

# COURS DE THERMODYNAMIQUE

Chapitre 1 : NOTIONS DE BASES

Chapitre 2 : ETUDE DES GAZ (PARFAITS ET REELS)

Chapitre 3 : PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

Chapitre 4 : DEUXIEME PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

Chapitre 5 : ETUDE DES MACHINES THERMIQUES

# Chapitre 5 : ETUDE DES MACHINES THERMIQUES

## 1. MACHINES A VAPEUR

1.1 Fonctionnement

1.2 Rendement

## 2. MACHINES FRIGORIFIQUES - POMPES A CHALEUR

2.1 Fonctionnement

2.2 Efficacité ou coefficient performance (COP)

2.3 Cycle de Carnot d'une machine frigorifique ou pompe à chaleur

## 3. DIFFERENTS TYPES DE POMPES A CHALEUR

3.1 Echanges directs

3.2 Echangeurs de chaleur

## Chapitre 5. MACHINES THERMIQUES

On désigne par **machines thermiques** les deux types de machines suivantes :

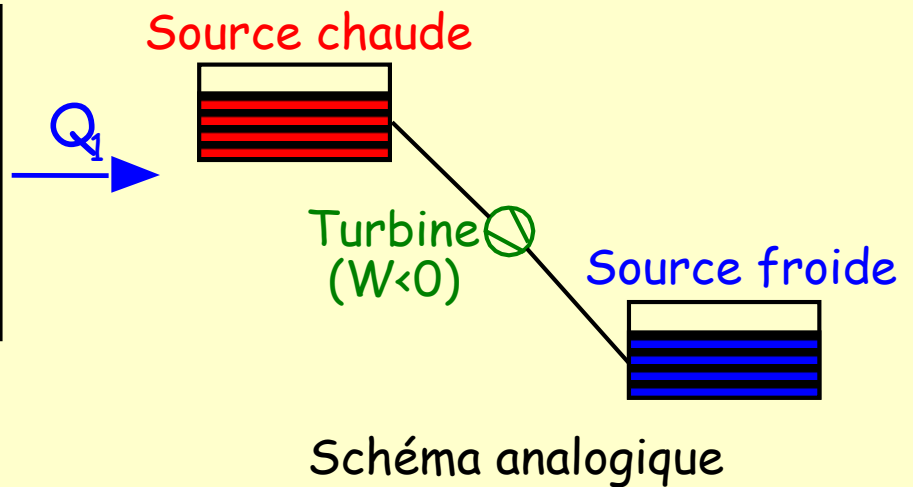
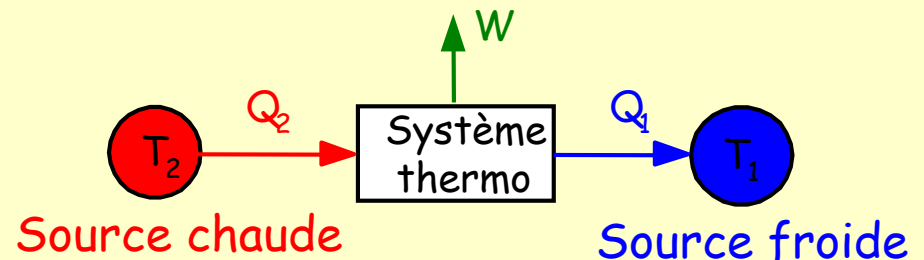
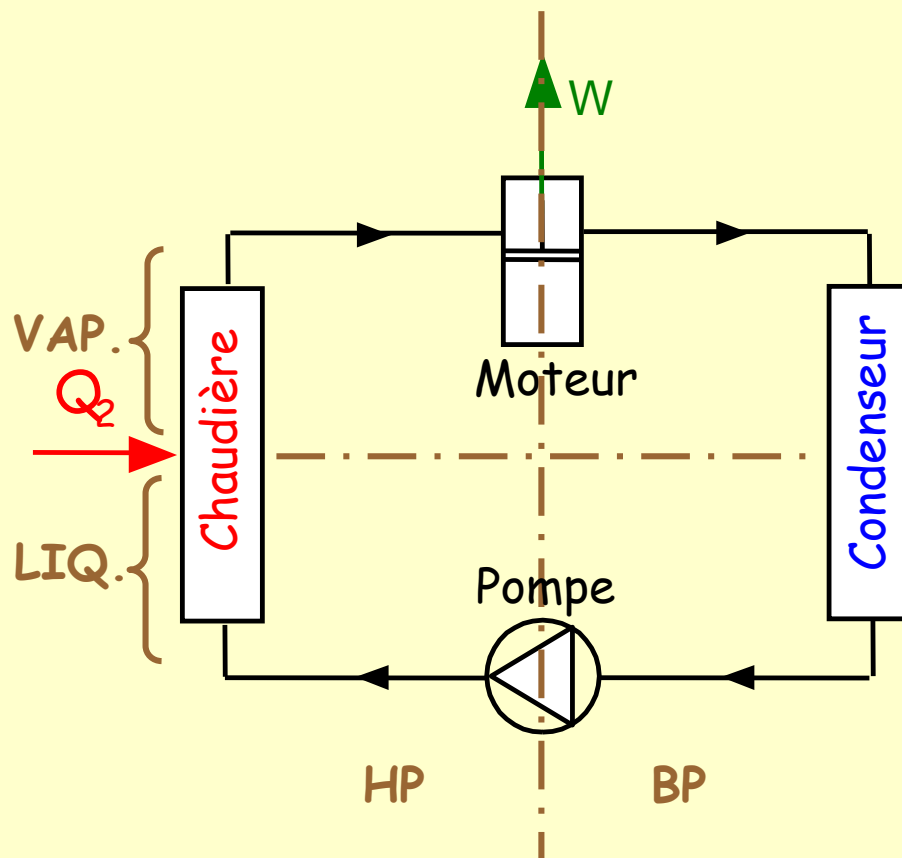
- 1 - **Machines qui convertissent de la chaleur en travail :**  
machines à vapeur, moteurs à explosion, moteurs à réaction, fusées,...
- 2- **Machines qui transfèrent de la chaleur en échangeant du travail :**  
machines frigorifiques et pompes à chaleur.

Nous développerons essentiellement l'étude des machines frigorifiques et pompes à chaleur qui interviennent en climatisation.

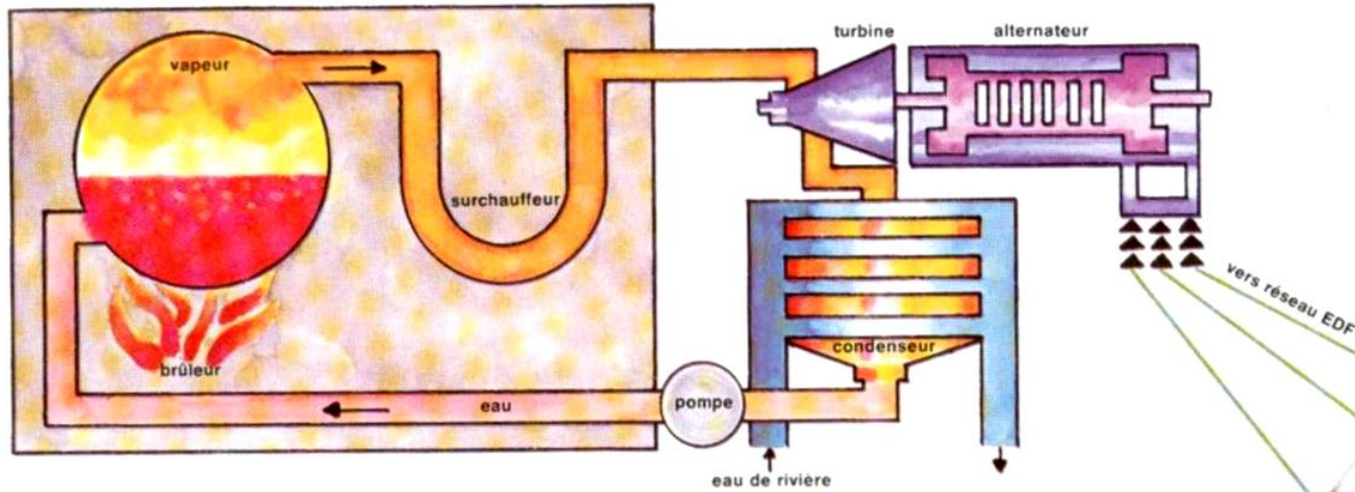
## 5.1. Machines à vapeur

Système qui évolue = **eau** (à l'état de liquide ou de vapeur).

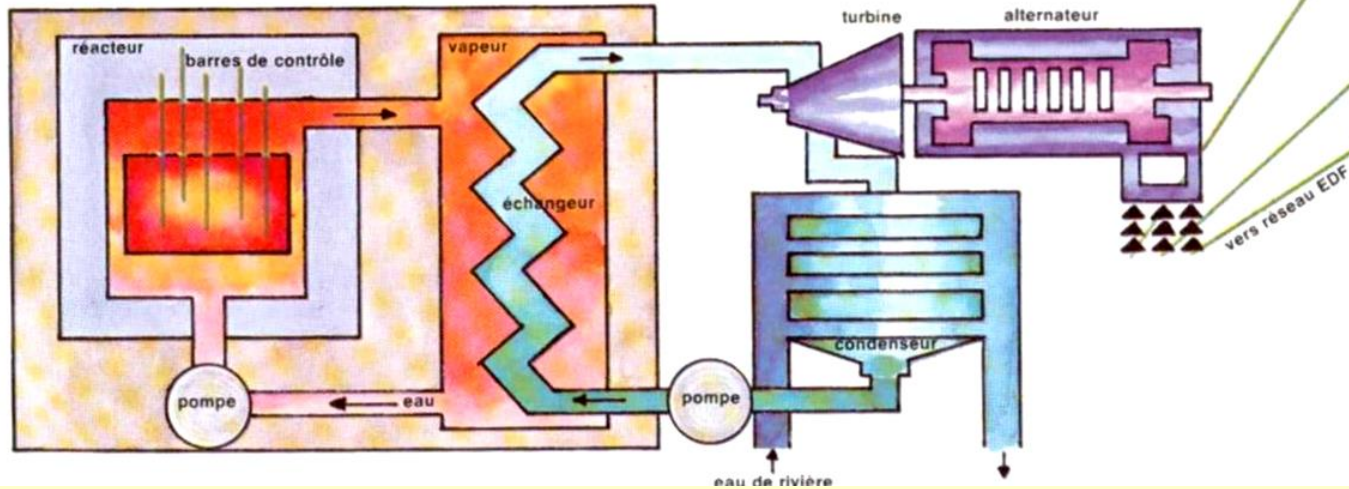
### 5.1.1 Fonctionnement



## schéma de principe d'une centrale thermique classique



## schéma de principe d'une centrale nucléaire



### 5.1.2 Rendement

La machine à vapeur est un moteur thermique. Son rendement a été calculé au paragraphe 4 du chapitre précédent.

#### *Rendement réel*

$$\eta = \frac{|W|}{Q_2} = 1 + \frac{Q_1}{Q_2}$$

#### *Rendement optimal de Carnot*

$$\eta_{\text{rév}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Le rendement d'un moteur thermique est d'autant meilleur que les températures  $T_1$  et  $T_2$  sont éloignées.

# Chapitre 5 : MACHINES THERMIQUES

## 1. MACHINES A VAPEUR

1.1 Fonctionnement

1.2 Rendement

## 2. MACHINES FRIGORIFIQUES - POMPES A CHALEUR

2.1 Fonctionnement

2.2 Efficacité ou coefficient performance (COP)

2.3 Cycle de Carnot d'une machine frigorifique ou pompe à chaleur

## 3. DIFFERENTS TYPES DE POMPES A CHALEUR

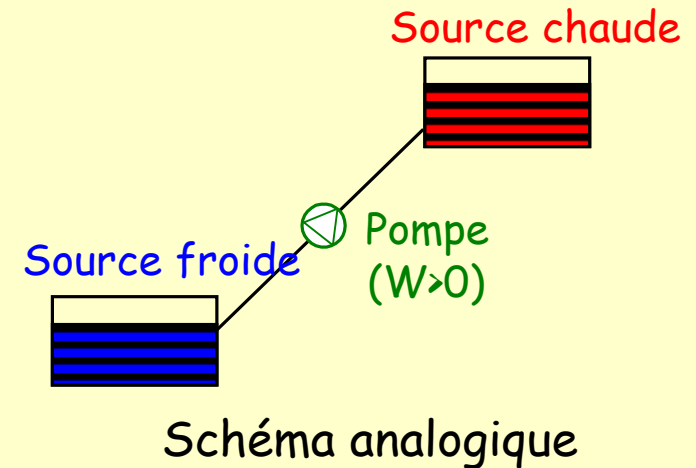
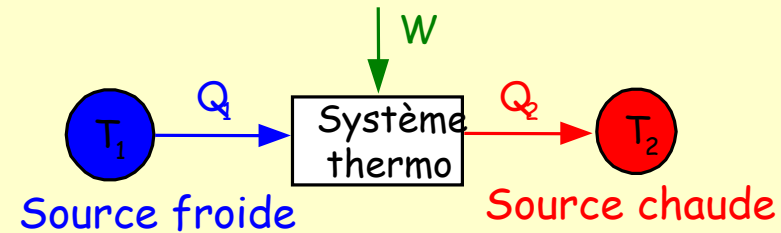
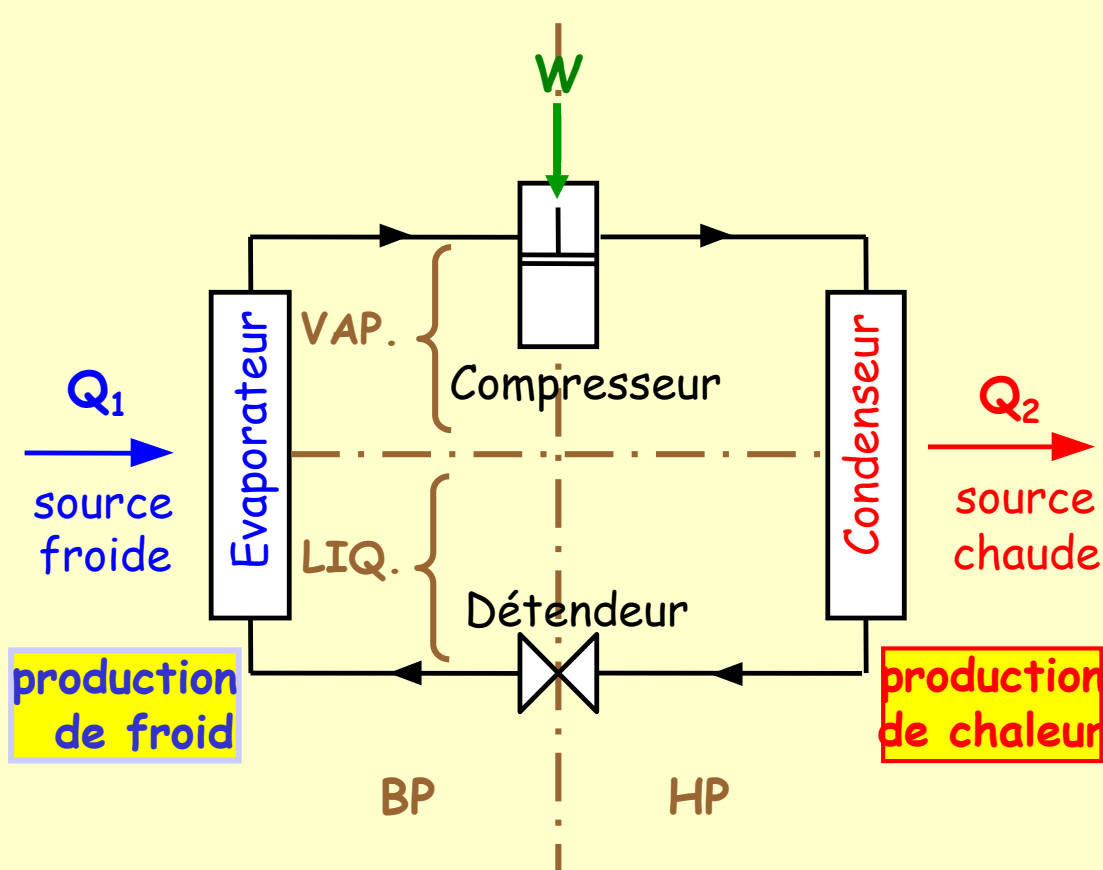
3.1 Echanges directs

