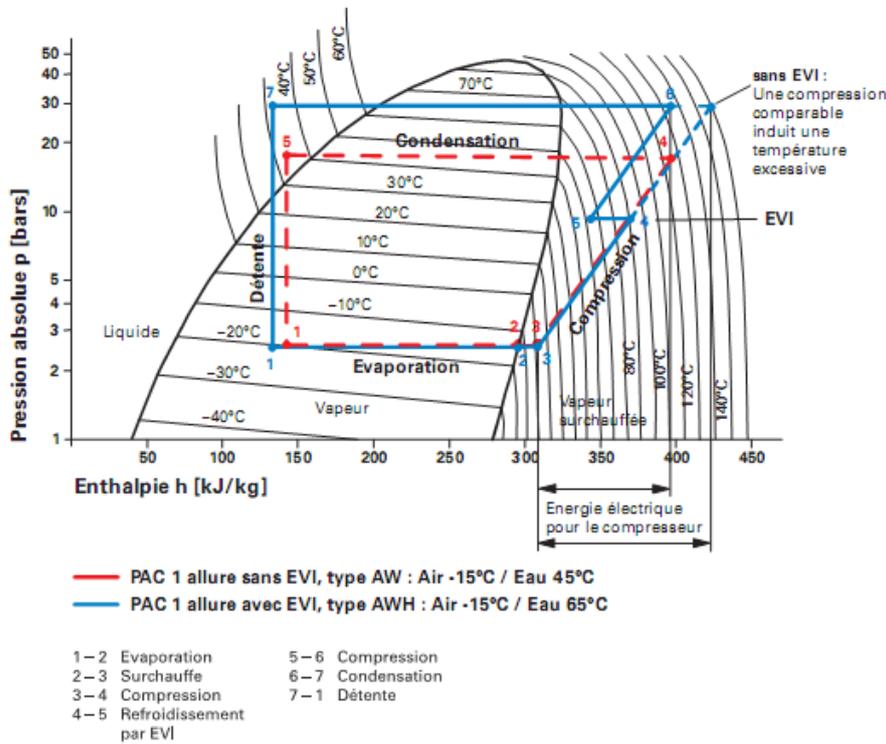
- 1-2 : compression de M_{BP} en phase vapeur de P_{evap} à P_{moy}
- 2-3 : désurchauffe grâce au mélange des débits M_{BP} en état 2 et M_{inj} en état 10 pour constituer M_{HP} l'état 3.
- 3-4 : compression des vapeurs M_{HP} de P_{moy} à P_{cond}
- 4-5 : désurchauffe, condensation à P_{cond} et sous-refroidissement de M_{HP} .
- 5-6 : détente isenthalpique de M_{inj} de P_{cond} à P_{moy}
- 6-10 : évaporation de ce même débit pour le sous-refroidissement du débit masse M_{BP}
- 5-7 : sous-refroidissement du débit masse M_{BP} dans l'échangeur intermédiaire
- 7-8 : détente du débit M_{BP} de P_{cond} à P_{evap}
- 8-9 : évaporation
- 9-1 : surchauffe.

2.2 L'injection de vapeur (compresseur EVI)

Le circuit frigorifique à injection de vapeur constitue une autre solution technique pour atteindre des températures de départ élevées avec le fluide frigorigène. Dans ce procédé également appelé cycle EVI (Enhanced Vapour Injection en anglais, réinjection de fluide en français), une faible quantité de fluide frigorigène est dérivée par une électrovanne en aval du condenseur si besoin est. Ce fluide frigorigène liquide mais à haute pression est porté par le détendeur à la pression d'injection et vaporisé dans un échangeur de chaleur supplémentaire. Le fluide frigorigène sous forme de vapeur quitte l'échangeur de chaleur supplémentaire et entre dans le compresseur où il est directement injecté dans le processus de compression.



Une pompe à chaleur à cycle EVI fonctionne d'abord comme une pompe à chaleur traditionnelle. L'injection de vapeur n'est activée que si la demande de chaleur est importante ou si la température de départ doit passer à 55°C. L'injection de vapeur augmente sensiblement la puissance et donc le coefficient de performances par rapport à un cycle traditionnel. L'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner le compresseur est sensiblement plus faible pour le processus avec EVI que pour un compresseur théoriquement comparable sans injection de vapeur.



le cycle EVI dans le diagramme de Mollier avec le fluide frigorigène R 407 C (en comparaison, le cycle pompe à chaleur traditionnel est

Le cycle frigorifique du compresseur est similaire à celui d'un compresseur deux étages avec refroidissement intermédiaire, mais il est réalisé avec un seul compresseur. À l'étage haute pression, une partie du liquide condensé passe au travers d'un détendeur thermostatique et d'un échangeur à plaques brasées qui sous-refroidit le liquide principal avant l'entrée au détendeur principal.

La vapeur formée dans l'échangeur à plaques est alors injectée dans le compresseur Scroll par le biais d'un raccord intermédiaire. Le sous-refroidissement obtenu sur le liquide principal accroît la puissance frigorifique à l'évaporateur en diminuant l'enthalpie du fluide à l'entrée du détendeur principal (cf diagramme

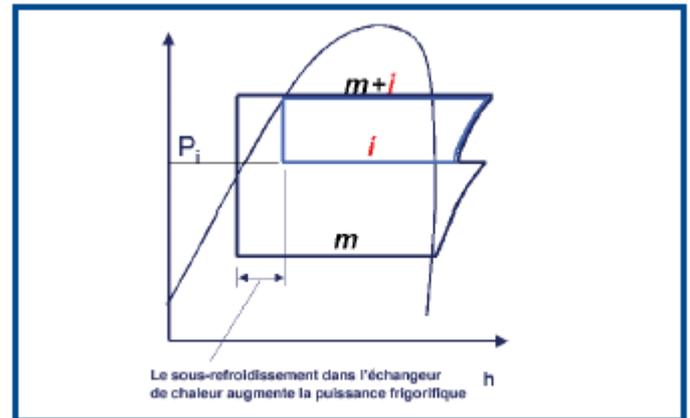
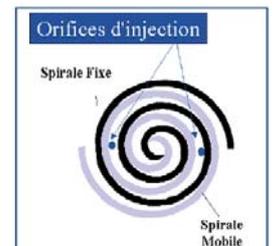


Figure n°2 - diagramme enthalpique

Alors que la technologie piston nous impose une injection liquide avant la chambre de compression, la technologie Scroll nous permet d'injecter directement en cours de compression, entre les spirales.



3. Réduction de puissance des pompes à chaleur

L'efficacité énergétique des systèmes de chauffage par pompe à chaleur constitue un enjeu considérable. Les performances énergétiques saisonnières doivent être continuellement améliorées. La variation de puissance est une des voies d'amélioration. Celle-ci permet d'adapter le fonctionnement de la machine au plus près des besoins thermiques des locaux à traiter et de réduire les consommations énergétiques.

L'intérêt des systèmes à puissance variable est :

- une augmentation du coefficient de performance saisonnier,
- une température intérieure plus stable permettant un confort de chauffage supérieur pour l'utilisateur
- une réduction des pics d'intensité de courant de démarrage.

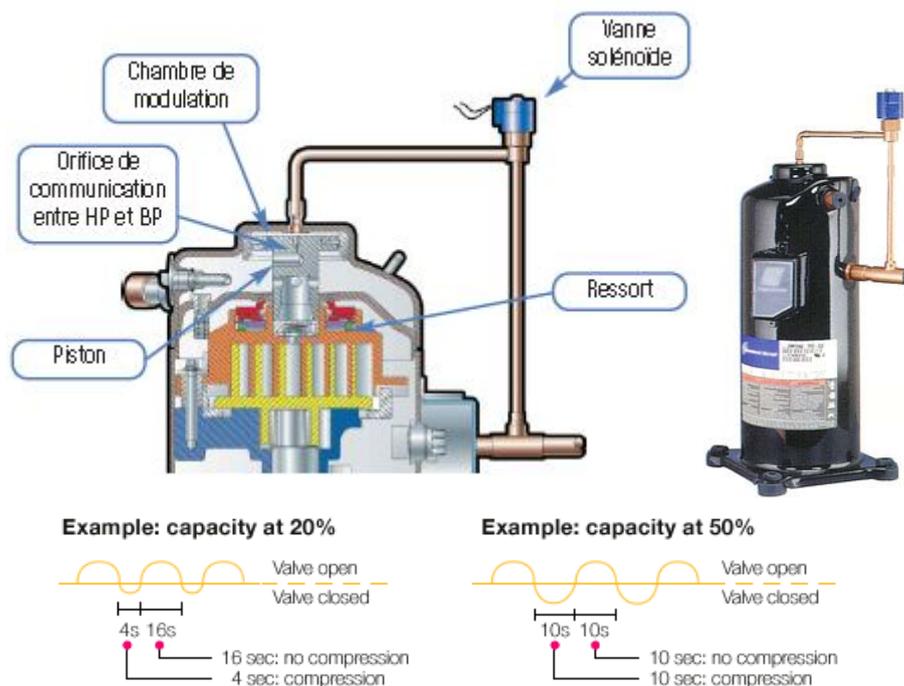
Le Copeland digital scroll, les systèmes bi-compresseurs, la variation de vitesse sont les technologies, les plus connues de variation de puissance.

