

“

**Suite Chapitre 3.Cycles avec changement de phase**

”

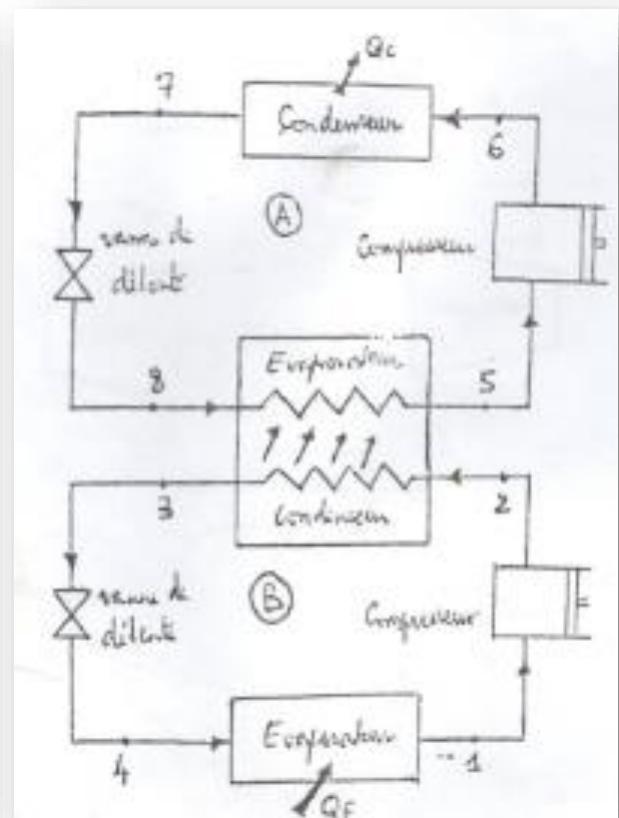
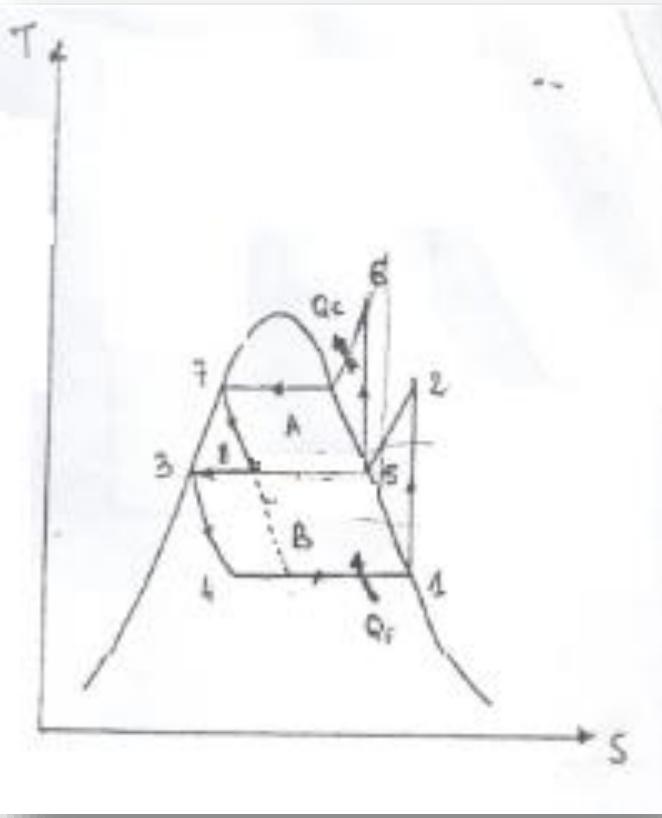
**C. Systèmes de réfrigeration en cascade :**

- Certaines applications industrielles nécessitent des différences de température relativement trop grandes pour un cycle de réfrigération simple comme le précédent.

Une grande différence de température entraîne l'utilisation d'une grande différence de pression.