3.2 Echangeurs de chaleur

## 5.2. Machines frigorifiques – Pompes à chaleur

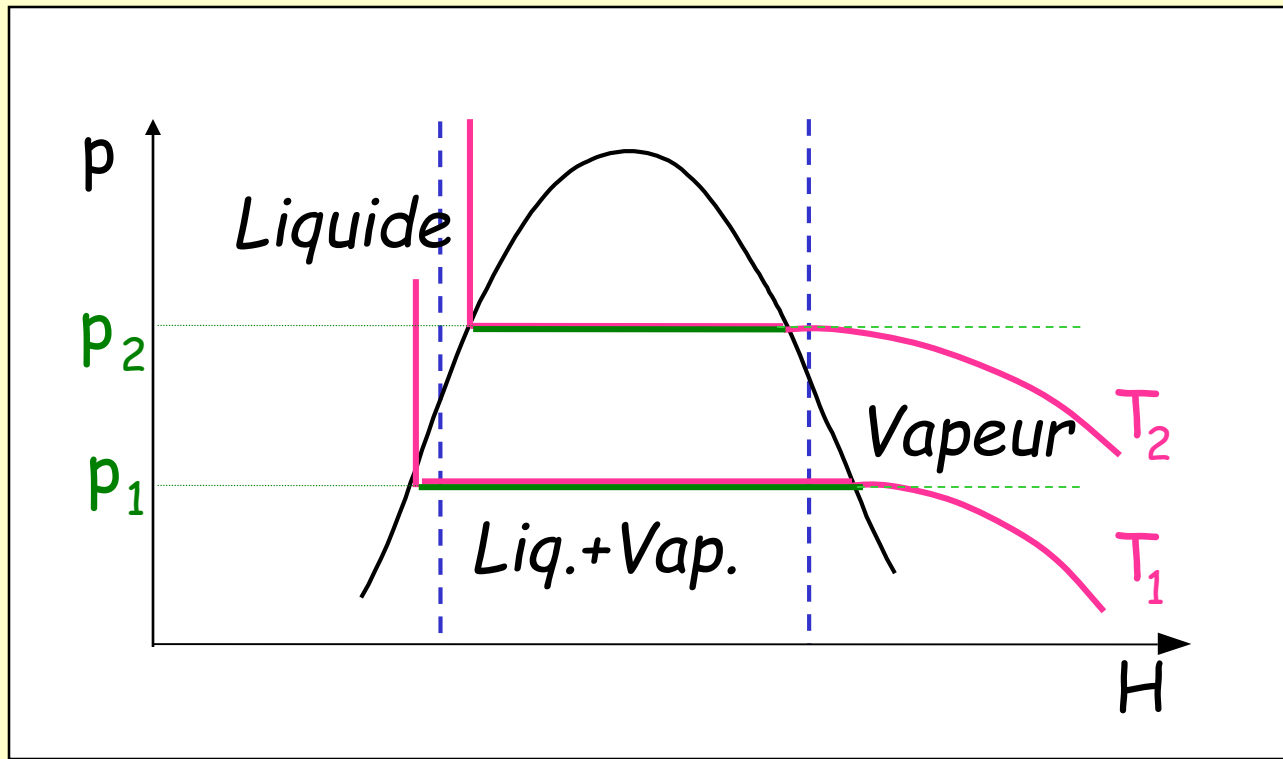
Système qui évolue = **fluide frigorigène** (couramment appelé "fréon")  
 $\text{CO}_2$  ou  $\text{NH}_3$  (grandes installations), HCFC ou HFC

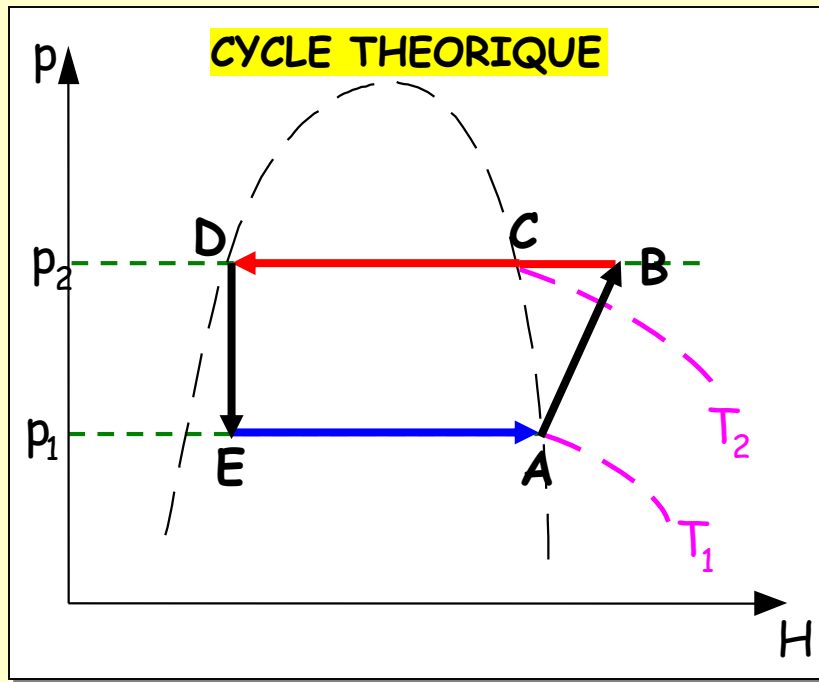
### 5.2.1 Fonctionnement: Inverse des machines à vapeur





Représentation du cycle décrit par le fluide frigorigène sur le  
diagramme de Mollier ( $p, H$ )





A : vapeur ( $T_1, p_1$ ).

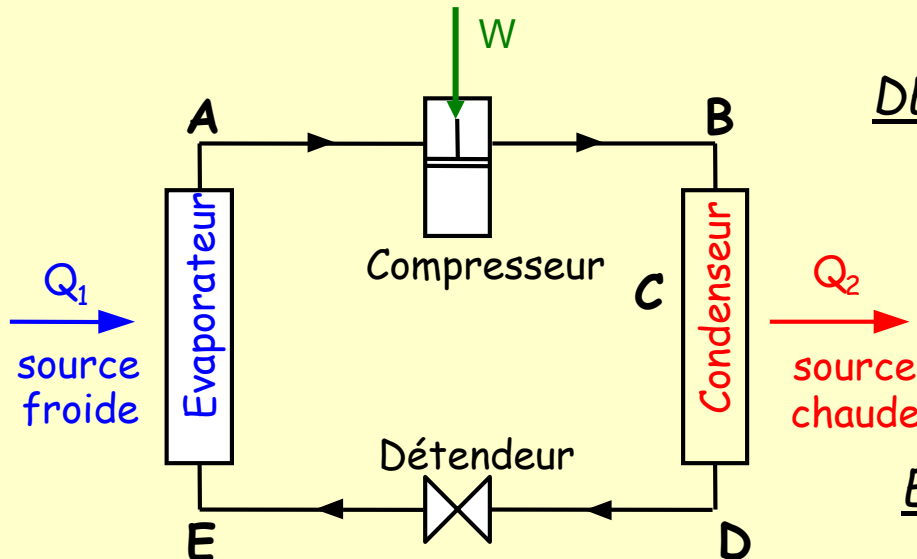
AB : compression du gaz jusqu'à  $p_2$  avec circulation de fluide.  
Si compression adiabatique (p.56)  
 $W_{AB} (> 0) = H_B - H_A \Rightarrow H_B > H_A$

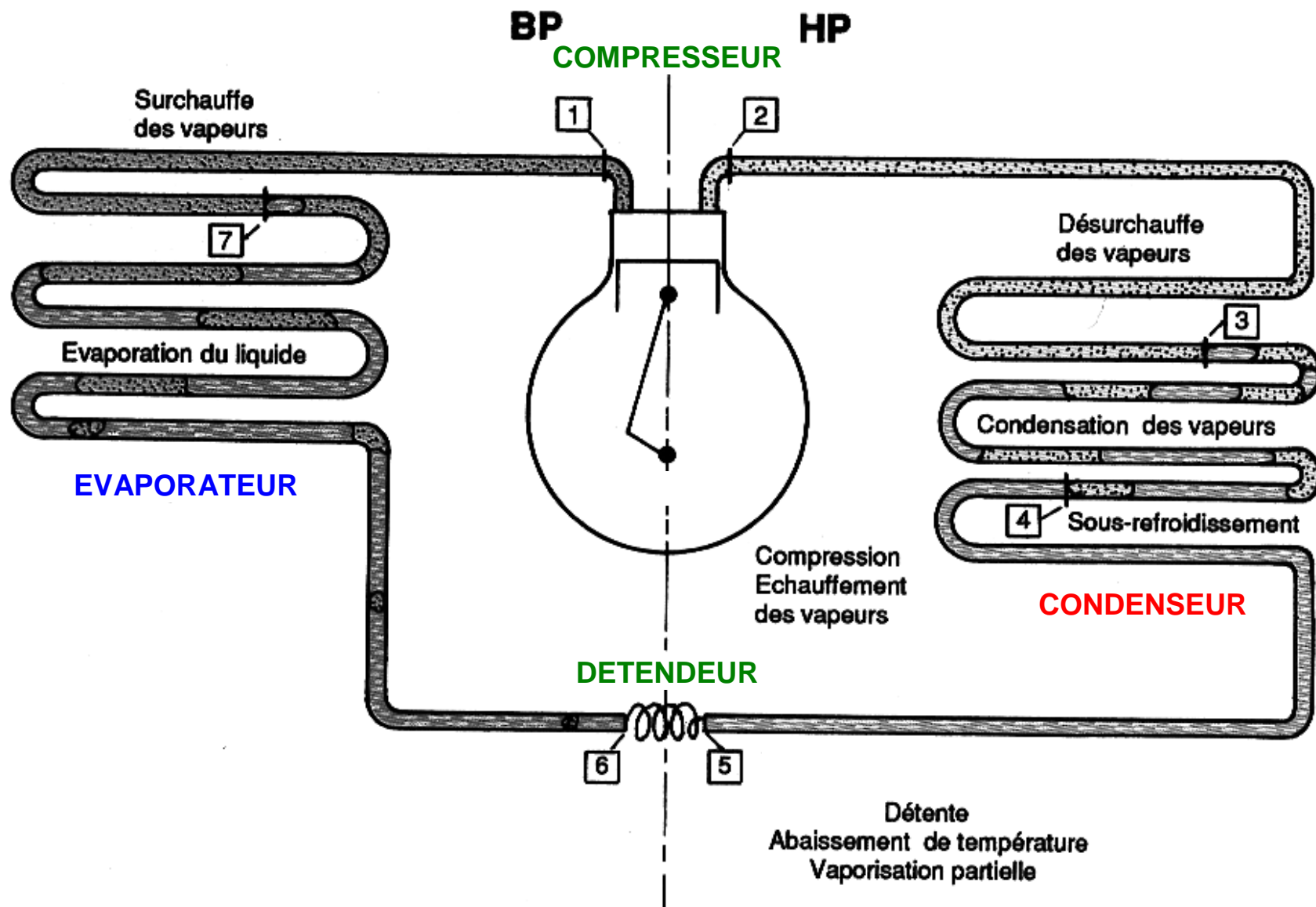
BC : refroidissement de la vapeur à  $p_2 = \text{cte}$  de  $T_B$  jusqu'à  $T_2$ .

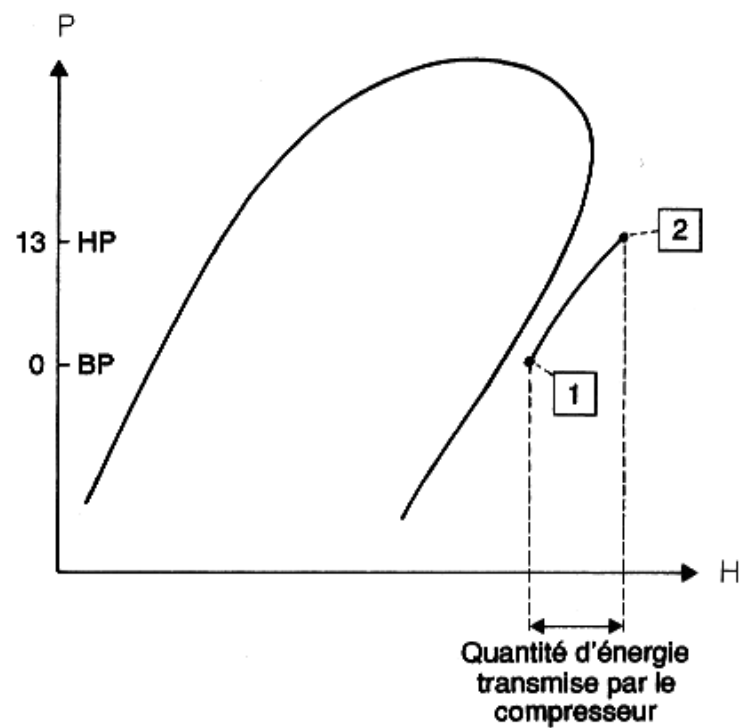
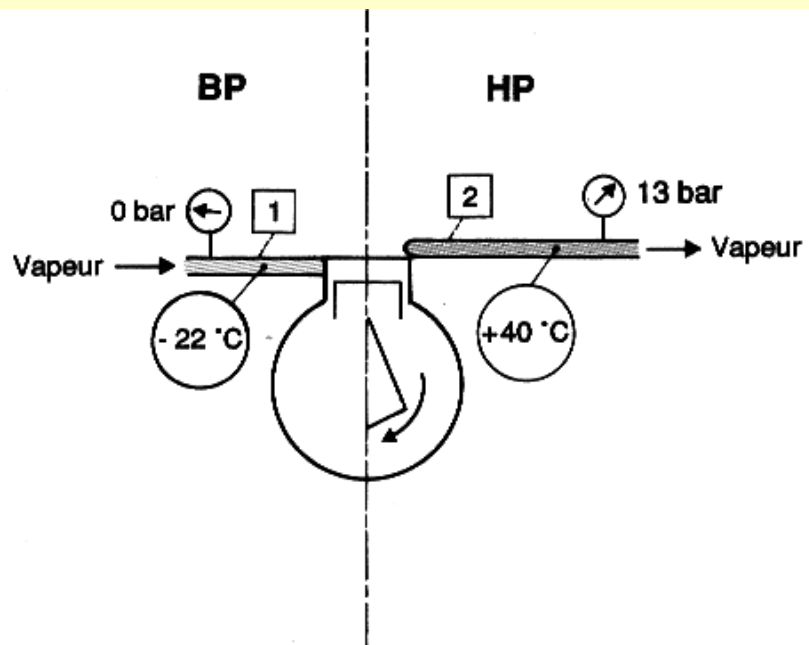
CD : liquéfaction de la vapeur à  $p_2$  et à  $T_2$ .

DE : détente du liquide jusqu'à  $p_1$  et  $T_1$  avec circulation de fluide, mais sans production de travail ( $W_{DE} = 0$ ).  
Si détente adiabatique :  
 $W_{DE} = H_E - H_D = 0 \Rightarrow H_E = H_D$   
Vaporisation partielle du liquide.