3.1 Le Copeland digital scroll

Pour permettre un changement continu de la capacité frigorifique, le système agit en haussant la spirale fixe en réponse à la diminution de la demande. Ce fonctionnement est possible grâce à une vanne solénoïde à deux voies entre l'aspiration et le refoulement du compresseur.

Le compresseur Digital Scroll fonctionne selon deux modes : chargé et non chargé.

Lorsque l'électrovanne externe du compresseur reçoit un signal de 220 V, la spirale supérieure se déplace d'1 mm environ. Le déplacement de la spirale supérieure crée alors un espace entre les deux spirales. Aucun joint axial n'étant présent entre les deux spirales, alors que le moteur fonctionne, le compresseur est incapable de comprimer le réfrigérant. À l'état chargé, la capacité est de 100 %. À l'inverse, elle est de 0% à l'état déchargé. La capacité délivrée par le compresseur est une moyenne entre le temps passé à l'état chargé et celui passé à l'état déchargé. Par exemple, sur un cycle de 20 secondes, si les spirales sont chargées pendant 10 secondes et déchargées pendant 10 secondes, la capacité délivrée est de 50 %.



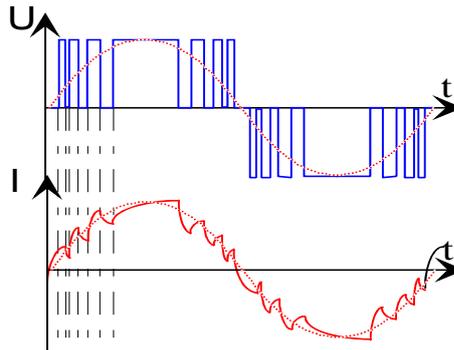
3.2 Technologie Inverter

a) Principe de la variation de vitesse (variateur de vitesse électronique)

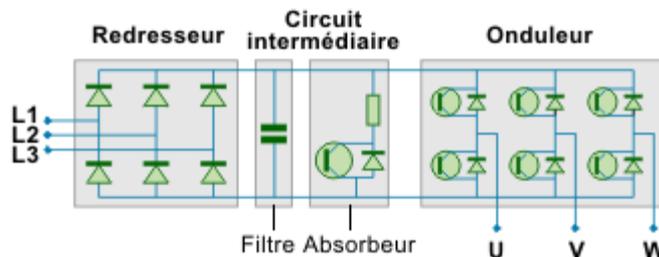
La vitesse de rotation d'un moteur asynchrone dépend de sa construction et de la fréquence du réseau d'alimentation.

Si la fréquence est divisée par 2 (Exemple 25Hz au lieu de 50Hz) la vitesse de rotation est deux fois plus petite que la vitesse nominale.

Pour un bon fonctionnement du moteur (rendement) le courant créé doit être le plus proche possible d'une sinusoïde

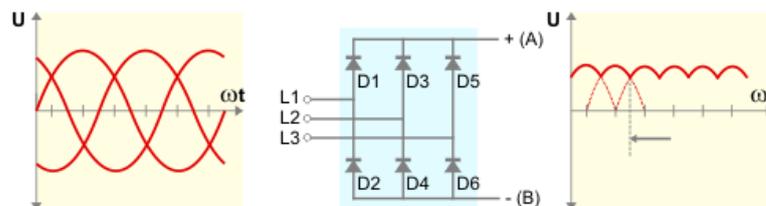


Le variateur de vitesse est composé essentiellement :



a) d'un redresseur

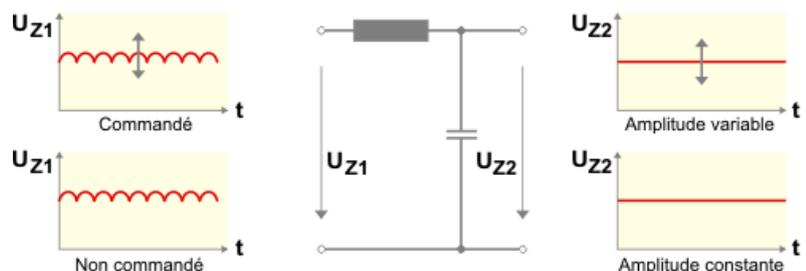
Connecté à une alimentation triphasée (le réseau), génère une tension continue à ondulation résiduelle (le signal n'est pas parfaitement continu). Le redresseur peut être de type commandé ou pas, Pour obtenir une tension continue à la sortie du redresseur, il est nécessaire de trouver un système qui permette d'exploiter les deux alternances; c'est le pont de diodes. Le pont de diodes permet, de générer une tension continue en redressant l'alternance négative de chacune des trois tensions composées.



b) un circuit intermédiaire

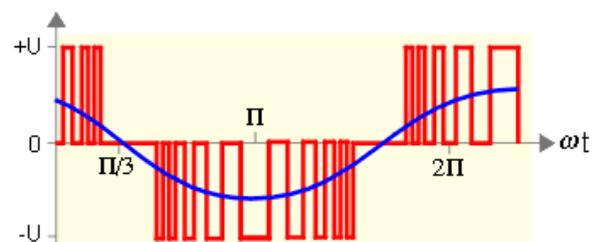
agissant principalement sur le "lissage" de la tension de sortie du redresseur (améliore la composante continue).

Ce type de circuit intermédiaire caractérise les variateurs à source de tension. Il est composé d'une bobine (ou self) de lissage "passe bas" (filtration des basses fréquences) et d'un condensateur "passe haut" (filtration des hautes fréquences) permettant de réduire l'ondulation résiduelle.



c) d'un onduleur

transformant la tension continue fournie par le redresseur en une tension alternative (mono- ou triphasée) de fréquence réglable alimentant le ou les moteurs. Cette tension n'est pas une vraie sinusoïde : la sinusoïde est "reconstituée" par des trains d'impulsions de longueur modulée et de hauteur fixe.



d) Un régulateur permettant de piloter le convertisseur au moyen d'un signal de consigne variable.

Ceci permet de faire dépendre la vitesse de n'importe quelle loi choisie en fonction de l'application.

- vitesse fonction d'une différence de pression;
- vitesse fonction d'une température;
- vitesse fonction d'une différence de température.

avantages :

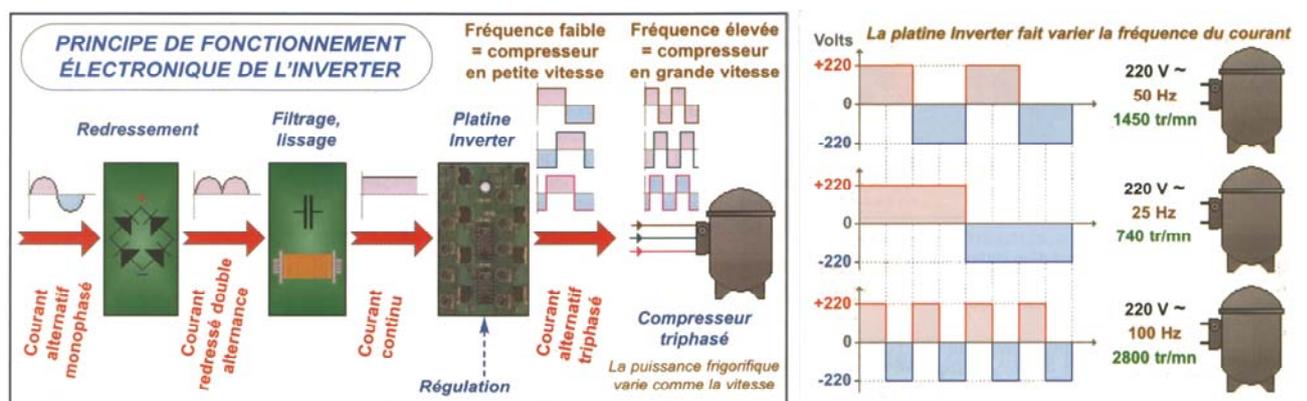
- Grande fiabilité.
- Permet le contrôle du démarrage du moteur (couple et intensité de courant).
- Permet de fixer des limites haute et basse de vitesse, pour définir une plage de réglage.
- La vitesse nominale correspondant aux 50 Hz du réseau, peut être dépassée.
- Le $\cos \phi$ est bon (environ 0,9). Une compensation n'est donc pas nécessaire.
- Accroît la longévité des roulements.
- Permet de résoudre les problèmes de bruits dus à la mise en résonance de certaines parties de l'installation en ne modifiant que légèrement la vitesse de rotation.