Donc on utilise la solution de plusieurs cycles à compression de vapeur en cascade.

la figure suivante montre un cycle composé de deux cycle en cascade



Le bilan énergétique autour de l'échangeur de chaleur donne :

$$\dot{m}_A(h_5 - h_6) = \dot{m}_B(h_2 - h_3)$$

$\Rightarrow$

$$\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_B} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_5 - h_8)}$$

Le coefficient de performance :

$$COP_{R,\text{cascade}} = \frac{Q_F}{W_{net}}$$

Avec :

$$\dot{Q}_F = \dot{m}_B(h_1 - h_4)$$

et

$$\dot{W}_{net} = \dot{m}_A(h_6 - h_5) + \dot{m}_B(h_2 - h_1)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}_{net}} = \frac{\dot{m}_B(h_1 - h_4)}{\dot{m}_A(h_6 - h_5) + \dot{m}_B(h_2 - h_1)}$$



N.B

Dans ce type de cycle on peut utiliser deux fluides frigorégenes différents ce qui permet d'augmenter le COP du cycle.



## Exercice d'application

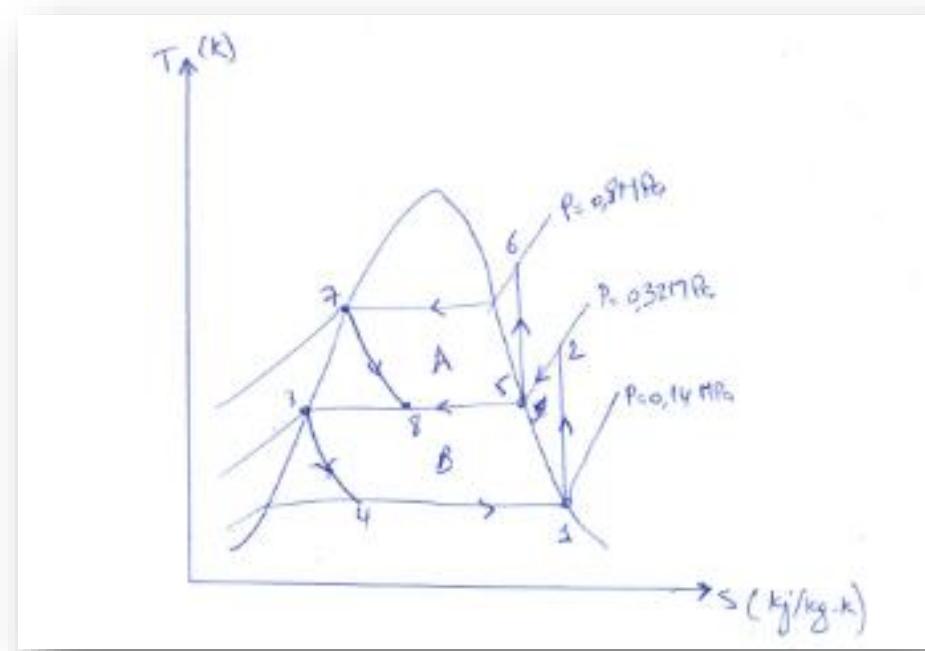
Soit un système de réfrigération en cascade opérant entre 0.8 et 0.14 MPa. Chaque un des deux étages fonctionne suivant le cycle idéal à compression de vapeur avec le F<sub>12</sub> comme fluide de travail.

Le rejet de chaleur apartir du cycle inférieur vers le le cycle supérieur se fait dans un échangeur de chaleur adiabatique où les deux courants sont à 0.32 MPa.

Si le débit massique du F<sub>12</sub> dans le cycle supérieur est de 0.05kg/s déterminer :

- Le débit massique dans le cycle inférieur.
- La puissance calorifique échangé à partir du milieu à réfrigéré.
- La puissance nécessaire au compresseur
- Le COP du cycle.

## Solution



Apartir des tableaux du F<sub>12</sub> on va déterminer les h (enthalpie) de chaque point du cycle.