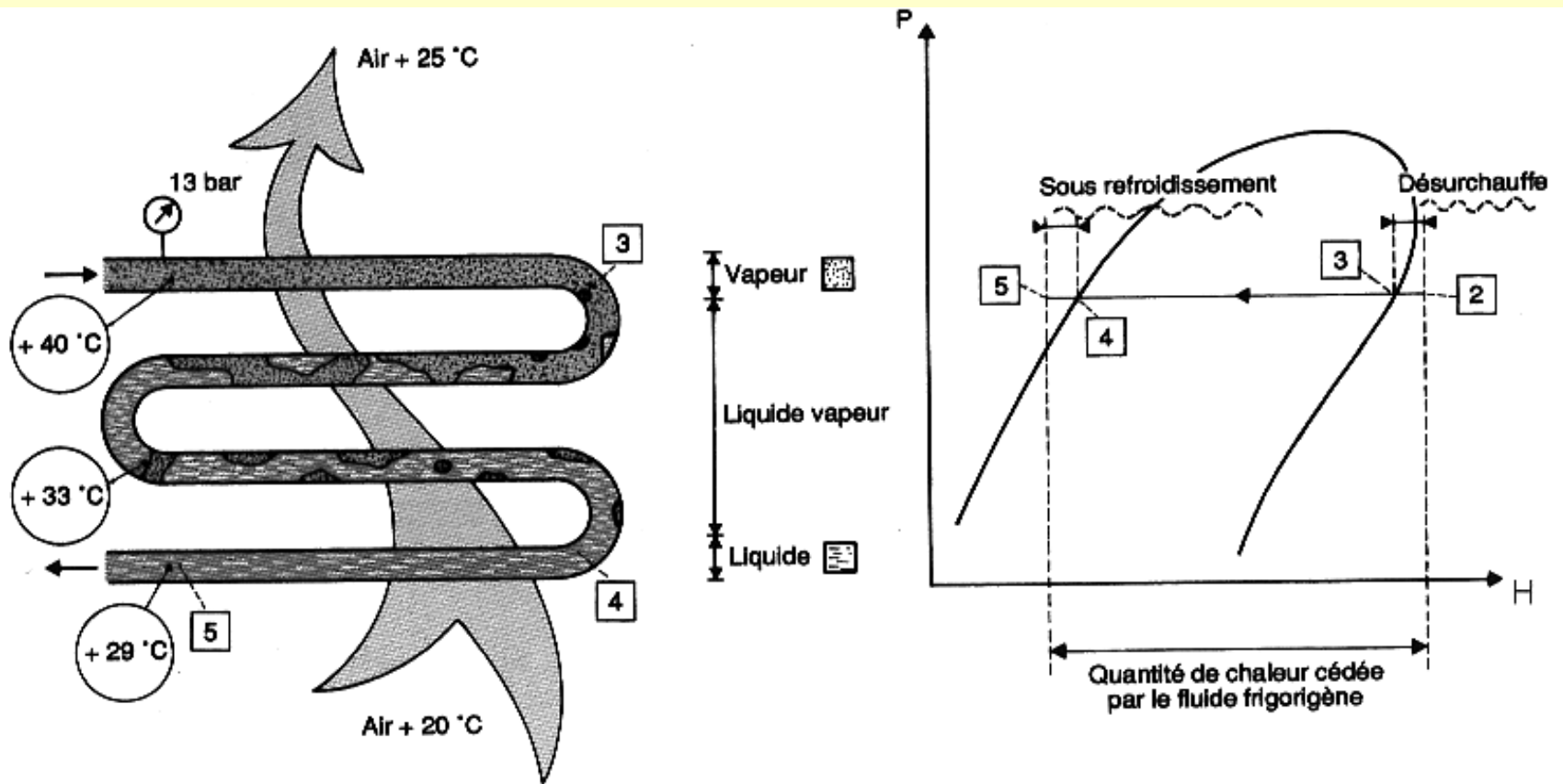
EA : vaporisation du mélange liquide + vapeur à  $p_1$  et à  $T_1$ .



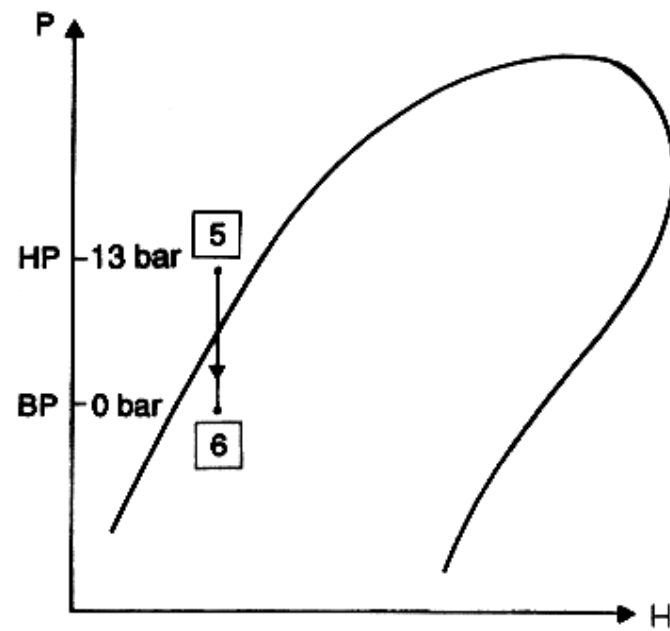
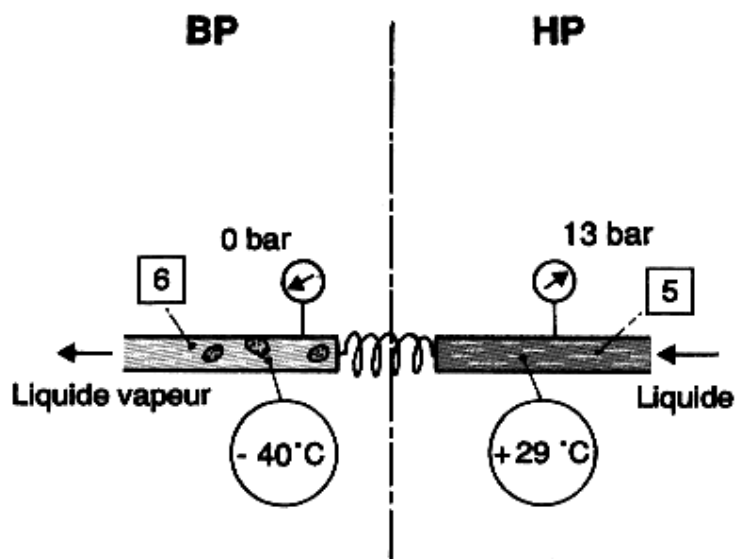




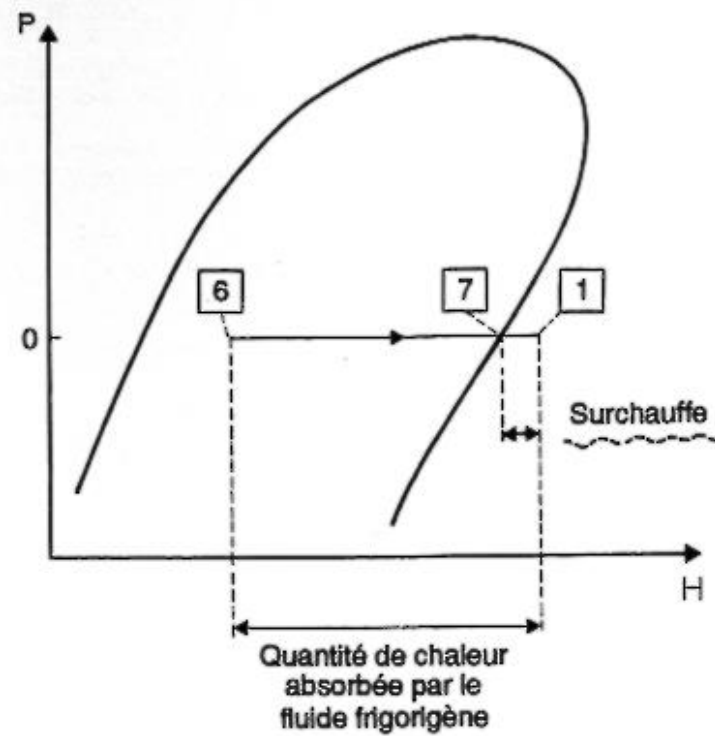
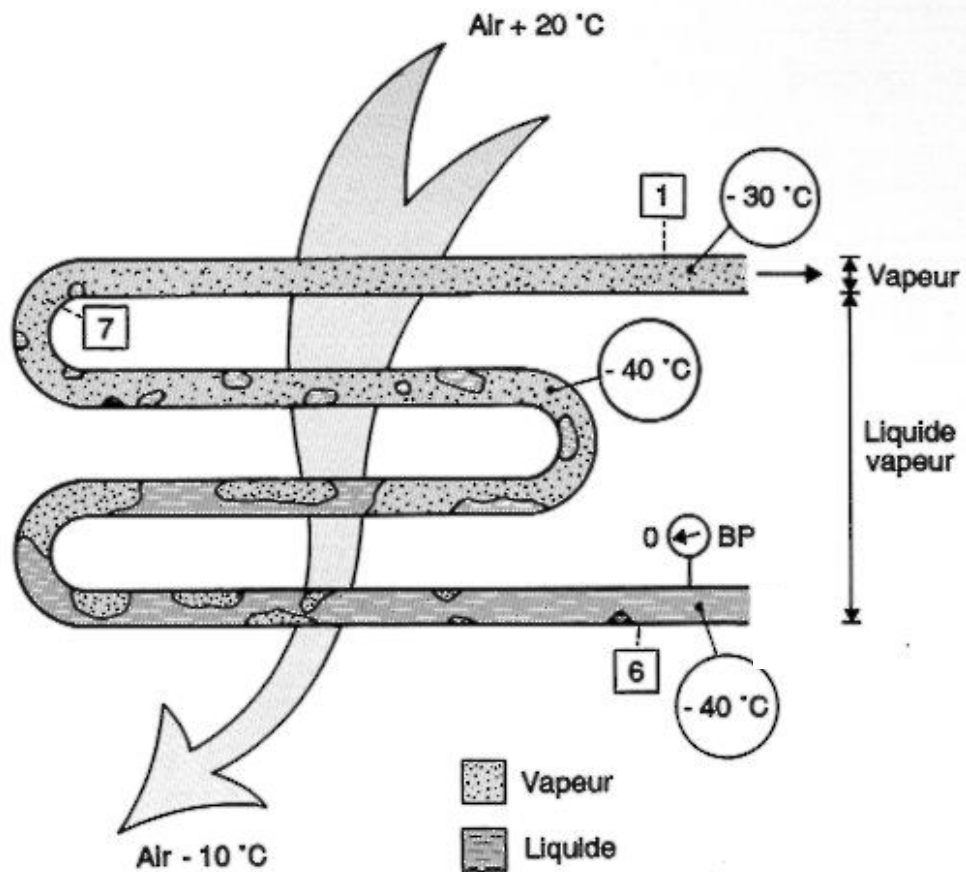
**COMPRESSEUR**



## CONDENSEUR

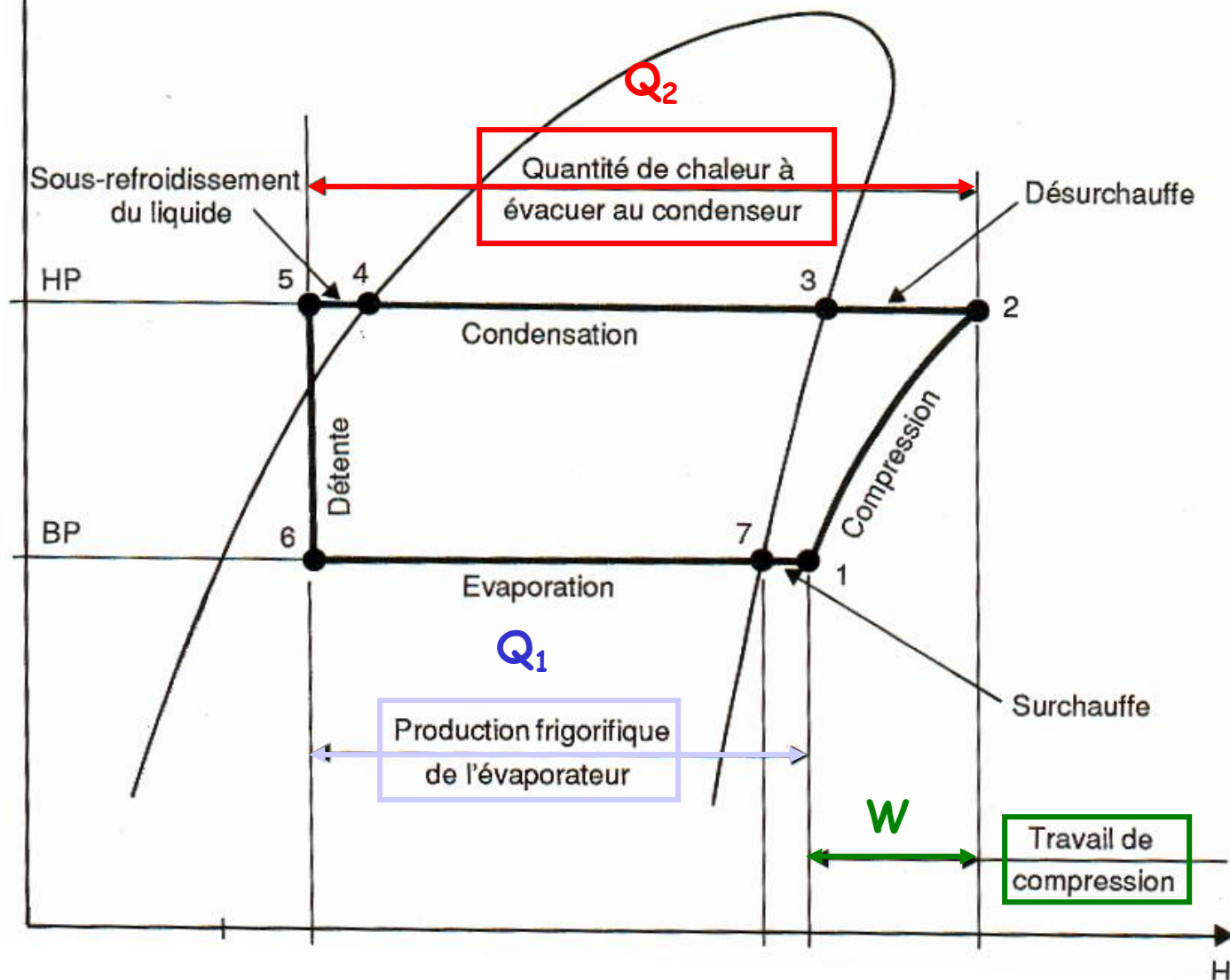


**DETENDEUR**



## EVAPORATEUR

## CYCLE PROCHE DU CYCLE REEL





### 5.2.2 Efficacité ou coefficient de performance (COP)

→ Si on s'intéresse à  $Q_1 (> 0)$  on a une machine frigorifique (mf)

$$\text{COP}_{\text{mf}} = \frac{Q_1}{W} < (\text{COP}_{\text{mf}})_{\text{Mollier}} = \frac{H_A - H_E}{H_B - H_A}$$

Transformation à pression cte :  $Q_p = \Delta H$

Compression adiabatique avec circulation de fluide  
 $W = \Delta H$

→ Si on s'intéresse à  $Q_2 (< 0)$  on a une pompe à chaleur (pc)

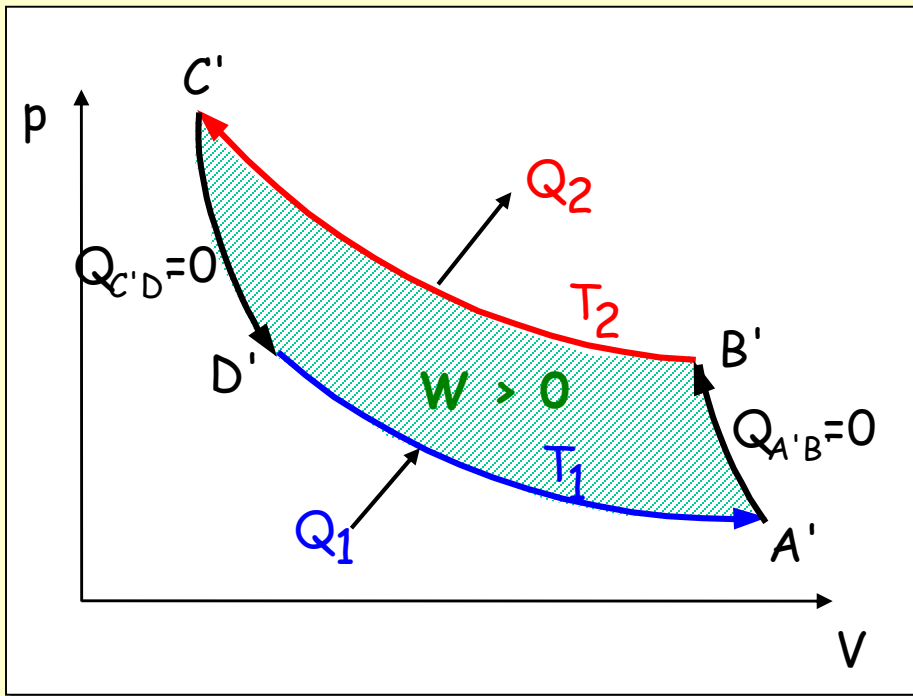
$$\text{COP}_{\text{pc}} = \frac{|Q_2|}{W} < (\text{COP}_{\text{pc}})_{\text{Mollier}} = \frac{|H_D - H_B|}{H_B - H_A}$$
$$= \frac{W + Q_1}{W} = 1 + \frac{Q_1}{W} > 1 \quad \text{L'efficacité est supérieure à 1.}$$

Cela ne doit pas choquer car la chaleur  $Q_1$  prise à la source froide ne coûte rien ; on fournit seulement le travail  $W$  nécessaire à la circulation du fluide.