Les **inconvénients** peuvent être (plus ou moins importants selon les marques) :

- Le coût
- Création d'harmoniques et d'interférences radio. Ceux-ci peuvent être gênants pour le réseau où ils engendrent des perturbations, nuisibles en particulier pour l'informatique (l'adjonction d'un filtre peut être nécessaire (coût supplémentaire))

" Les compresseurs " Inverter "

Ce système utilise des compresseurs qui ont la capacité de moduler leur vitesse (variateur de fréquence, 15Hz à 115 Hz), c'est à dire leur capacité et donc le débit de réfrigérant, et ceci pour permettre d'adapter instantanément la puissance en fonction des besoins thermiques.



IV. DESCRIPTION DES SYSTEMES

Les principaux systèmes sont les suivants :

Systeme	Distribution	Source
Sol/Sol	avec capteurs enterrés horizontaux et plancher chauffant.	Sol
Sol /Eau	avec capteurs enterrés horizontaux et plancher chauffant *.	
Eau/Eau	avec capteurs enterrés (horizontal ou vertical) et plancher chauffant ou plancher chauffant / rafraîchissant *.	
Air/Eau	avec plancher chauffant ou plancher chauffant / rafraîchissant *	Air
Air/Air	monobloc, split system ou multisplits	

* Avec, éventuellement, ventilo-convecteurs ou radiateurs BT.

IV.1. LES PAC GEOTHERMALES (pompes à chaleur avec capteur enterré (sol-sol ; sol-eau ; eau glycolée-eau)

" On appelle PAC géothermales, les pompes à chaleur couplées avec le sol "

Avantages des systèmes

- Les températures de la source de chaleur sont plus constantes que les systèmes qui utilisent l'air comme source de chaleur
- Contrairement au système sur l'air, il n'y a pas de dégivrage.
- La pompe à chaleur peut couvrir l'ensemble des besoins en chauffage.
- La chaleur du sol provient de la chaleur solaire stockée dans la couche superficielle du sol et de la migration de l'humidité à travers le sol.
- La grande inertie thermique du sol fait que les variations brutales de la température extérieure n'ont aucune influence. A partir de 0,50 [m] pas de sensibilité aux gelées et aux phénomènes d'échange thermique de la surface avec l'atmosphère .

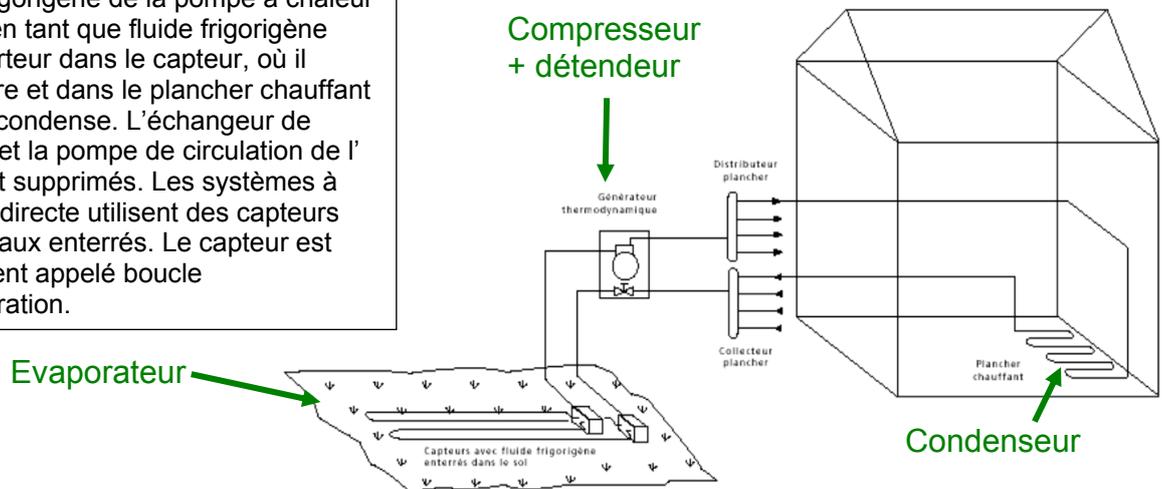
Deux types de PAC sur sol sont à considérer :

- PAC avec capteurs enterrés horizontalement à détente directe (**PAC sol/..**) ,
- PAC avec capteur enterrés verticalement ou horizontalement ou sondes géothermiques avec fluide intermédiaire (**PAC eau glycolée/...**) .

1. Les PAC géothermales avec capteurs enterrés horizontalement à détente directe

a) Les PAC Sol/sol parfois appelées gaz/gaz

Dans les systèmes à détente directe, le fluide frigorigène de la pompe à chaleur circule en tant que fluide frigorigène calorporteur dans le capteur, où il s'évapore et dans le plancher chauffant où il se condense. L'échangeur de chaleur et la pompe de circulation de l'eau sont supprimés. Les systèmes à détente directe utilisent des capteurs horizontaux enterrés. Le capteur est également appelé boucle d'évaporation.



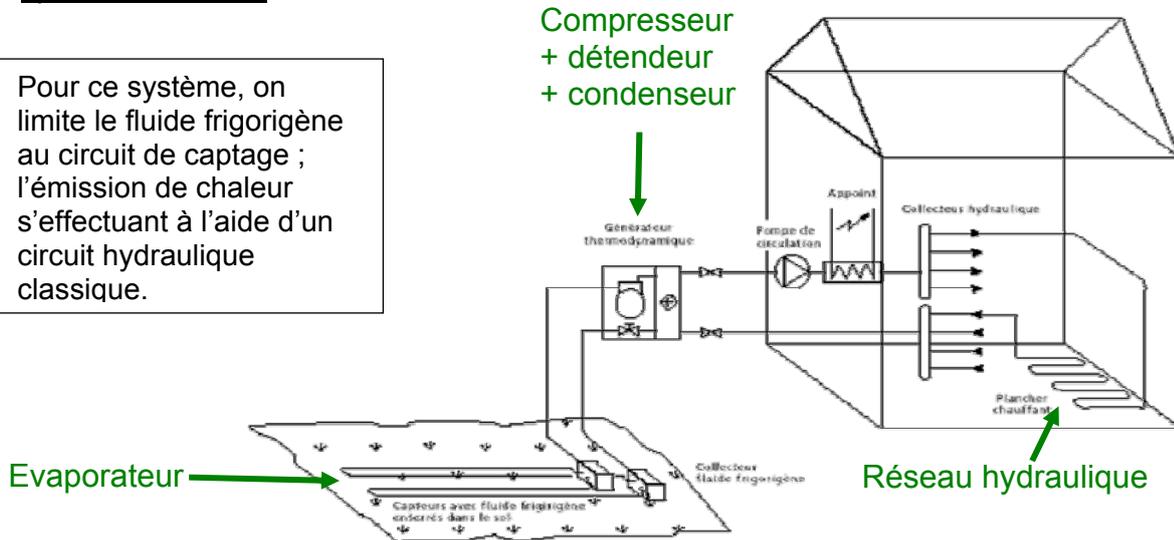
La taille de l'installation de la source de chaleur est calculée en fonction de la puissance frigorifique de la pompe à chaleur et de l'extraction de chaleur spécifique depuis le sol. Aucun appoint n'est installé.