Points	$P(MPa)$	$h(kJ/kg)$	$s(kJ/kgk)$	Remarques
1	0.14	177.87	0.7102	Vapeur saturée $s_1=s_2$
2	0.32	191.97	0.7102	Vapeur surchauffée (interpolation)
3	0.32	37.08		Liquide saturé
4	0.14	37.08		$h_3=h_4$
5	0.32	188	0.6960	Vapeur saturée $s_5=s_6$
6	0.8	204.17	0.6960	Vapeur surchauffée (interpolation)
7	0.8	67.3		Liquide saturé
8	0.32	67.3		$h_7=h_8$

- Calcul du débit dans le cycle inférieur  $\dot{m}_B$

On a  $\dot{m}_A = 0.05 \text{ kg/s}$

Au niveau de l'échangeur de chaleur

$$\dot{m}_A (h_5 - h_8) = \dot{m}_B (h_2 - h_3) \Rightarrow \dot{m}_B = \dot{m}_A (h_5 - h_8) / (h_2 - h_3)$$

$$\dot{m}_B = (0.05 * (188 - 67.3)) / (191.97 - 37.08) = 0.039 \text{ kg/s.}$$

- La puissance calorifique échangée à partir du milieu à réfrigéré

$$\dot{Q}_F = \dot{m}_B (h_1 - h_4) = 0.039 * (177.87 - 37.08) = 5.49 \text{ KW}$$

- La puissance nécessaire au compresseur.

$$\dot{W}_{net} = \dot{m}_A (h_6 - h_5) + \dot{m}_B (h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_{net} = 0.05 * (191.97 - 177.87) + 0.039 * (204.17 - 67.3) = 1.358 \text{ KW}$$

- Le COP du cycle.

$$COP = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}_{net}} = \frac{5.49}{1.358} = 4.04$$

#### **D. Systèmes de réfrigération à compretion de vapeur multi-étages :**

- Quand le fluide de travail utilisé dans les systèmes en cascade est le même, l'échangeur de chaleur utilisé entre les deux cycles peut être remplacé par une chambre de flash.

La figure suivante schématise ce système avec 2 étages de compression, dans ce système, le réfrigérant liquide se détend dans la vanne de détente du cycle supérieur à la pression de chambre de flash.

Une partie de ce liquide se vaporise durant cette évolution, cette vapeur saturée (point 3) est mélangée avec la vapeur surchauffée provenant du compresseur basse pression (point 2) et le mélange est aspiré par le compresseur haute pression (point 9).