### 5.2.3 Cycle de Carnot d'une machine frigorifique ou pompe à chaleur

On peut imaginer un cycle idéal (réversible) constitué de 2 adiabatiques et de 2 isothermes.

Ce cycle est décrit en sens inverse de celui d'un moteur thermique (p.63).



A'B' : compression adiabatique  
 $Q_{A'B'} = 0 ; W_{A'B'} > 0$

B'C' : compression isotherme  
( $T_2 = \text{cte}$ )  
 $Q_{B'C'} = Q_2 < 0 ; W_{B'C'} > 0$

C'D' : détente adiabatique  
 $Q_{C'D'} = 0 ; W_{C'D'} < 0$

D'A' : détente isotherme ( $T_1 = \text{cte}$ )  
 $Q_{D'A'} = Q_1 > 0 ; W_{D'A'} < 0$

$$W = W_{A'B'} + W_{B'C'} + W_{C'D'} + W_{D'A'} > 0 \text{ (surface délimitée par le cycle)}$$

## *COP optimaux correspondant à l'hypothèse de Carnot*

$$\left. \begin{aligned} (\text{COP}_{\text{mf}})_{\text{réel}} &= \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{-(Q_1 + Q_2)} \\ \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} &= 0 \quad (\text{cycle réversible}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \boxed{(\text{COP}_{\text{mf}})_{\text{rév}} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} - 1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}}$$
$$> (\text{COP}_{\text{mf}})_{\text{Mollier}} > (\text{COP}_{\text{mf}})_{\text{réel}}$$

$$\left. \begin{aligned} (\text{COP}_{\text{pc}})_{\text{réel}} &= \frac{|Q_2|}{W} = \frac{-Q_2}{-(Q_1 + Q_2)} \\ \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} &= 0 \quad (\text{cycle réversible}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \boxed{(\text{COP}_{\text{pc}})_{\text{rév}} = \frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_2}} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}}$$
$$> (\text{COP}_{\text{pc}})_{\text{Mollier}} > (\text{COP}_{\text{pc}})_{\text{réel}}$$

Les COP d'une machine frigorifique ou d'une pompe à chaleur sont d'autant meilleurs que les températures  $T_1$  et  $T_2$  sont voisines.

# Chapitre 5 : MACHINES THERMIQUES

## 1. MACHINES A VAPEUR

1.1 Fonctionnement

1.2 Rendement

## 2. MACHINES FRIGORIFIQUES – POMPES A CHALEUR

2.1 Fonctionnement

2.2 Efficacité ou coefficient performance (COP)

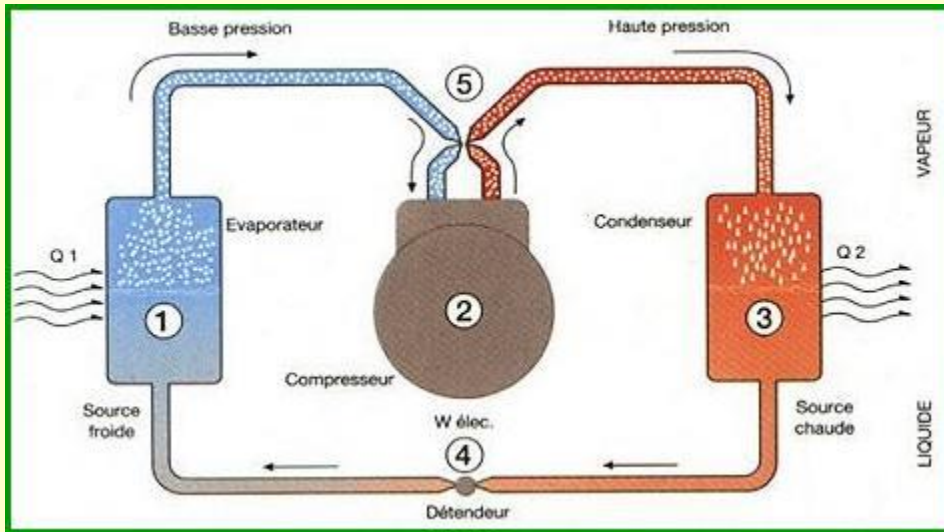
2.3 Cycle de Carnot d'une machine frigorifique ou pompe à chaleur

## 3. DIFFERENTS TYPES DE POMPES A CHALEUR

3.1 Echanges directs

3.2 Echangeurs de chaleur

## 5.3. Différents types de pompes à chaleur



A l'aide d'une vanne quatre voies (5) on peut inverser le cycle.

Ainsi une pompe à chaleur peut chauffer ou rafraîchir un local (climatiseur).

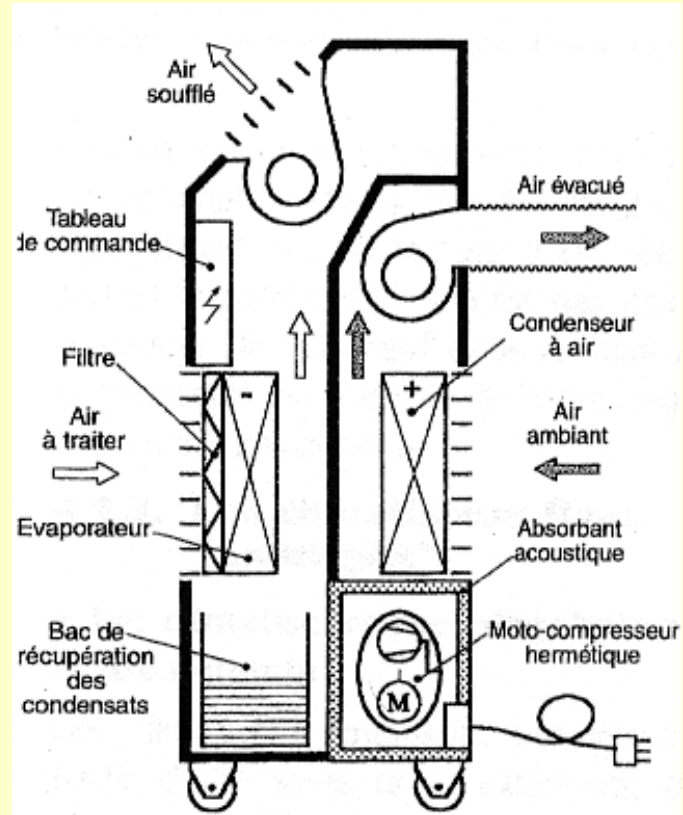
Les échanges de chaleur au niveau du condenseur ou de

l'évaporateur peuvent se faire soit directement au contact de l'air, soit à l'aide d'échangeurs de chaleur.

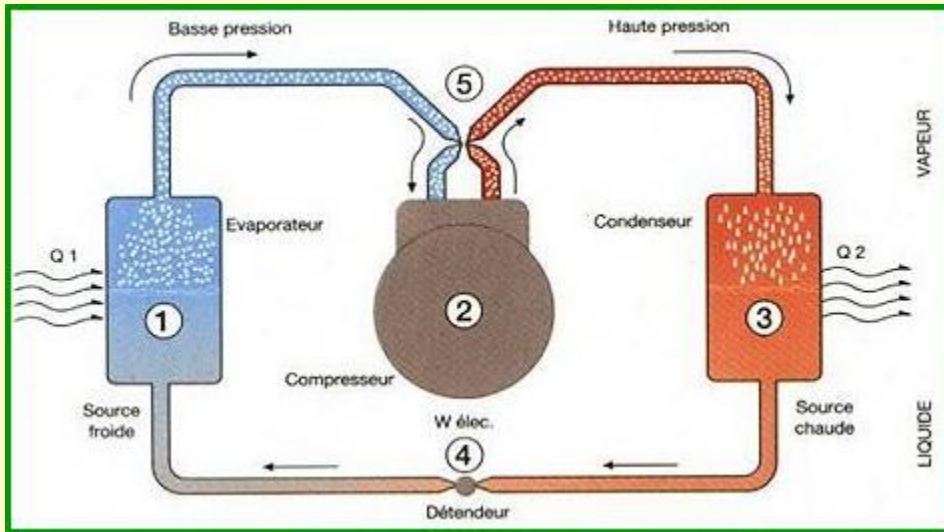
### 5.3.1 Echanges directs

- climatiseur mobile,

# CLIMATISEUR MOBILE



## 5.3. Différents types de pompes à chaleur



A l'aide d'une vanne quatre voies (5) on peut inverser le cycle.

Ainsi une pompe à chaleur peut chauffer ou rafraîchir un local (climatiseur).

Les échanges de chaleur au niveau du condenseur ou de

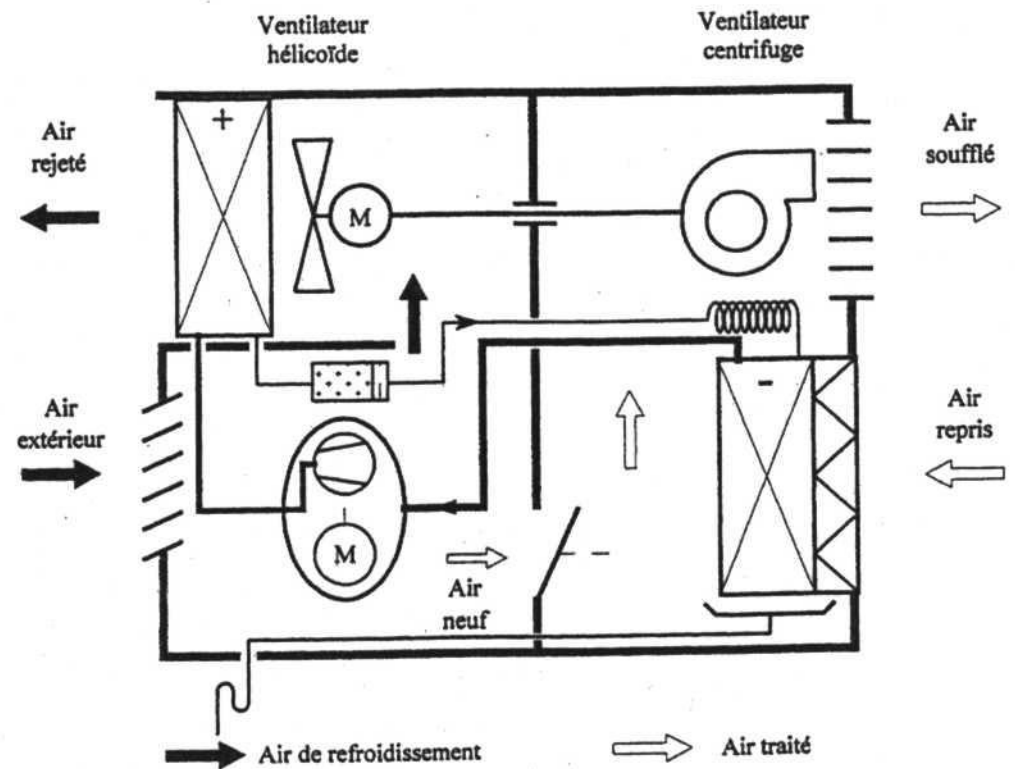
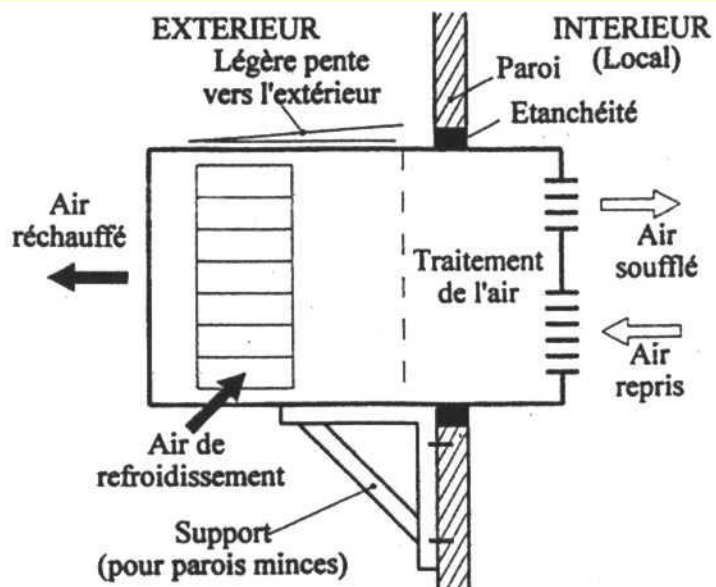
l'évaporateur peuvent se faire soit directement au contact de l'air, soit à l'aide d'échangeurs de chaleur.

### 5.3.1 Echanges directs

- climatiseur mobile,
- climatiseur de fenêtre (windows),

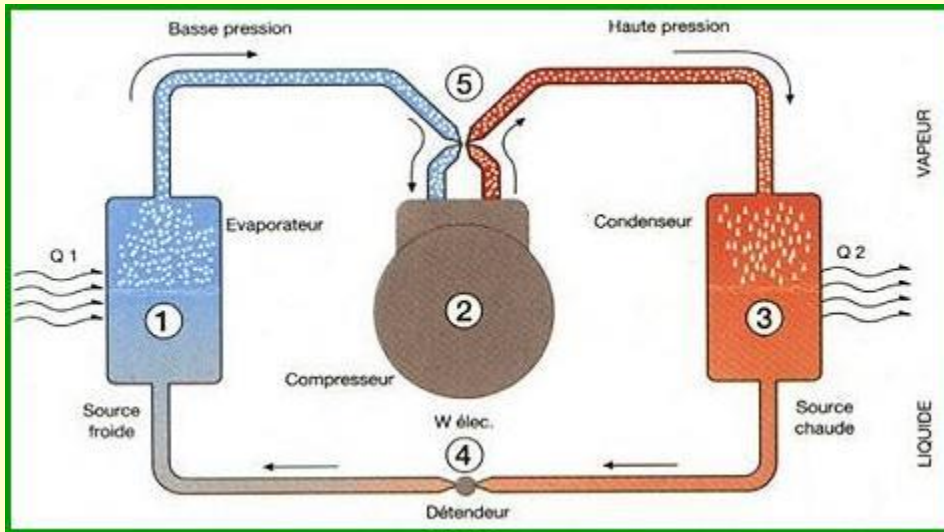


## CLIMATISEUR DE FENETRE





## 5.3. Différents types de pompes à chaleur



A l'aide d'une vanne quatre voies (5), on peut inverser le cycle.