Le système est composé :

- ❑ **D'une pompe à chaleur de type "sol/sol"** La pompe à chaleur est composée d'un compresseur, d'un détendeur et des différents organes de sécurité et de contrôle constituant ainsi le générateur du système.
- ❑ **D'un capteur enterré (évaporateur)** Le capteur extérieur est composé de tubes en cuivre frigorifique, gainés de polyéthylène . Ce capteur est enterré à 60 cm environ de profondeur sur une surface proportionnelle à la surface à chauffer. La boucle du fluide frigorigène ne doit pas comporter de raccords inaccessibles (parties soudées, joints vissés) dans le sol. Si de tels raccords sont inévitables (en cas de réparation), ils doivent être exécutés par un technicien qualifié, testés et isolés avec des matériaux appropriés contre la corrosion.
- ❑ **D'un circuit de distribution (condenseur)** Le circuit de distribution est assuré par un plancher chauffant basse température composé de tubes en cuivre frigorifique et gainés de polyéthylène.

b) Les PAC Sol/eau

Pour ce système, on limite le fluide frigorigène au circuit de captage ; l'émission de chaleur s'effectuant à l'aide d'un circuit hydraulique classique.

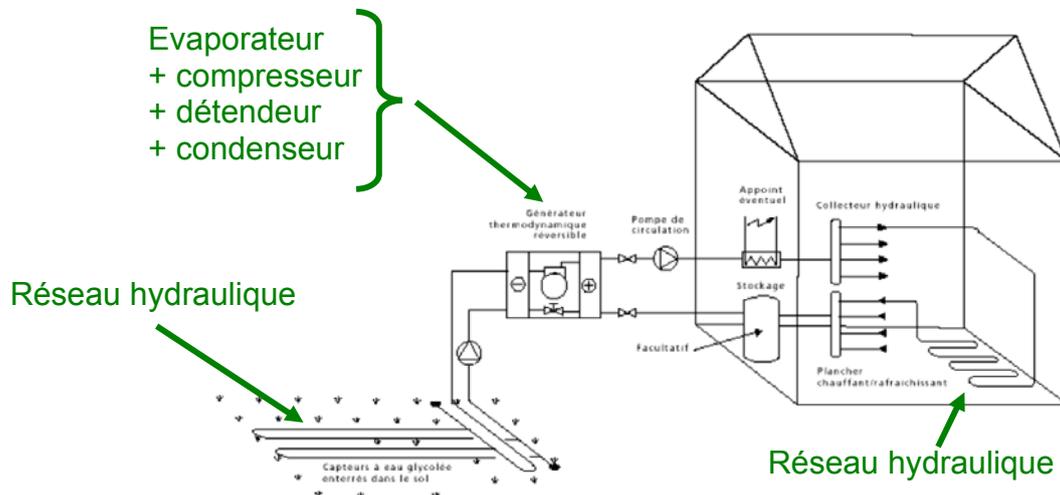


Le système est composé:

- ❑ **D' une pompe à chaleur de type "sol- eau" :** La pompe à chaleur de type "sol - eau" est composée d'un compresseur, d'un détendeur et d'un échangeur à plaques (le condenseur) constituant ainsi le générateur du système.
- ❑ **D'un capteur enterré (évaporateur) :** Le capteur extérieur est composé de tubes en cuivre frigorigère gainés de polyéthylène haute densité. La profondeur de creusement des tuyaux du capteur doit être comprise entre 0.2 m et 0.3 m sous la profondeur sujette au gel (cela donne une profondeur de 0.6 m environ) . La puissance d'extraction spécifique varie de 10 à 40 W/m².
- ❑ **D'un circuit de distribution** Le circuit de distribution est composé d'un module hydraulique permettant la distribution de l'eau de chauffage. Le plancher chauffant composé de tube en polyéthylène réticulé (PER) . La distribution peut également être réalisée par des ventilo-convecteurs, ou des radiateurs basse température.

2. Les PAC Eau glycolée/eau

Ceux sont des PAC géothermales avec capteurs enterrés horizontalement ou verticalement à fluide intermédiaire (de l'eau glycolée). Pour les capteurs verticaux, on parle de sondes géothermales.



" Comme pour le système " sol/ eau" nous retrouvons : "

❑ **Une pompe à chaleur de type " eau glycolée - eau"** La pompe à chaleur de type "eau glycolée - eau" est composée d'un compresseur, d'un détendeur et **deux échangeurs à plaques** (un évaporateur et un condenseur) constituant ainsi le générateur du système. Ce circuit frigorifique permet de valoriser l'énergie récupérée dans le capteur extérieur par l'intermédiaire de l'eau glycolée (circuit fermé) et de la transférer dans le circuit de distribution.

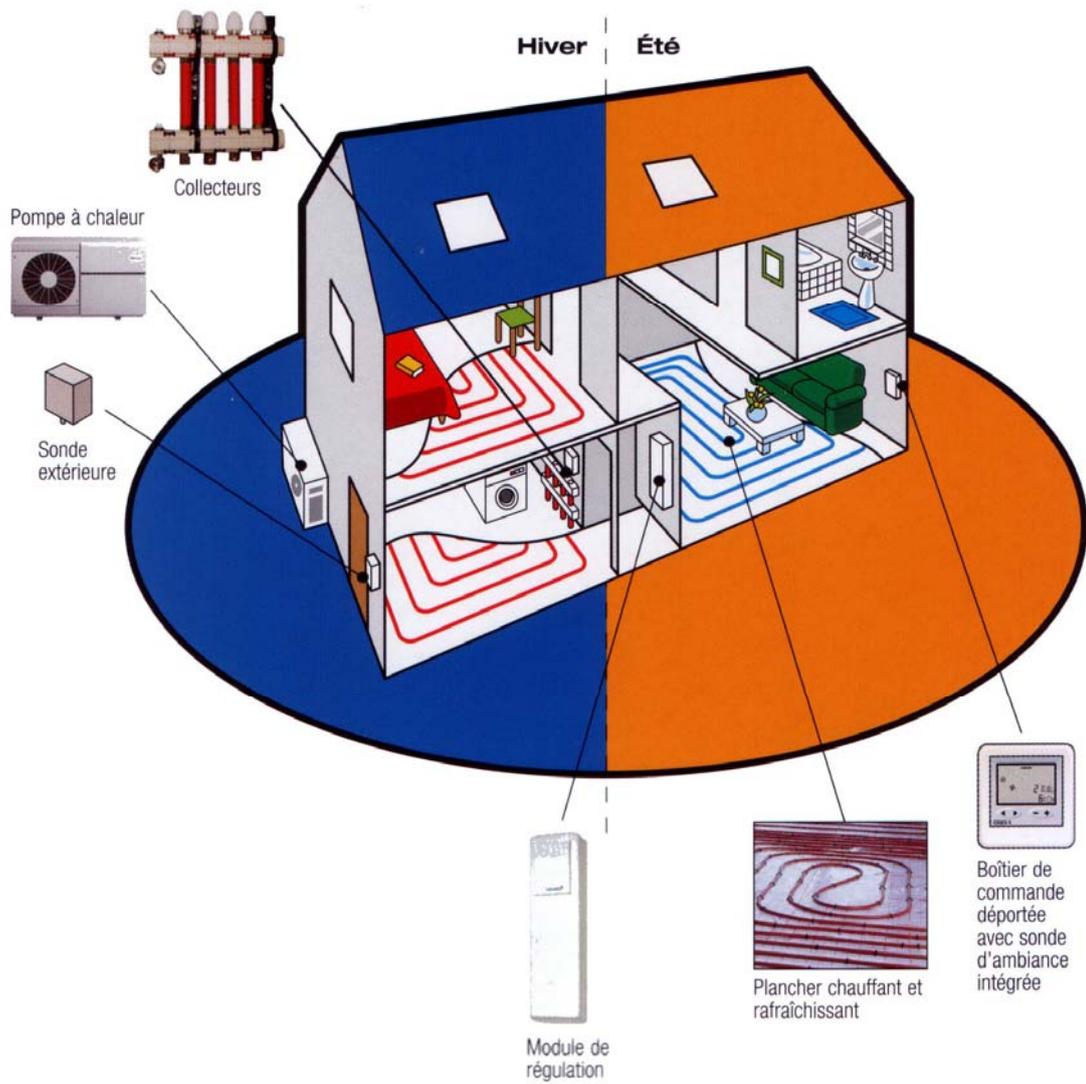
❑ **Un capteur enterré** Le capteur extérieur est composé de tubes en polyéthylène de 25 [mm] à 40 [mm] de diamètre raccordés sur un ensemble de collecteurs distributeurs. Par l'intermédiaire de l'eau glycolée circulant dans les tubes, le capteur permet de prélever la chaleur du sol extérieur. **Les tubes en matériau synthétique (PE) seront placés dans une fouille allant de 0,60 à 1,2 -1,5 m de profondeur et parallèlement les uns aux autres avec un écart de 0,5 m environ de façon à ce qu'il y ait 3 m environ de tube en place par m² de surface de captage.** Les "serpentins" de tubes ne dépassent généralement pas une longueur de **100 m** afin d'éviter que les pertes de charge et donc la puissance à fournir par la pompe ne soient excessives. Les extrémités des tubes sont raccordées à des collecteurs de départ et de retour placés un petit peu plus haut que les tubes eux-mêmes afin de permettre le dégazage des tubes.