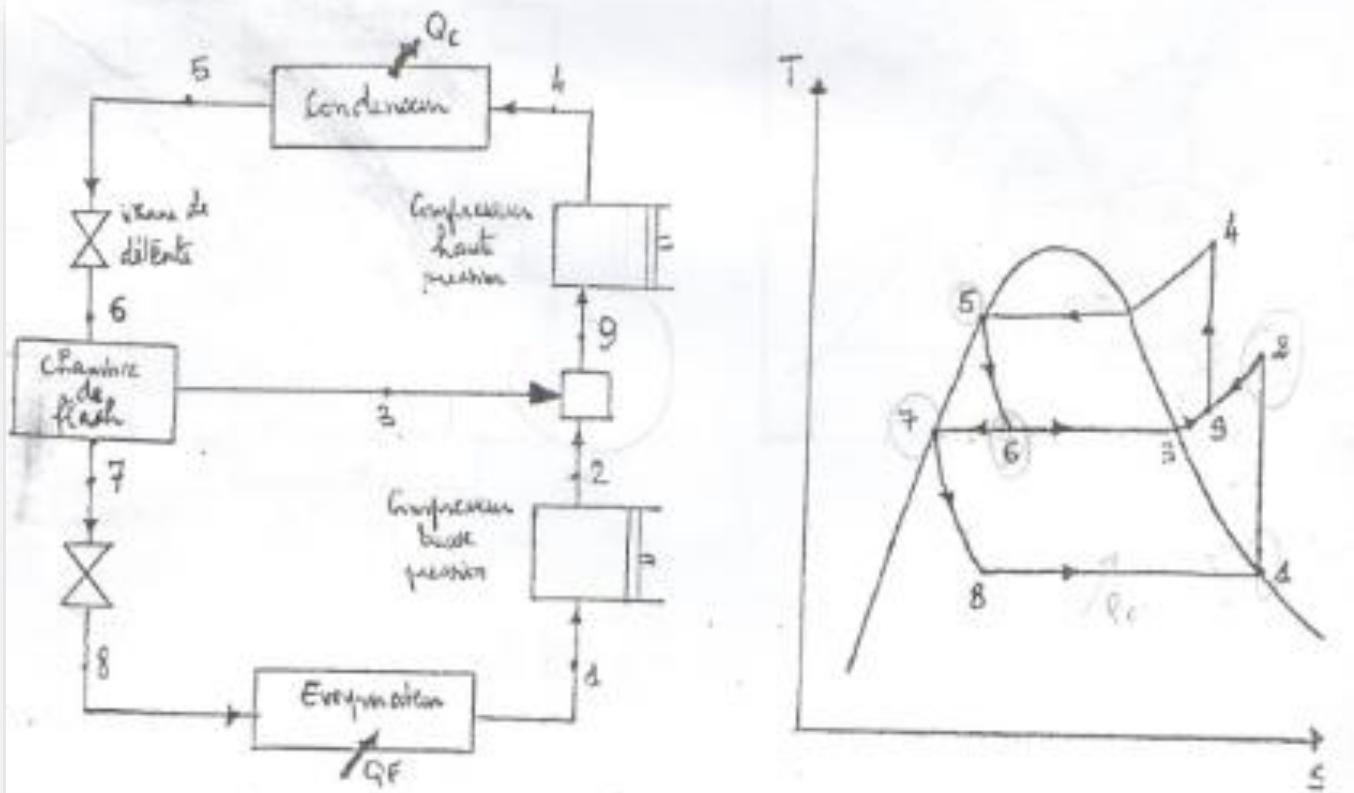
Le liquide saturé (point 7) de la chambre de flash est détendu dans la seconde vanne de détente puis dirigé dans l'évaporateur du cycle inférieur.