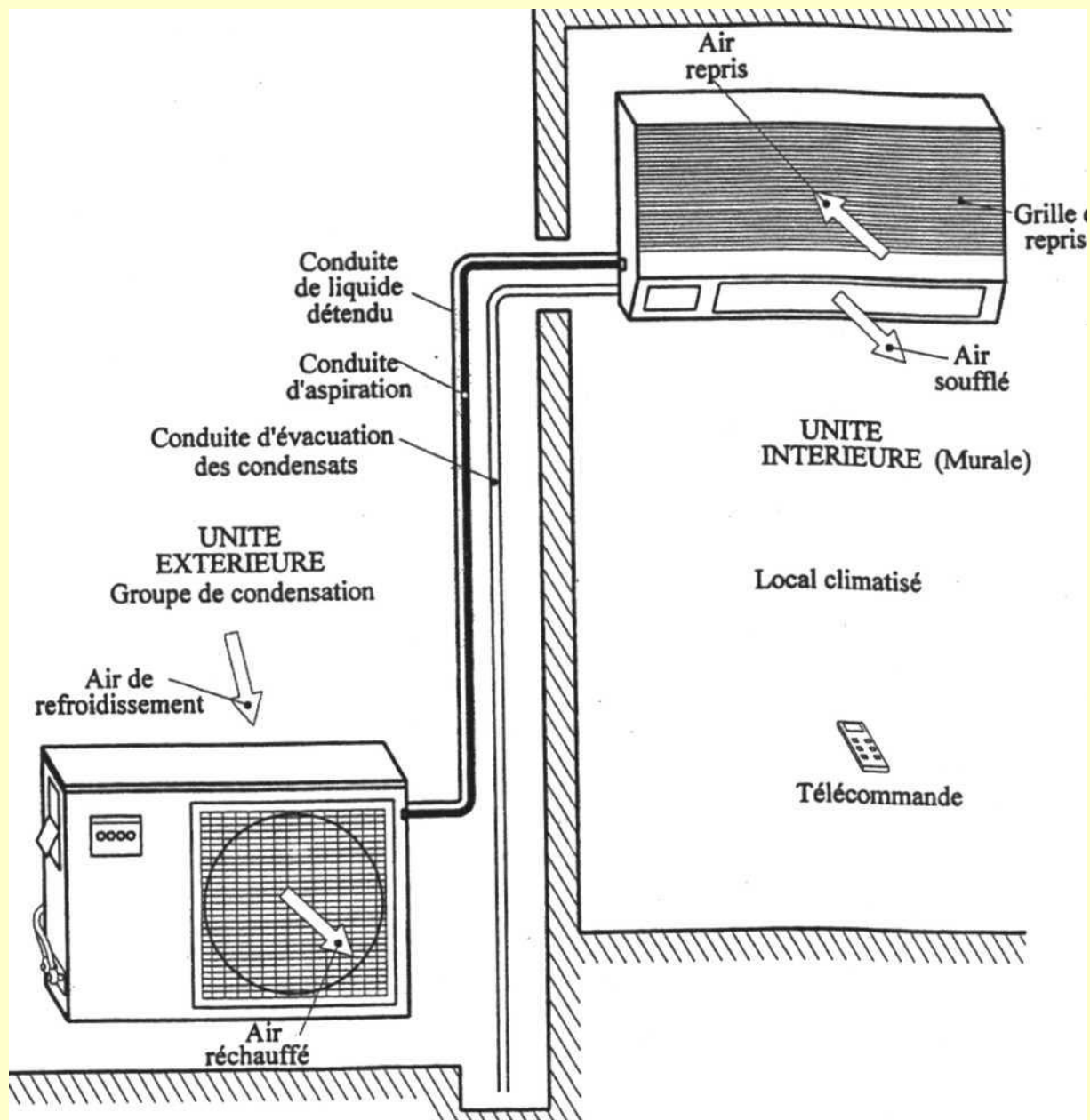
Ainsi une pompe à chaleur peut chauffer ou rafraîchir un local (climatiseur).

Les échanges de chaleur au niveau du condenseur ou de

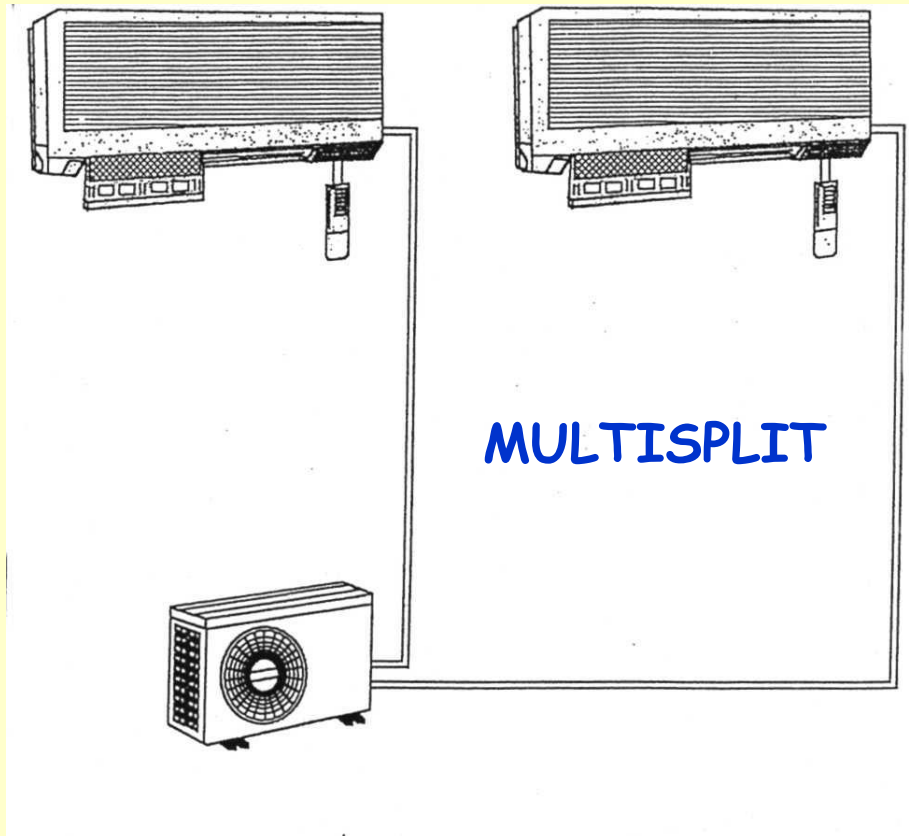
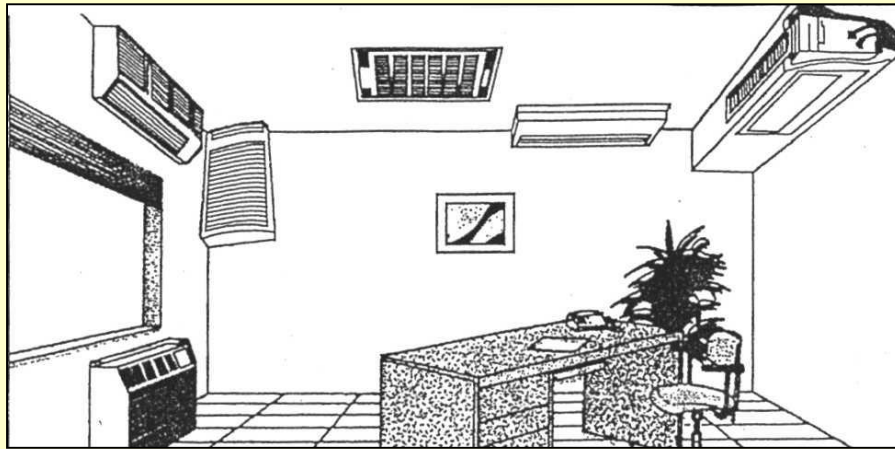
l'évaporateur peuvent se faire soit directement au contact de l'air, soit à l'aide d'échangeurs de chaleur.

### 5.3.1 Echanges directs

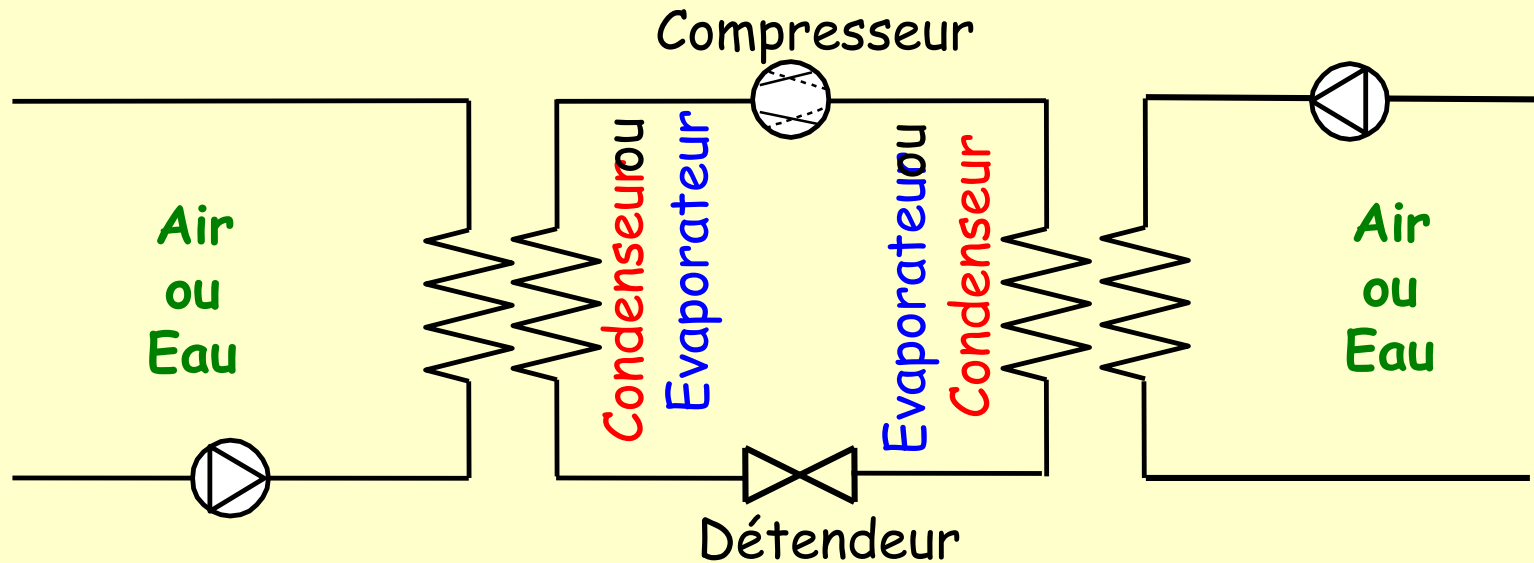
- climatiseur mobile placé dans la pièce,
- climatiseur de fenêtre (windows),
- climatiseur à éléments séparés (split et multisplit systèmes).



# CLIMATISEUR BIBLOC "SPLIT-SYSTEM"



### 5.3.2 Echangeurs de chaleur



Dans le cas d'échangeurs de chaleur, on peut utiliser comme fluide caloporteur soit de l'air, soit de l'eau, ce qui multiplie les types de chauffage :