❑ **Un circuit de distribution** Plancher chauffant, radiateurs basse température, ventilo-convecteurs...

Si la surface du terrain est insuffisante pour positionner le capteur, il est possible d'installer à la verticale une sonde géothermique; dans cette option, la chaleur est puisée à grande profondeur (jusqu'à 100 m) dans le sol.

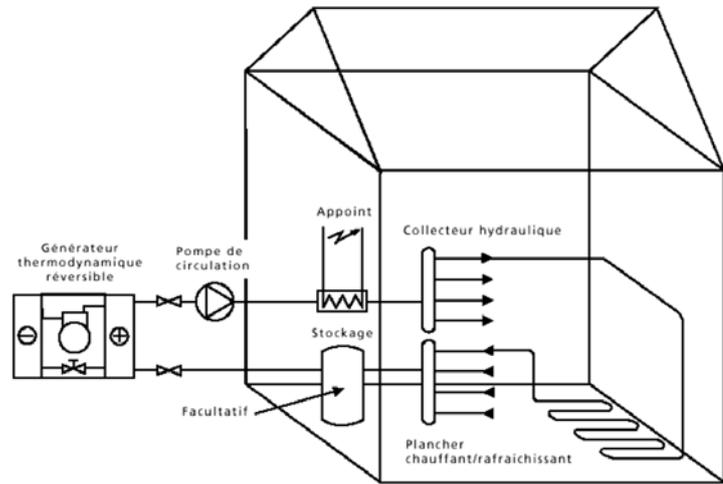
IV.2. LES PAC dont la source froide est l'air extérieur (Aérothermie)

1. Les PAC Air/eau

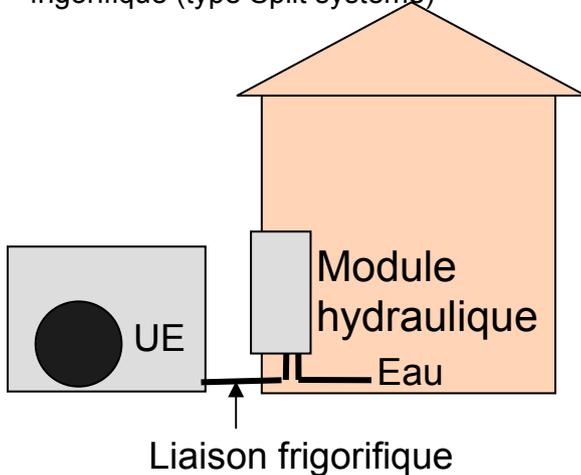


Dans ce type d'installation la pompe à chaleur est composée d'un échangeur à air et d'un échangeur à eau.

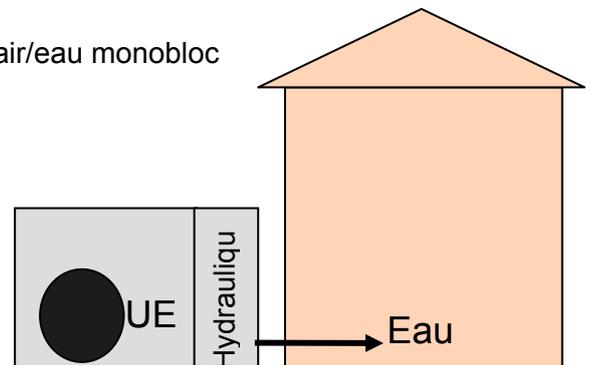
L'échangeur à air permet au fluide frigorigène d'échanger de la chaleur avec l'air extérieur. L'échangeur à eau, quant à lui, assure les échanges thermiques entre le fluide frigorigène et de l'eau (ou de l'eau glycolée). Un compresseur et un détendeur permettent d'assurer, respectivement, la compression du fluide et l'alimentation de l'évaporateur en frigorigène. Un circuit de distribution permet d'acheminer



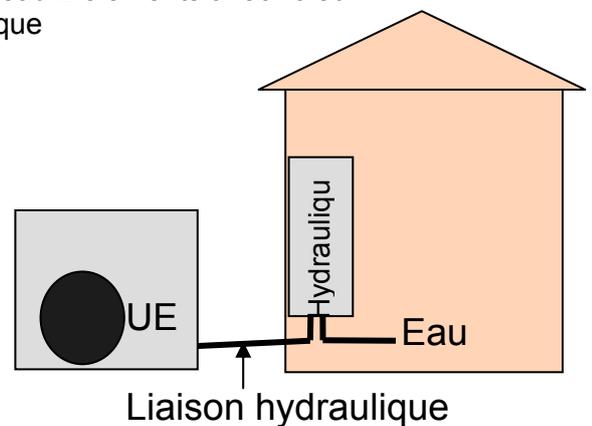
PAC air/eau 2 éléments avec liaison
frigorigère (type Split système)



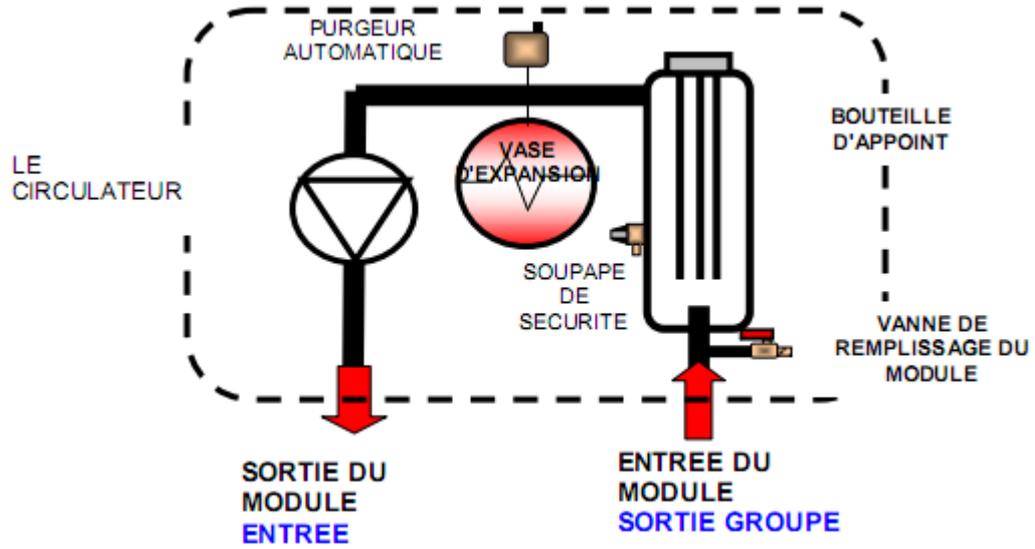
PAC air/eau monobloc



PAC air/eau 2 éléments avec liaison
hydraulique



Détail du module hydraulique :

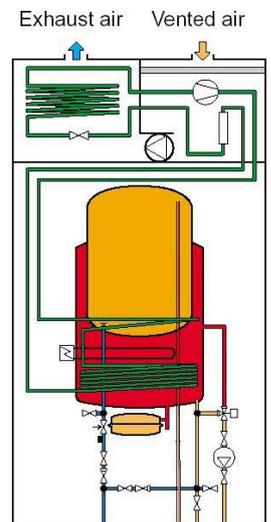


IV.3. AUTRES SYSTEMES

Beaucoup de systèmes de récupération peuvent être imaginés, en voici 2 exemples commercialisés aujourd'hui en France :