**N.B**

**Pour les calculs les débits dans  
les différents circuits ne sont pas  
les mêmes.**





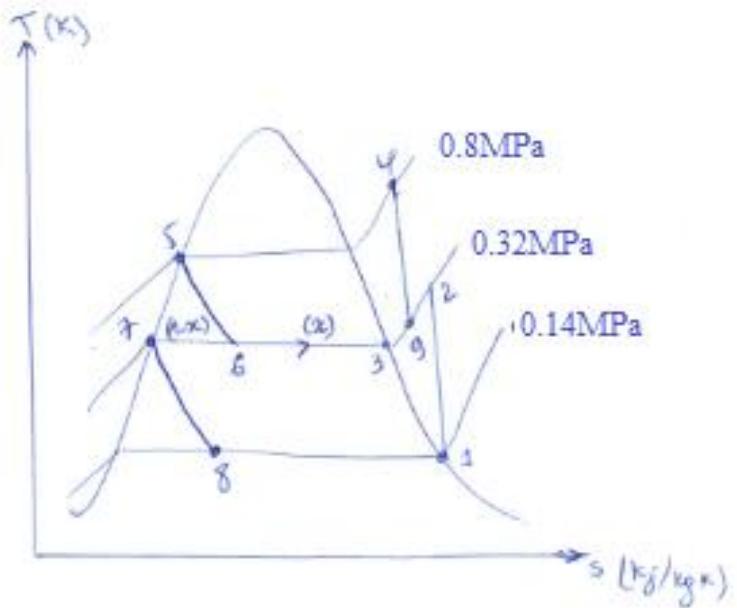
### Exercice d'application

Soit un système de refroidissement à compression de vapeur biétagé fonctionnant entre 0.14 et 0.8 MPa, le fluide F<sub>12</sub> quitte le condenseur comme liquide saturé et il est détendu dans la chambre de flash à 0.32 MPa. La partie évaporée est mélangé avec la vapeur quittant le compresseur à basse pression, le mélange est ensuite comprimé dans le compresseur haute pression jusqu'à la pression du condenseur. La partie liquide est détendu dans la vanne de détente jusqu'à la pression de l'évaporateur. On suppose que le réfrigérant quitte l'évaporateur comme vapeur saturée et que les 2 compresseurs sont isentropiques.

Déterminer :

- La fraction du réfrigérant qui s'est évaporé dans la chambre de flash.
- Le COP du cycle.

## Solution



Apartir des tableaux du  $F_{12}$  on va déterminer les  $h$  (enthalpie) de chaque point du cycle.

Points	$P(MPa)$	$h(kJ/kg)$	$s(kJ/kgk)$	Remarques
1	0.14	177.87	0.7102	Vapeur saturée $s_1=s_2$
2	0.32	191.97	0.7102	Vapeur surchauffée (interpolation)
3	0.32	188		Vapeur saturée
4	0.8	205.50	0.764	Vapeur surchauffée
5	0.8	67.3		Liquide saturé
6	0.32	67.3		$h_5=h_6$
7	0.32	37.08		Liquide saturé
8	0.14	37.08		$h_7=h_8$
9	0.32	188.13	0.764	Vapeur surchauffée determination de $s_9$ par (interpolation) $s_9=s_4$

- La fraction du réfrigérant qui s'est évaporée dans la chambre de flash.

La fraction x

$$h_{fg}=150.92 \text{ kJ/kg}$$

$$x = \frac{h_6 - h_{f(h7)}}{h_{fg}} = \frac{67.3 - 37.03}{150.92} = 0.02$$

Calcul de  $h_9$  ?

Dans l'échangeur le bilan énergétique s'écrit comme suit :

$$\dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_2 h_2$$

Au point 3 la quantité du débit égale à  $x=0.02$  (la fraction vapeur)

Au point 2 la quantité de débit égale à  $(1-x) = 1-0.02=0.98$

Au point 9 quantité du débit égale l'unité  $(x+(1-x))=1$

$$h_9 = \frac{\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_2 h_2}{\dot{m}_9} = \frac{0.02 * 188 + 0.98 * 191.97}{1}$$

$$h_9 = 188.13 \text{ kJ/kg}$$

pour calculer  $h_4$  on a  $s_4=s_9$  donc il faut déterminer  $s_9$

a partir des tableaux du F12 pour  $P=0.32 \text{ MPa}$  et  $h_9=188.13 \text{ kJ/kg} \Rightarrow$  après interpolation  $s_9= 0.764 \text{ kJ/kgK} = s_4$

on peut donc déterminer  $h_4$   $s_4=0.764 \text{ kJ/kgK}$  et  $P=0.8 \text{ MPa}$  vapeur surchauffée après interpolation  $h_4= 205.50 \text{ kJ/kg}$

- Le COP du cycle

$$COP = \frac{Q_F}{W_{net}}$$

$$Q_F = (1 - x) * (h_1 - h_8) = 0.98 * (177.87 - 37.08) = 137.97 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{net} = W_{12} + W_{94}$$

$$W_{12} = (1 - x) * (h_2 - h_1) = 0.98 * (191.97 - 177.87) = 13.818 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{94} = x * (h_4 - h_9) = 1 * (205.50 - 188.13) = 17.37 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{net} = 13.818 + 17.37 = 31.188 \text{ kJ/kg}$$

$$COP = \frac{Q_F}{W_{net}} = \frac{137.97}{31.188} = 4.42$$