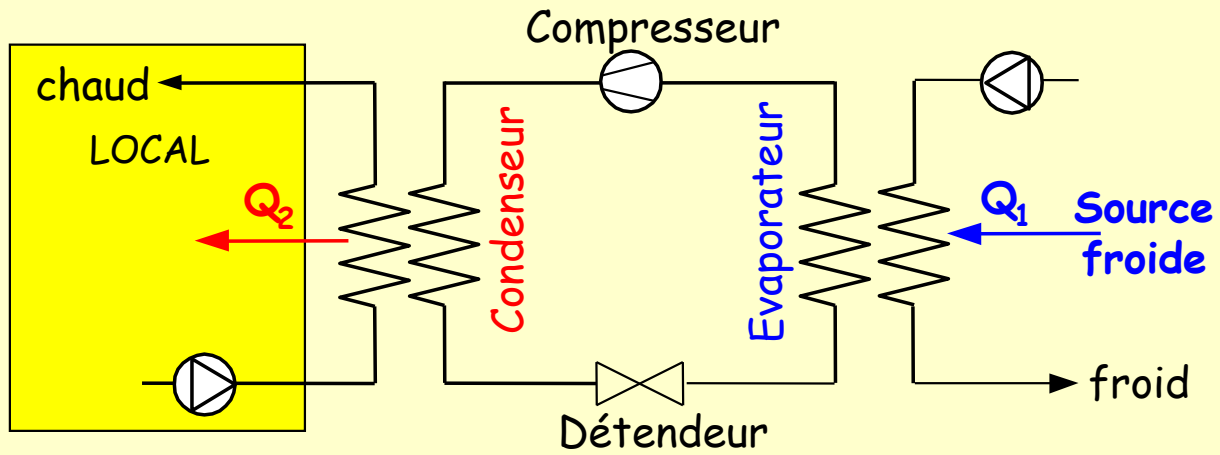
Air - Air

Eau - Eau

Air - Eau

Eau - Air

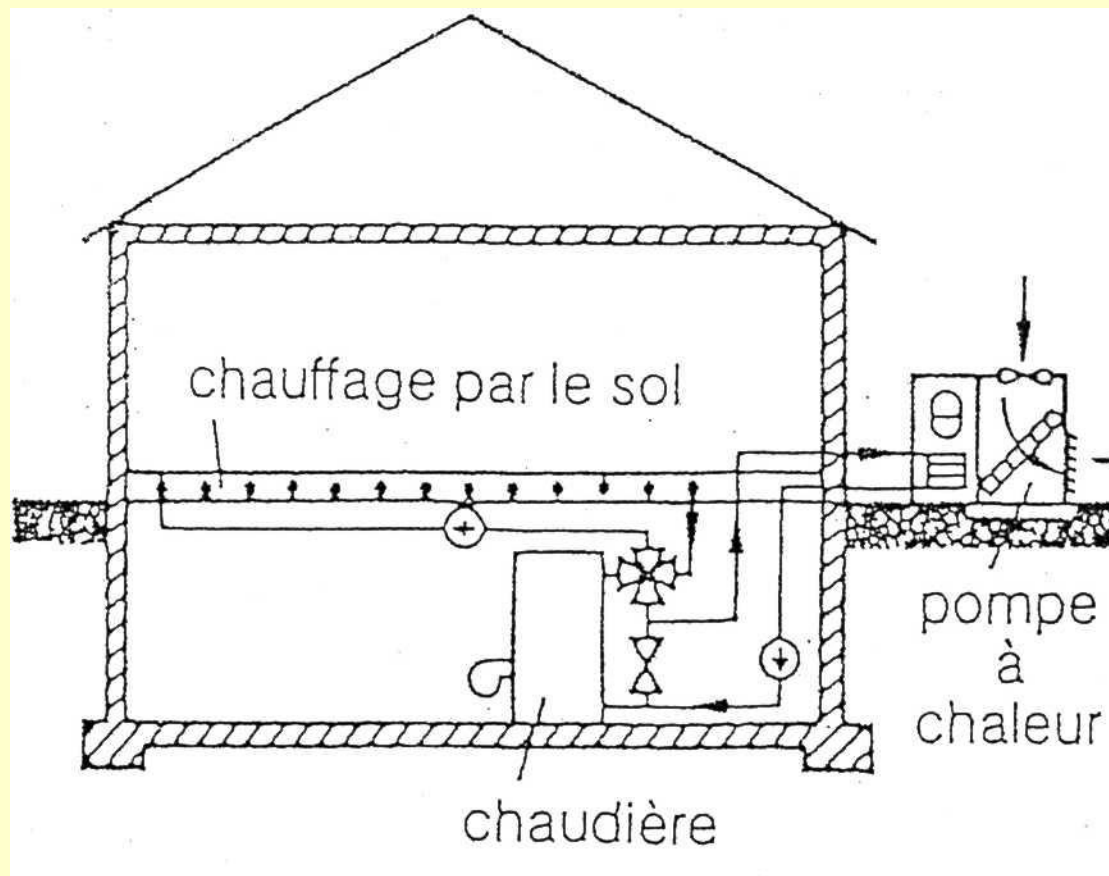
## Cas de l'hiver



### Source froide

- air (extérieur,

## POMPE A CHALEUR EN RELEVÉ DE CHAUDIERE : LA BI-ENERGIE

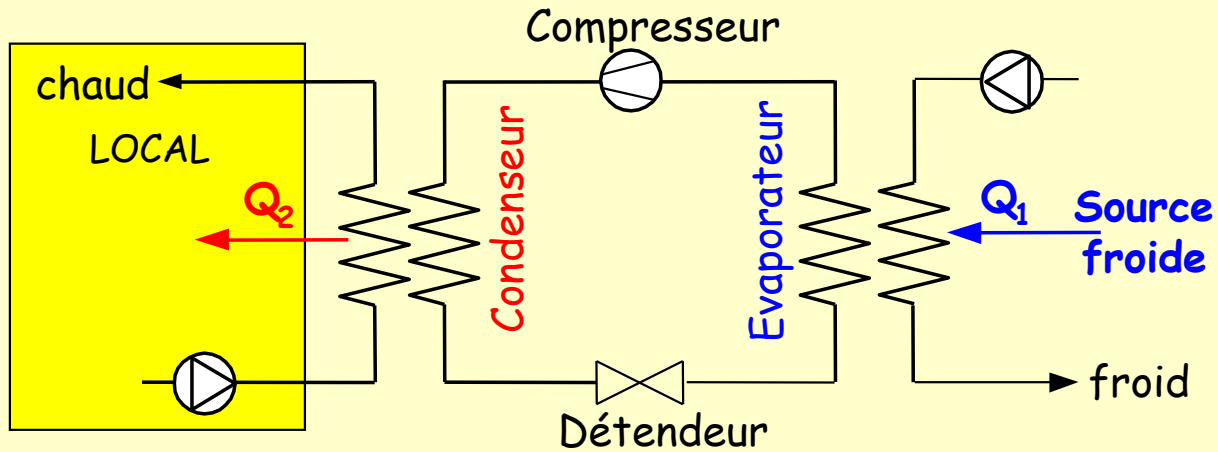


En mi-saison ( $5^{\circ}\text{C}$  à  $15^{\circ}\text{C}$ ) :  
seule la PAC fonctionne

Entre  $5^{\circ}\text{C}$  et  $0^{\circ}\text{C}$  :  
PAC et chaudière  
fonctionnent : la PAC  
préchauffe l'eau qui  
arrive à la chaudière

En dessous de  $0^{\circ}\text{C}$  :  
seule la chaudière  
fonctionne

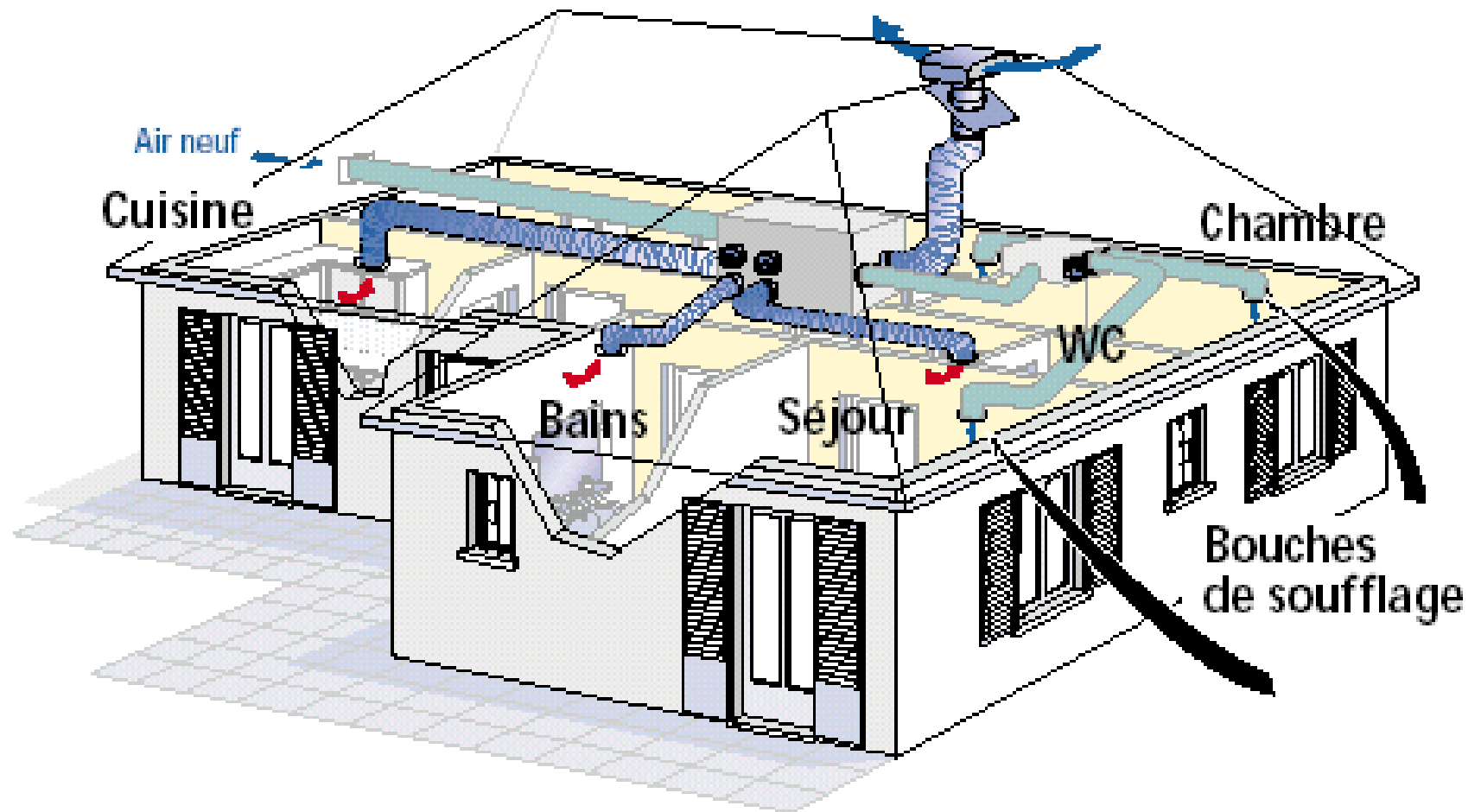
## Cas de l'hiver



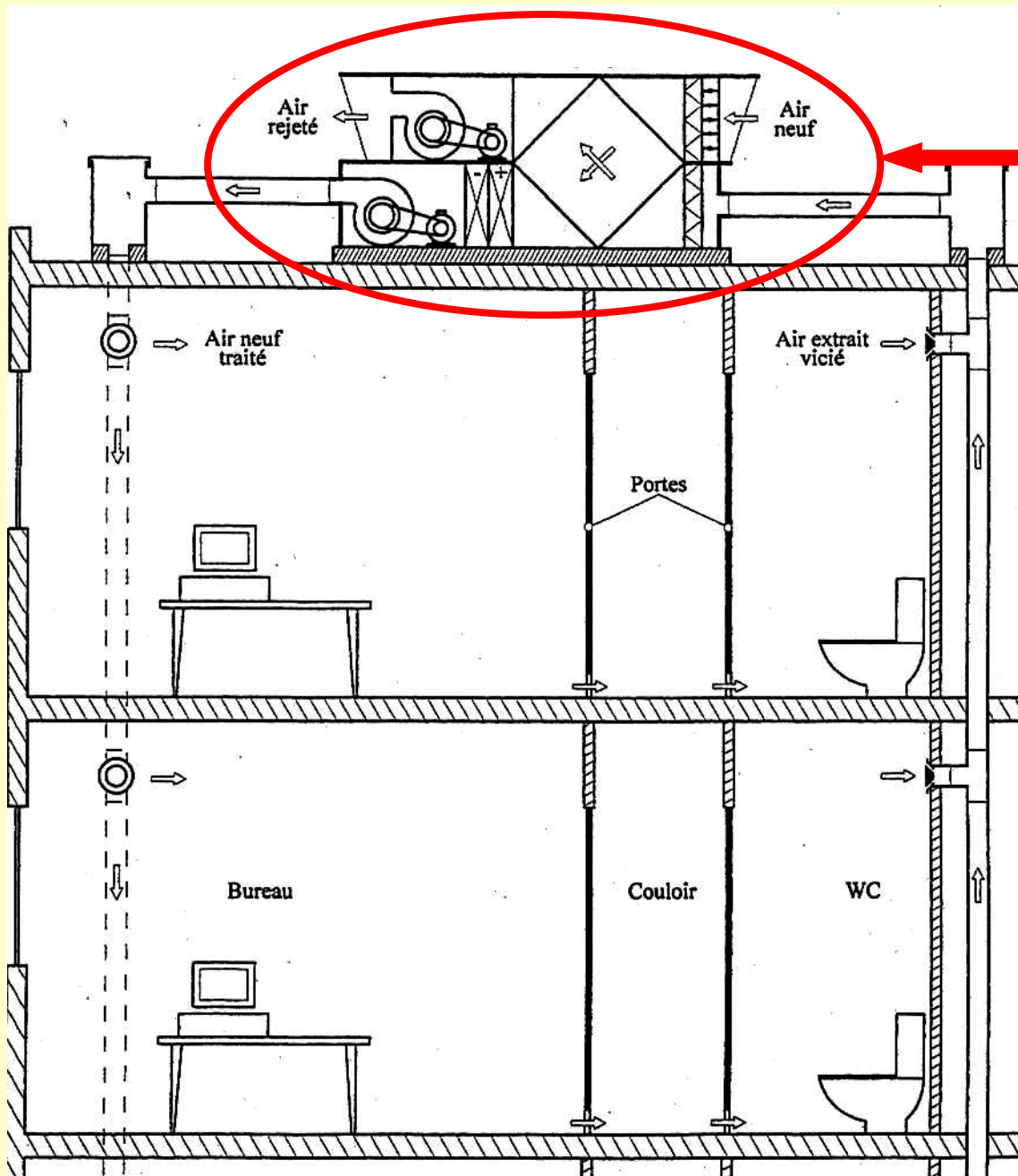
### Source froide

- air (extérieur, extrait dans le cas d'une VMC double flux),

## VMC DOUBLE FLUX



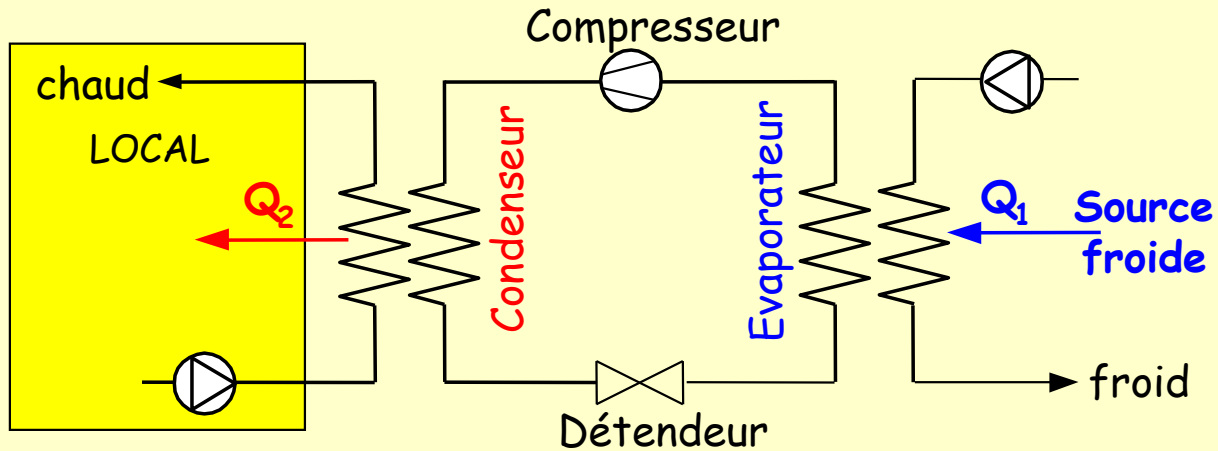




Récupérateur à plaques +  
PAC

RECUPERATION  
SUR  
L'AIR EXTRAIT

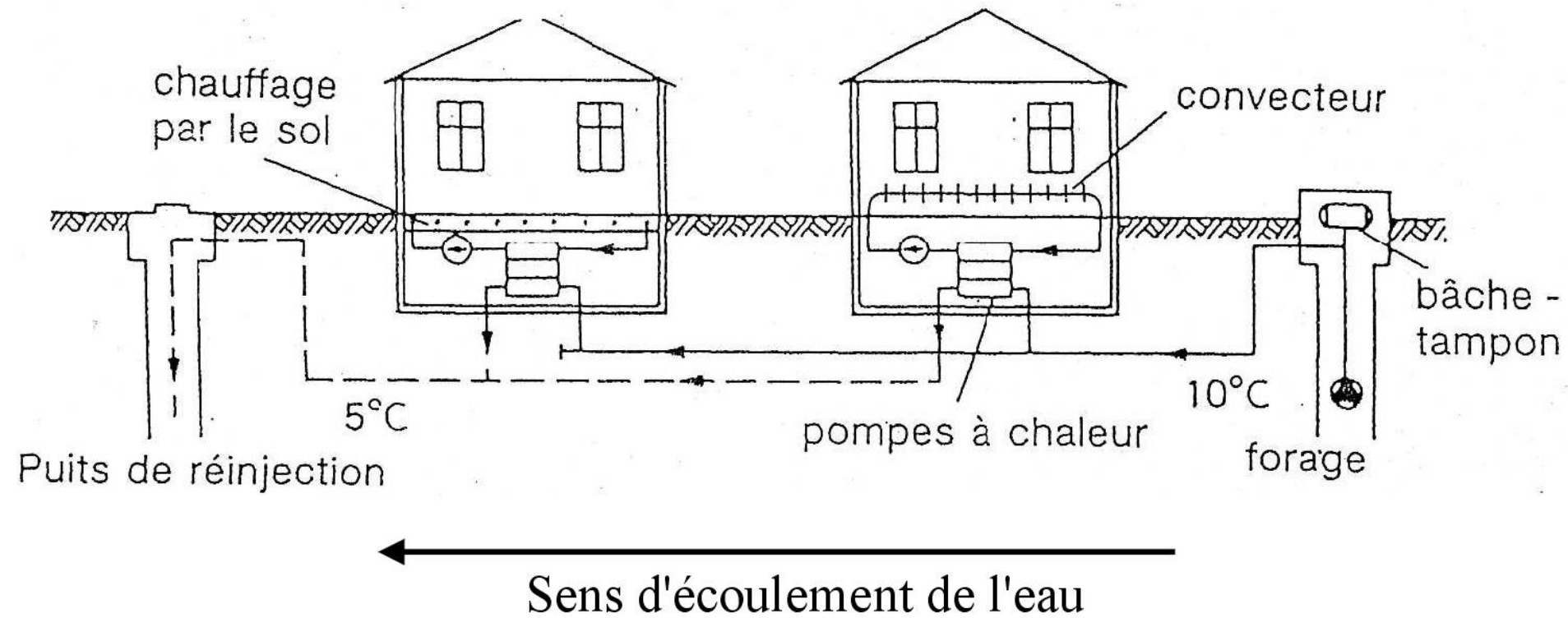
## Cas de l'hiver



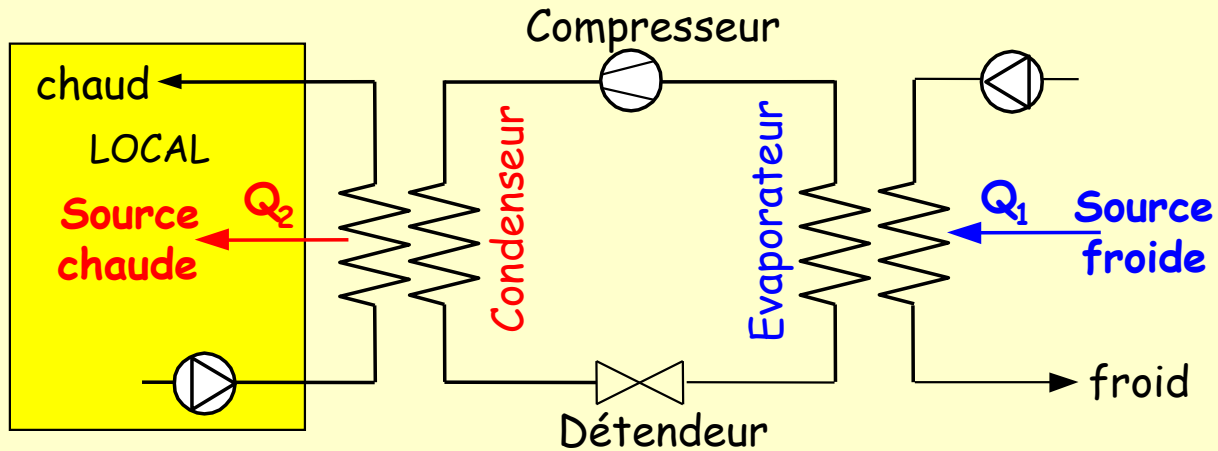
### Source froide

- air (extérieur, extrait dans le cas d'une VMC double flux),
- eau (nappe phréatique,