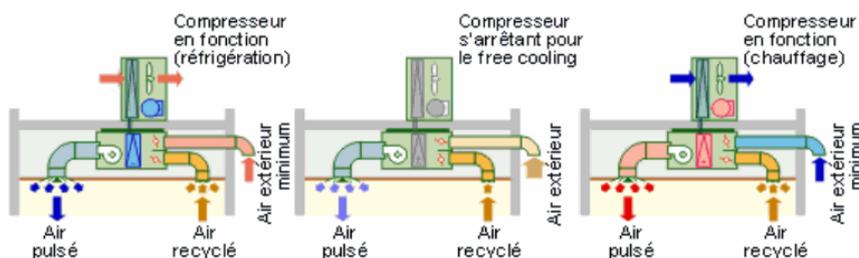
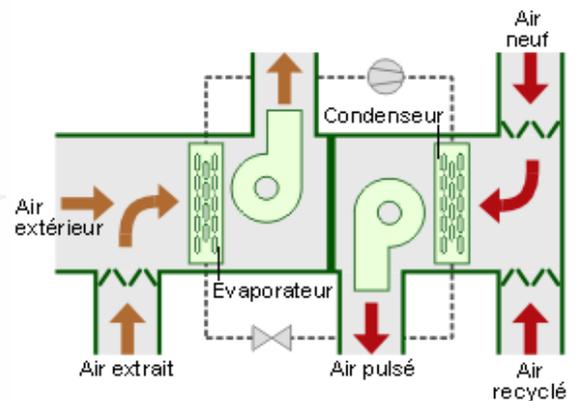
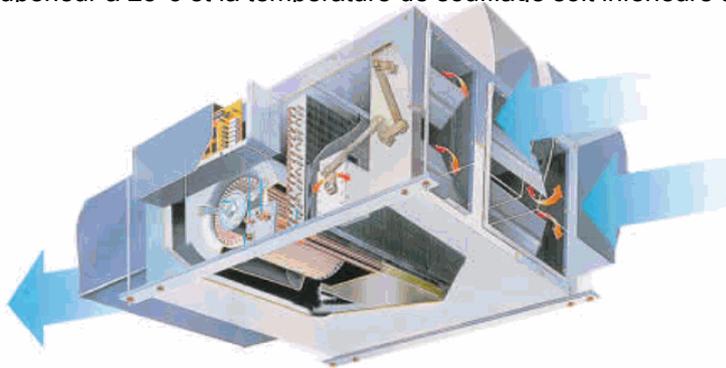
1. PAC air extrait/eau

Dans une résidence normale, les besoins de ventilation sont souvent équivalents à un changement d'air complet toutes les 2 heures. Environ 1/3 de nos besoins en chauffage servent à chauffer l'air de ventilation. Dans une pompe à chaleur sur air extrait, une grande partie de la chaleur de l'air évacué par la ventilation est prélevée avant qu'il ne quitte la maison. La température de l'air extrait est abaissée dans l'évaporateur de la pompe à chaleur – souvent une batterie à ailettes spiralées placée dans la conduite d'évacuation d'air. L'énergie extraite est ensuite redirigée, à l'aide de la pompe à chaleur, vers le système de radiateurs et/ou d'eau chaude sanitaire.



2. PAC air extrait/air neuf (double flux thermodynamique)

La sélection de l'unité thermodynamique s'effectue selon sa puissance calorifique disponible et les débits d'aération utilisés, de telles sortes que, en fonctionnement et pour les conditions moyennes d'hiver, l'écart entre la température de soufflage et la température de l'air extérieur soit supérieur à 25°C et la température de soufflage soit inférieure à 45°C.



VMC double flux thermodynamique



Caisson de VMC double flux thermodynamique

3. PAC eau/eau (source froide : nappe phréatique)

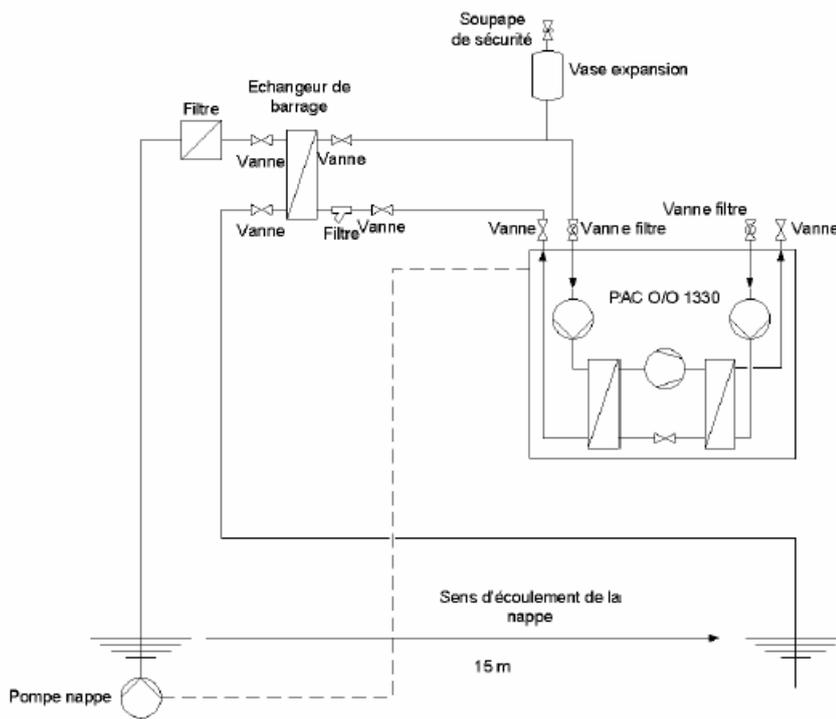
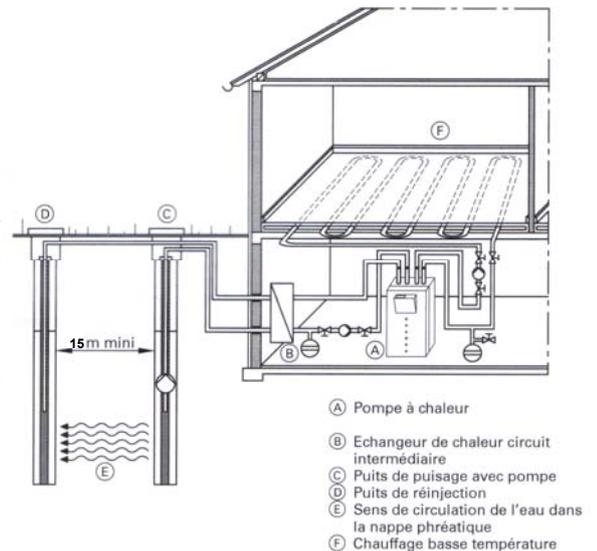
L'utilisation des nappes phréatiques devra être autorisée par l'Agence de l'eau.

On réalisera un puits de puisage et un puits de réinjection pour permettre l'utilisation de la chaleur.

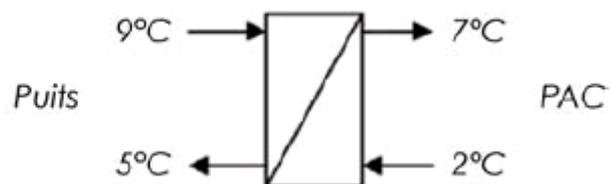
En règle générale, la qualité de l'eau devra correspondre aux valeurs limites indiquées dans le tableau ci-dessous, selon les métaux mis en oeuvre dans l'échangeur de chaleur : acier inoxydable (Z 5 CND 17.12, désignation française) et cuivre. Si ces valeurs limites sont respectées, le fonctionnement du puits ne posera, en règle générale, pas de problèmes.

S'il est impossible de respecter les valeurs limites pour le cuivre, on devra employer un échangeur de chaleur en **acier inoxydable** comme échangeur de chaleur circuit intermédiaire

Si l'eau provient de lacs et d'étangs, un circuit intermédiaire devra être impérativement prévu.



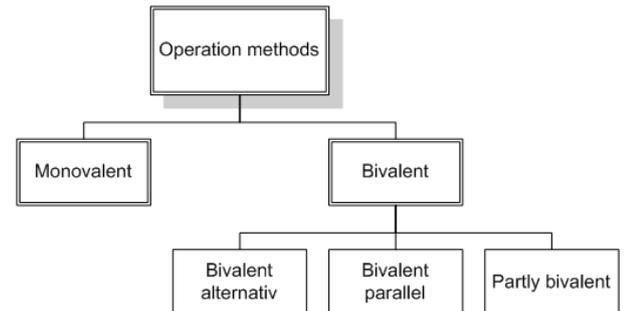
ΔT côté puits = $4^{\circ}C$
 ΔT côté PAC = $5^{\circ}C$



V. REGULATION DES POMPES A CHALEUR

V.1 MODES DE FONCTIONNEMENT

En fonction du choix de la source de chaleur, de la taille de la pompe à chaler, du système de chauffage et de la tâche que la pompe à chaleur doit remplir, le système de pompe à chaleur peut être conçu pour fonctionner selon différents modes :



1) Fonctionnement monovalent

La pompe à chaleur est ici l'unique générateur de chaleur.

Elle couvre donc 100% des besoins en chauffage, soit 120 % des déperditions du logement (**D**). Les pompes à chaleur monovalentes sont économiques dans les cas où le facteur d'utilisation est élevé et/ou la source de chaleur a une température élevée.

De manière générale, les pompes à chaleur eau/eau ou eau glycolée/eau sont exploitées en mode monovalent.

Puissance des PAC sol/sol ; sol/eau ; eau glycolée/eau :

$$P_{pac} = 1,2 \times D$$

2) Fonctionnement bivalent

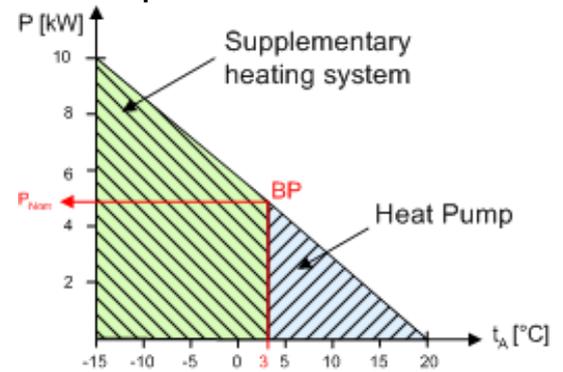
Dans les installations **bivalentes**, le chauffage est produit par le biais de deux sources d'énergie distinctes, c'est-à-dire que la **pompe à chaleur** fonctionne aux côtés d'un **système de chauffage d'appoint**. Le point d'équilibre ou point de bivalence est la **température extérieure** la plus basse à laquelle la pompe à chaleur peut couvrir seule la charge calorifique. À des températures inférieures à celle-ci, la source de chaleur complémentaire intervient automatiquement. Enfin, la PAC est coupée lorsque la température extérieure est encore plus basse (limite de fonctionnement)

Le mode de fonctionnement bivalent est employé le plus souvent dans les installations de pompes à chaleur air/eau, lorsque la puissance de la pompe à chaleur est significativement réduite en raison de températures extérieures faibles.

a) Fonctionnement bivalent alternatif

En mode **bivalent alternatif**, la pompe à chaleur ne fonctionne qu'à des températures extérieures supérieures au point d'équilibre. Elle ne fonctionne jamais en même temps que le système de chauffage d'appoint. La pompe à chaleur est sélectionnée pour une puissance calorifique P_{Nom} au point d'équilibre (souvent entre 3°C et -5°C pour les pompes à chaleur air/eau). À des températures extérieures supérieures au point d'équilibre, la pompe à chaleur assume la totalité de la charge, et à des températures inférieures au point d'équilibre, la source d'appoint assume l'ensemble de la charge.

Plus le point d'équilibre est bas, plus le pourcentage de chauffage assumé par la pompe sur une base annuelle est élevé. Pour les systèmes air/air et air/eau – en particulier dans les climats très humides –, il faut prendre en compte la puissance nécessaire pour le dégivrage de l'évaporateur.

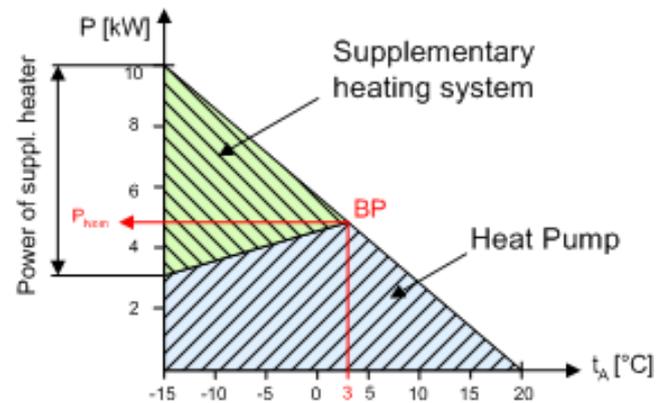


b) Fonctionnement bivalent parallèle

- extérieures supérieures au point d'équilibre**, la pompe à chaleur assume la totalité de la charge
- inférieures au point d'équilibre**, la pompe fonctionne en parallèle avec la source de chauffage d'appoint.

La pompe à chaleur est sélectionnée pour une puissance calorifique P_{Nom} au point d'équilibre. La puissance du chauffage d'appoint doit couvrir la différence entre la puissance d'entraînement des systèmes de chauffage et la puissance de la pompe à chaleur à la température extérieure la plus froide.

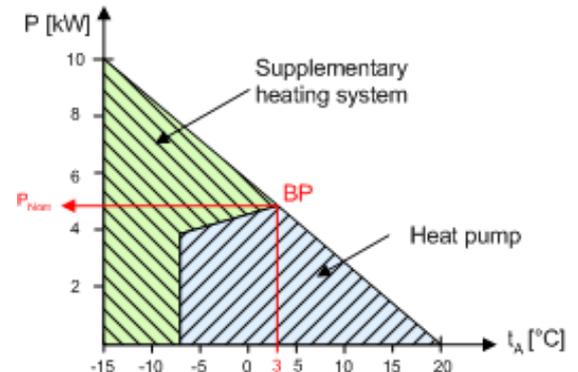
L'avantage de ce mode de fonctionnement est que des besoins en chaleur plus élevés peuvent être couverts par la pompe à chaleur et que le chauffage d'appoint nécessite une quantité inférieure de chaleur.



c) Fonctionnement bivalent « partiellement parallèle »

- extérieures supérieures au point d'équilibre**, la pompe à chaleur assume la totalité de la charge.
- comprises entre le point d'équilibre et le point d'arrêt de la pompe à chaleur**, les deux systèmes fonctionnent en parallèle.
- inférieures au point d'arrêt**, le chauffage d'appoint fonctionne seul.

La pompe à chaleur est réglée pour une puissance calorifique P_{Nom} au point d'équilibre. La puissance du chauffage d'appoint supplémentaire doit permettre de couvrir l'ensemble des besoins en chauffage à la température extérieure la plus froide. Ce système est utilisé pour les pompes à chaleur sur air dans les climats très froids, lorsque la pompe à chaleur ne peut pas fonctionner efficacement aux plus basses températures extérieures potentielles.



3) Résumé des modes de fonctionnement les plus courants

Monovalent	Bivalent alternatif	Bivalent parallèle	Bivalent partiellement parallèle
Source au sol Eau/eau	Air/eau	Air extrait	Air/eau

V.2 ASPECTS SPECIFIQUES AUX SYSTEMES DE POMPES A CHALEUR

Caractéristiques d'une pompe à chaleur

Par comparaison avec les chaudières et les calorifères électriques, au mazout ou au bois, la pompe à chaleur implique quelques restrictions et différences qu'il convient de garder à l'esprit :

Une pompe à chaleur développe :

- une puissance supérieure et un meilleur COP si la température d'alimentation du fluide frigorigène caloporteur (par ex. eau chaude pour les radiateurs) est basse.
- Une pompe à chaleur développe une puissance supérieure et un meilleur COP si la température de la source de chaleur est élevée.

La pompe à chaleur peut ne pas être en mesure de produire une température supérieure à 50 - 55°C. Cela dépend du fluide frigorigène et des détails techniques du circuit frigorifique.

L'investissement par kW que représente un système de pompe à chaleur est considérablement supérieur aux chaudières, calorifères et résistances électriques correspondants.

Utilisation optimale de la Pompe à chaleur

Des différences importantes dans les coûts d'exploitation existent entre une pompe à chaleur qui fonctionne de manière optimale et une pompe à chaleur qui fonctionne de manière « défectueuse » ou « imparfaite ».