## RECUPERATION SUR NAPPE PHREATIQUE

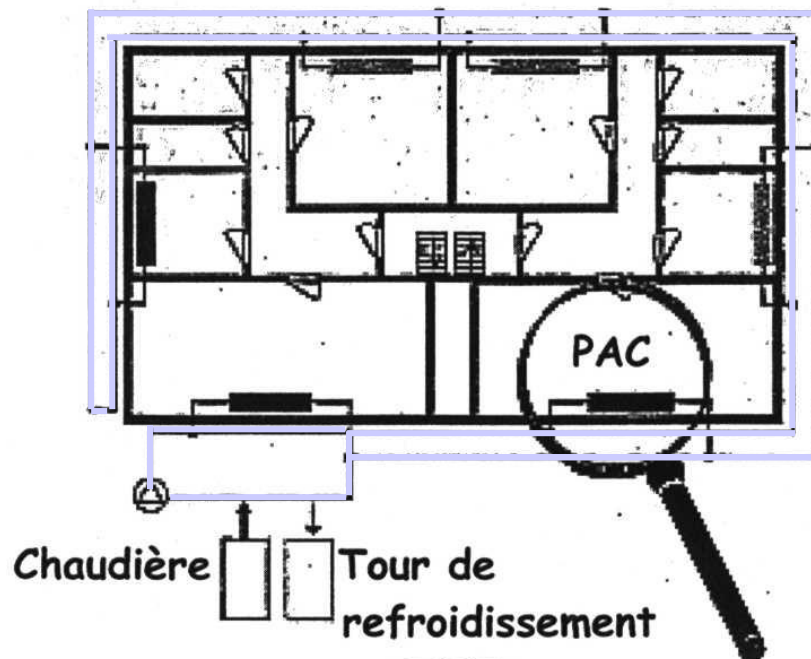


## Cas de l'hiver

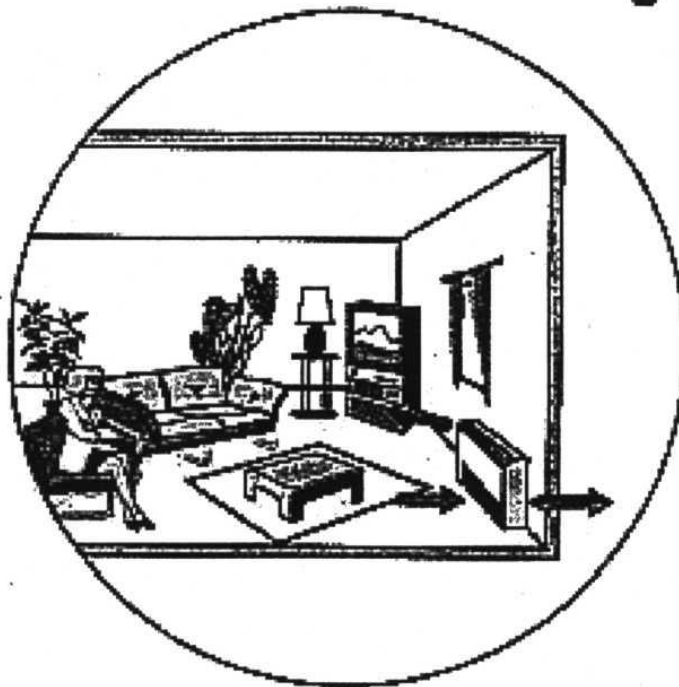


### Source froide

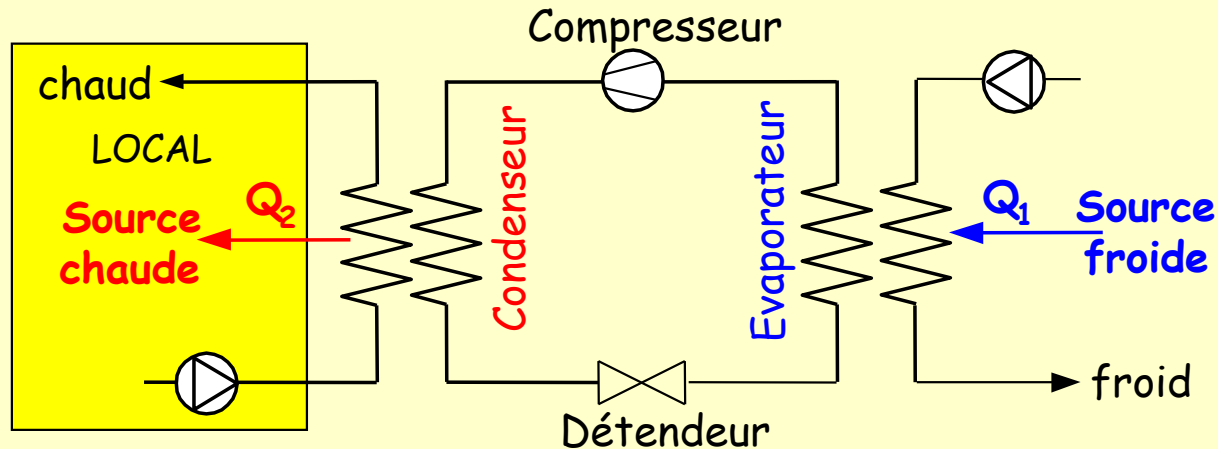
- air (extérieur, extrait dans le cas d'une VMC double flux),
- eau (nappe phréatique, lac, rivière, boucle d'eau ...).



RECUPERATION  
SUR  
BOUCLE D'EAU



## Cas de l'hiver

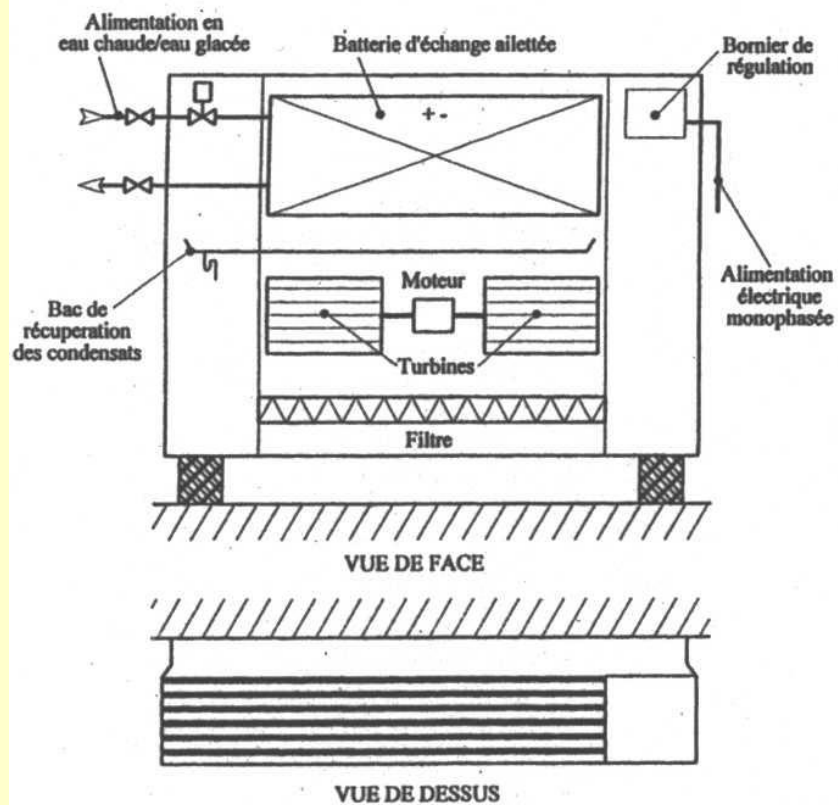
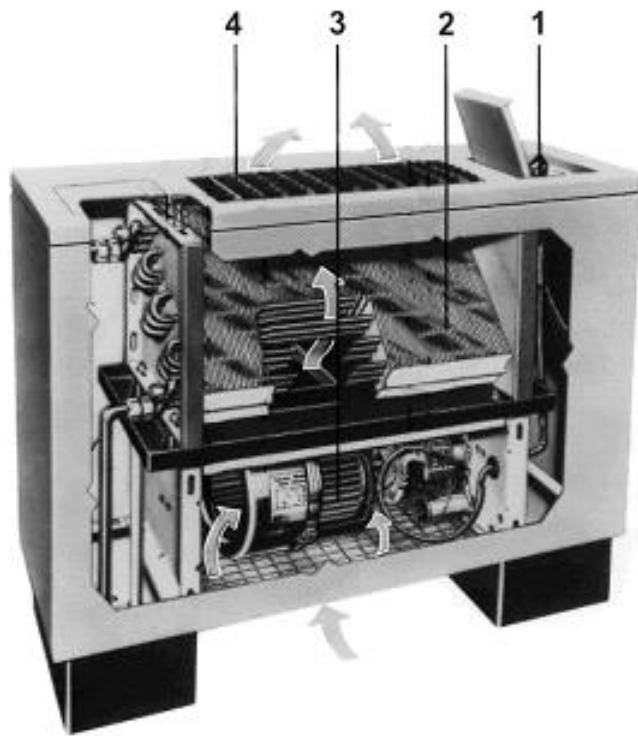


### Source froide

- air (extérieur, extrait dans le cas d'une VMC double flux),
- eau (nappe phréatique, lac, rivière, boucle d'eau...).

### Source chaude

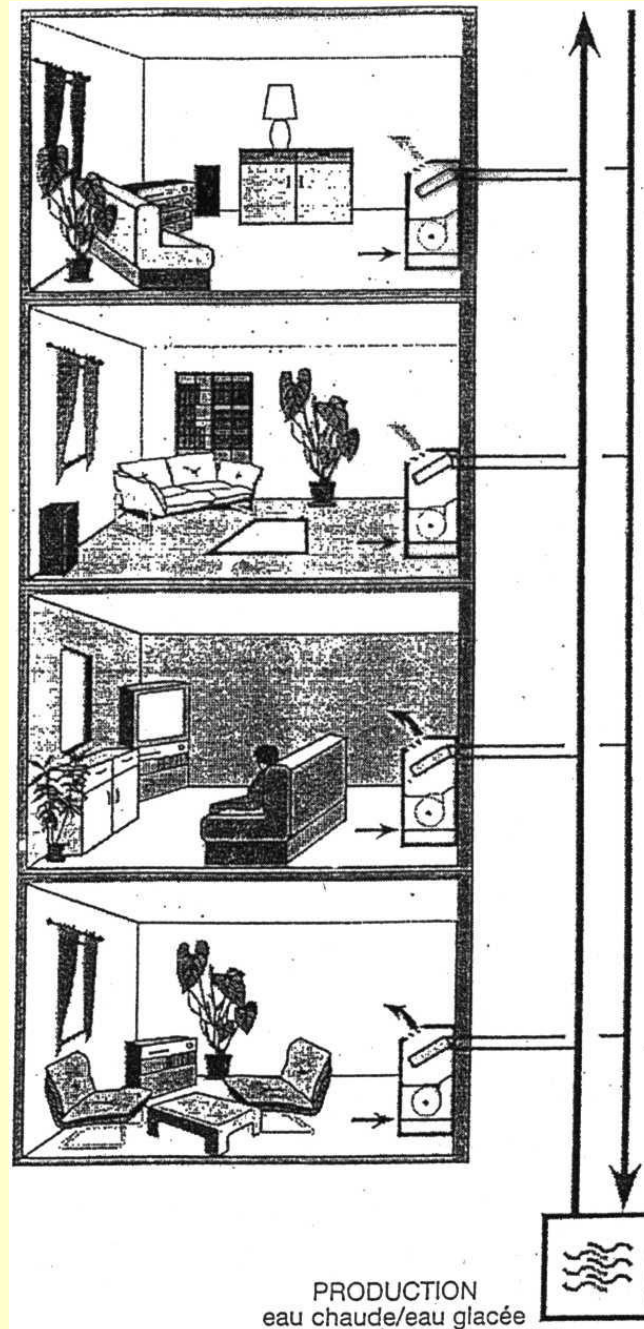
- air pulsé à travers des bouches après acheminement dans un réseau de gaines,
- eau alimentant des radiateurs, un plancher ou des ventilo-convecteurs.