Facteurs importants :

- La température d'alimentation doit être maintenue aussi basse que possible dans le système de chauffage.
- La pompe à chaleur doit uniquement produire de l'eau à la température nécessaire à un moment donné
- Choisir la source de chaleur possédant la température annuelle moyenne la plus élevée.
- S'assurer que le dispositif de commande n'autorise jamais le fonctionnement de la source de chaleur d'appoint si ce n'est pas nécessaire.
- Si possible, laisser la pompe à chaleur produire la chaleur pour le système de chauffage au lieu du système d'eau chaude sanitaire (priorité au chauffage), lorsqu'une source de chaleur supplémentaire est nécessaire. Cela permet d'optimiser le COP.
- Assurer l'entretien de la pompe à chaleur, par ex. nettoyer les filtres et les échangeurs de chaleur et surveiller le niveau de fluide frigorigène.
- S'assurer que la pompe à chaleur connaît le moins de démarrages et d'arrêts possibles – éviter les cycles inutiles dus à un mauvais réglage des commandes.

Principes de raccordement

Une pompe à chaleur peut être raccordée au système de chauffage de différentes manières. **La règle, toutefois, est qu'elle doit être raccordée au point du système où la température est la plus faible, c'est-à-dire sur le circuit de retour (avant le chauffage d'appoint).** La puissance et le COP de la pompe à chaleur sont ainsi optimisés.

VI. REGULATION

VI.1. LA LOI D'EAU

La loi d'eau (certains fabricants l'appellent régulation à condensation flottante ou loi de chauffe) signifie que la température d'alimentation de la pompe à chaleur est maintenue au minimum nécessaire permettant de répondre à la charge calorifique.

Exemple : Régulation par loi d'eau en fonction de la température extérieure avec sonde d'ambiance

Une sonde est placée sur la tuyauterie de retour d'eau pour mesurer cette température. Une deuxième sonde est située à l'extérieur sur la façade Nord de préférence, à l'ombre et dans un endroit bien ventilé. Une troisième sonde est située à l'intérieur du bâtiment.

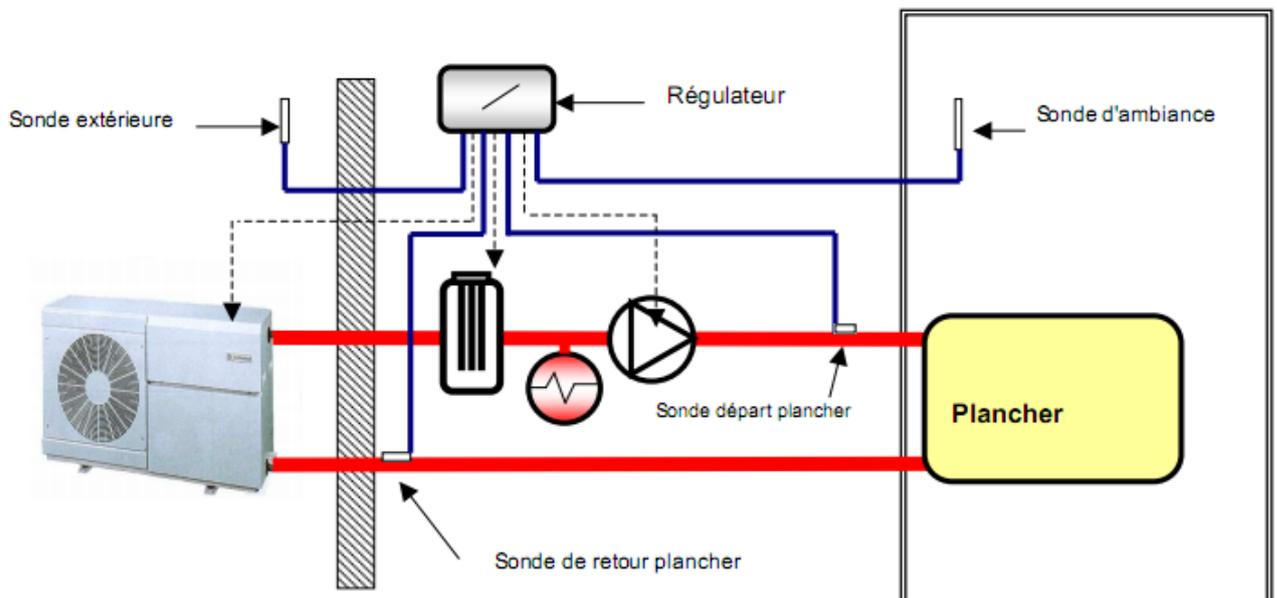


Schéma de principe régulation par loi d'eau en fonction de la température extérieure avec sonde d'ambiance.

Dans notre exemple, le régulateur détermine la température de retour d'eau du plancher chauffant en fonction de la température extérieure, et une correction sur cette loi d'eau est apportée par la sonde d'ambiance.

La sonde d'ambiance permet de tenir compte des apports gratuits (apports solaires, occupation, feu de cheminée, etc.).

La sonde d'ambiance doit être installée dans une pièce où la température sera la plus représentative du bâtiment comme le salon ou la salle de séjour.

POSITION DES SONDES

La sonde extérieure est à placer sur la façade Nord/ Nord Est de la construction à une hauteur minimum de 2,5 m.

La sonde d'ambiance est à placer à une hauteur de 1,5 m du sol à l'abri du soleil, d'une cheminée et des courants d'air.

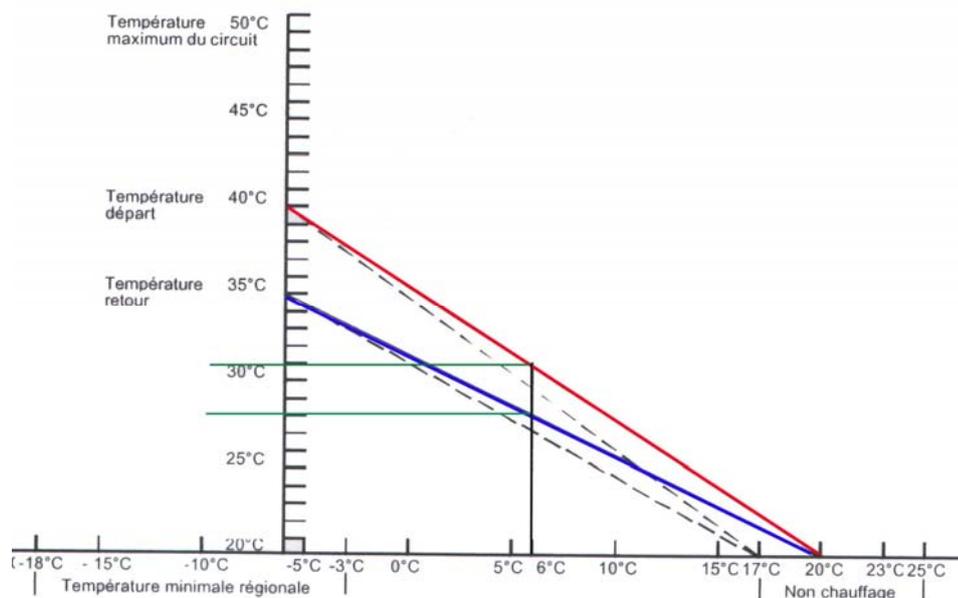
Exemple pour le réglage de la température de retour de l'eau en fonction de la température extérieure. Dans ce cas, le capteur de température se trouve en réalité sur le « retour » de la pompe à chaleur.

Conditions :

- 6°C température extérieure
- 40°C température maximum du circuit
- 20°C température de non chauffage

Pour une température extérieure de 6°C la température de départ du circuit plancher chauffant sera de 31°C et le retour à 28°C.

Elle sera de 29°C et le retour à 27°C pour une température de non chauffage de 17°C



Nota : il existe une correction automatique de courbe généralement, 1°C de + ou de - mesurée en ambiance par rapport à la consigne 2°C de + ou de - sur la résultante

Un point sur le fonctionnement " appoint "

Le fonctionnement de l'appoint est également géré par la régulation de température d'eau en fonction de la température extérieure.

L'appoint ne participe au chauffage que lorsque la pompe à chaleur ne suffit plus à assurer seule la puissance nécessaire.

La source de chauffage d'appoint est toujours placée « après » la pompe à chaleur selon le sens de circulation afin que la pompe à chaleur fonctionne à des températures aussi basses que possible.