## VENTILO-CONVECTEUR

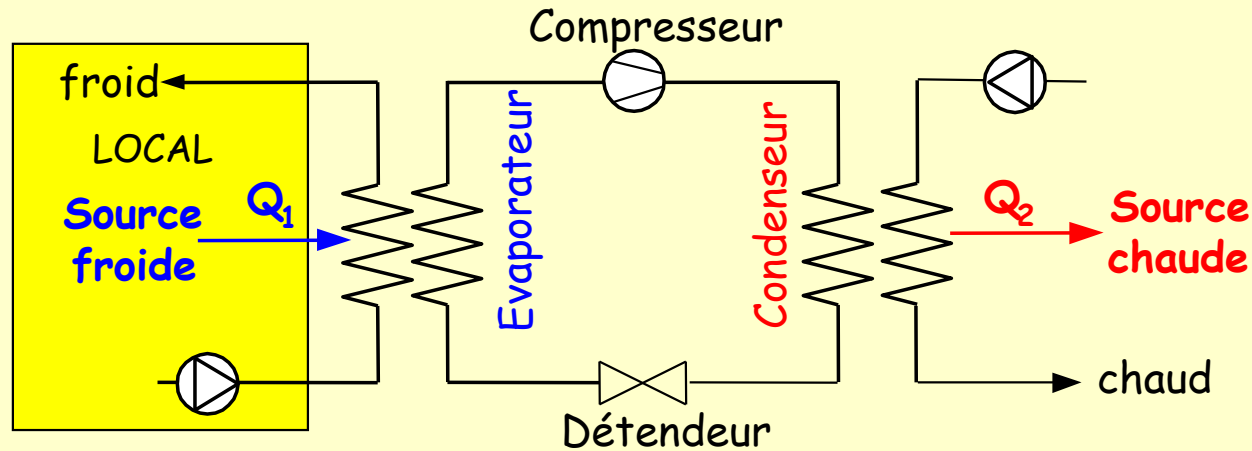


CHAUFFAGE  
ET  
RAFRAICHISSEMENT  
PAR  
VENTILO-CONVECTEURS





## Cas de l'été



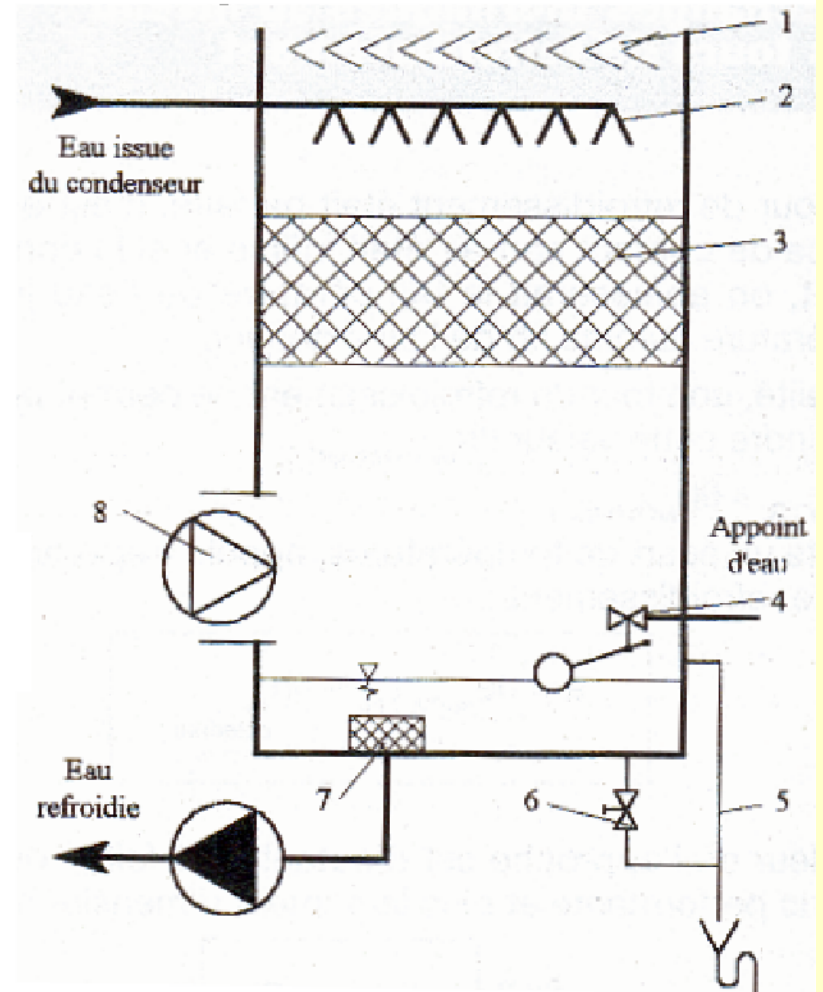
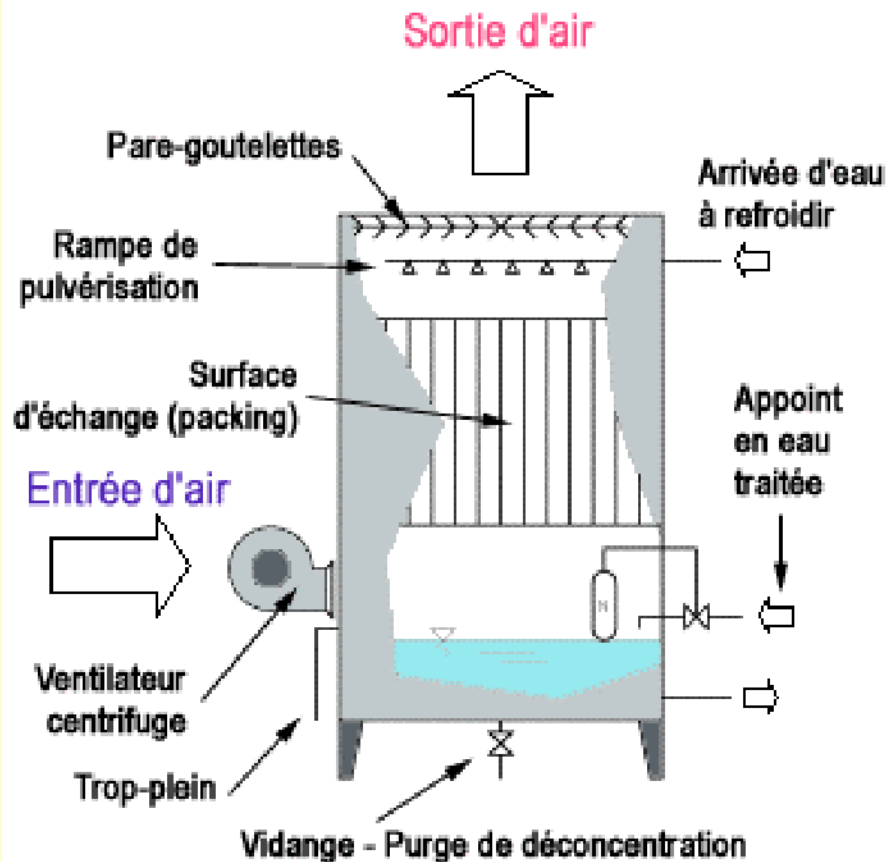
### Source froide

- **air** pulsé directement dans le local ou à travers des bouches après acheminement dans un réseau de gaines,
- **eau** alimentant des ventilo-convecteurs ou un plancher.

### Source chaude

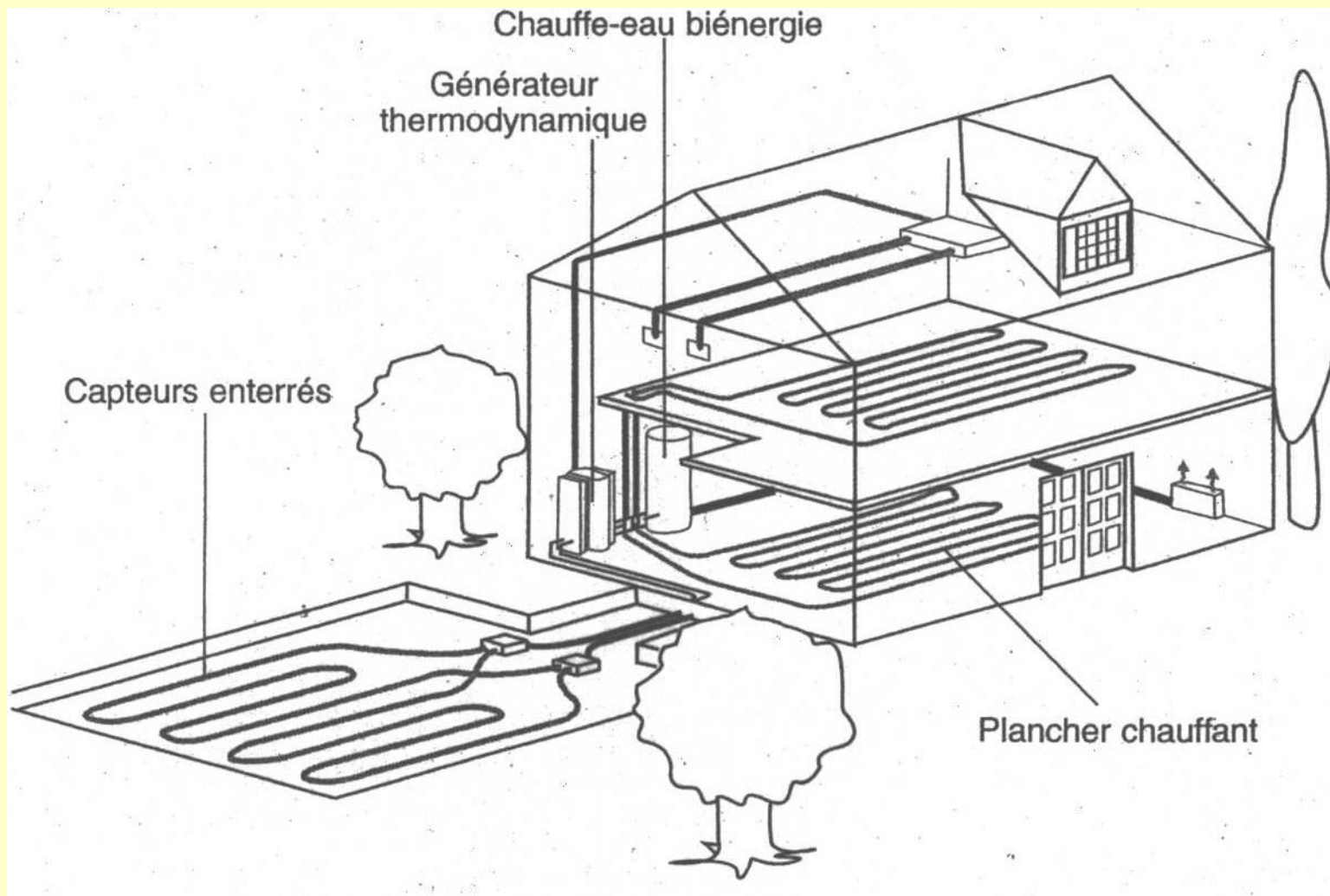
- **air** rejeté directement à l'extérieur,
- **eau** rejetée dans une nappe phréatique ou circuit fermé avec tour de refroidissement placée à l'extérieur.

# TOUR DE REFROIDISSEMENT

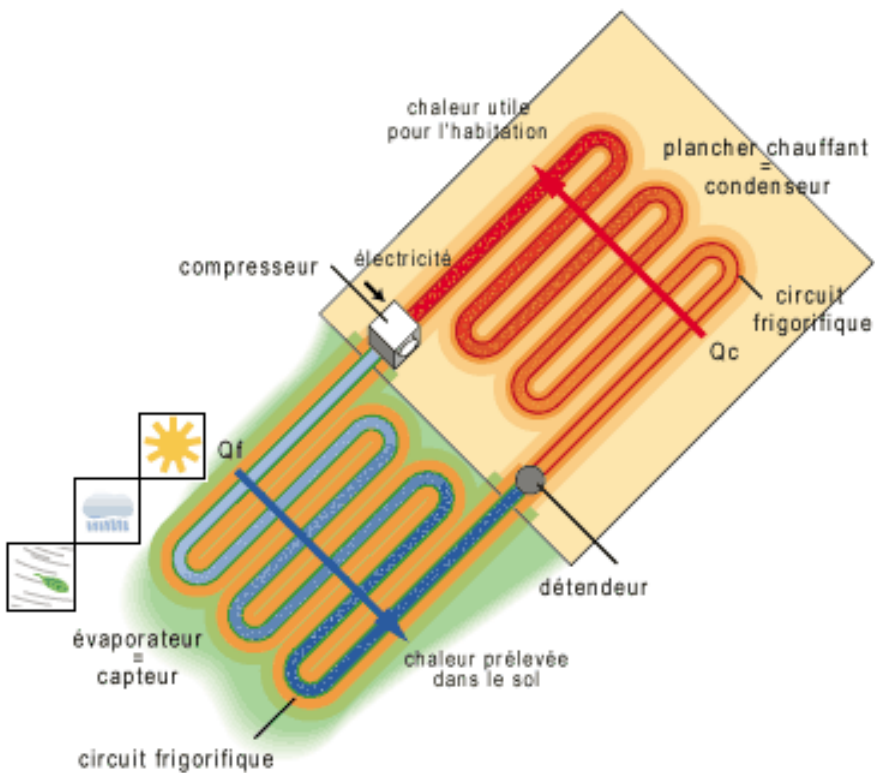


# RECUPERATION DE LA CHALEUR DU SOL

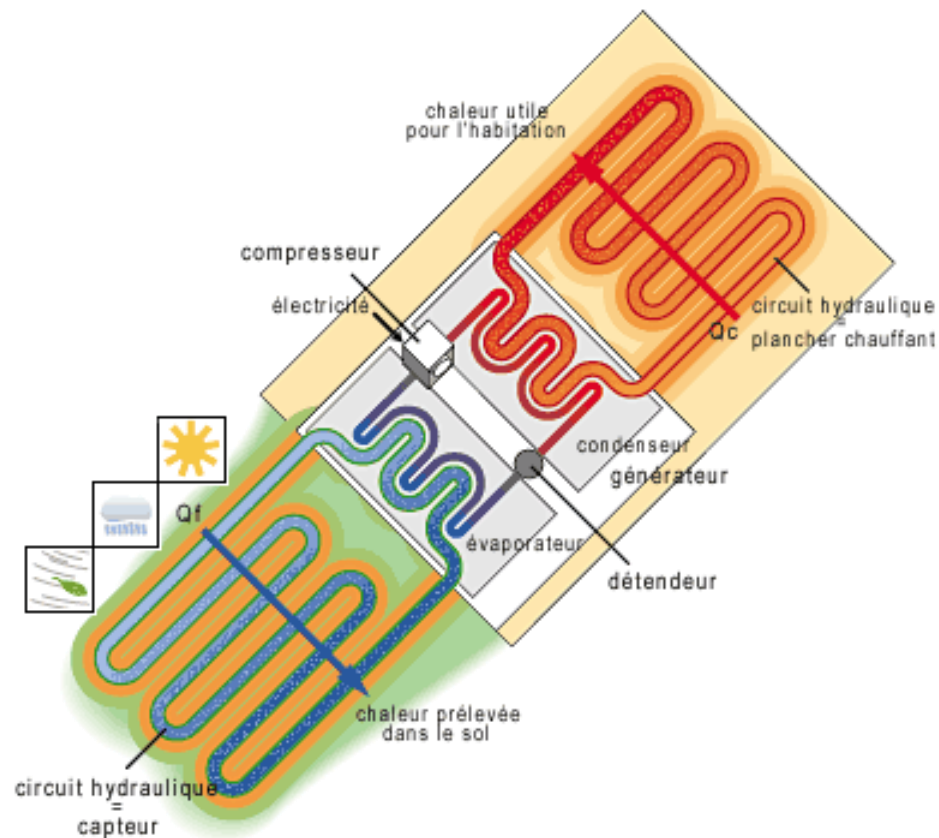
## PAC Géothermiques



Capteurs horizontaux



Détente directe



Echangeur eau/eau

Capteurs horizontaux

# IMMEUBLE DE L'ADEME A ANGERS



Capteurs verticaux

FIN

## Différents types de PAC

Type de récupération	Type de chauffage	Source froide $\theta_1$	Source chaude $\theta_2$	$T_2$	$T_2 - T_1$	$(COP)_{pac} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$
Eau (lac, nappe...)	Air chaud pulsé	14°C	40 °C	313	26	12
	Eau chaude à circulation forcée		60°C	333	46	7
			40 °C	313	26	12
Air extérieur	Air chaud pulsé	varie de -5°C à 15°C	40 °C	313	45 à 25	7 à 12
	Eau chaude à circulation forcée		60°C	333	65 à 45	5 à 7
			40°C	313	45 à 25	7 à 12
Air extrait	Air chaud pulsé	18°C	40 °C	313	22	14
	Eau chaude à circulation forcée		60°C	333	42	8
			40°C	313	22	14

Un chauffage à 40°C est nettement plus performant qu'un chauffage à 60°C  
Meilleurs COP :

- 1- Récupération sur air extrait mais réserve de calories limitée (1vol/h)
- 2- Récupération sur eau quand c'est possible
- 3- Récupération sur l'air toujours possible mais faible COP par temps froid