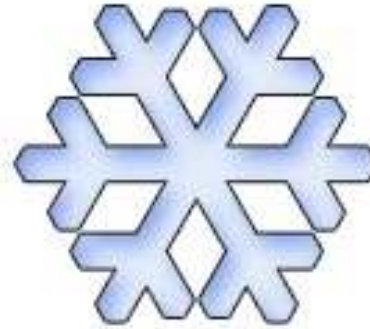




Technique du froid & composants frigorifiques

Mohammed YOUNI-IDRISSI
Chargé de Recherche, Cemagref



LICENCE PROFESSIONNELLE
MANAGEMENT DE LA CHAÎNE DU FROID - TRANSPORT ET LOGISTIQUE



► Un peu d'histoire, ...



1862 Développement d'une machine de production de glace par Ferdinand Carré (1824-1894)

1874 Développement d'une machine frigorifique à compression de vapeur pour conserver la viande et le transporter par Charles Tellier (1828-1913)

Le froid s'élance à la conquête des industries agro-alimentaires : conservation des produits d'origine animale et végétale

Le froid est présent dans les industries métallurgiques, mécaniques, chimiques, spatiales, ...

Le froid est un facteur de confort industriel ou individuel (climatisation, froid domestique)

Le froid est présent le domaine médical : fabrication des médicaments, conservation du plasma sanguin, opérations microchirurgicales, ...



► Rappels et réflexions, ...

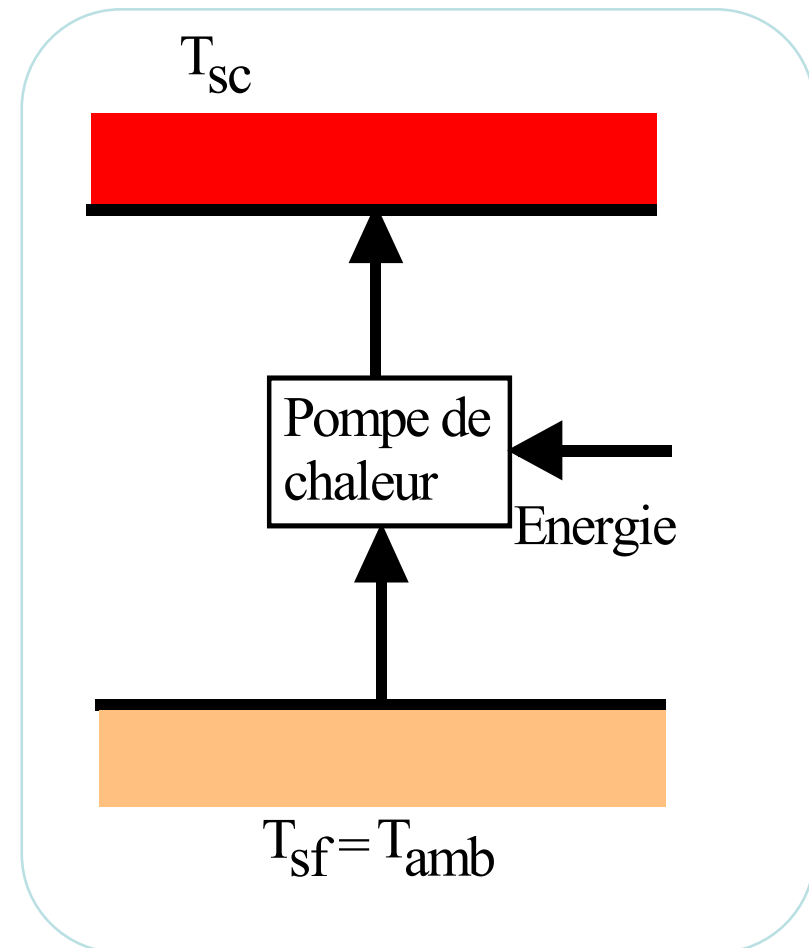
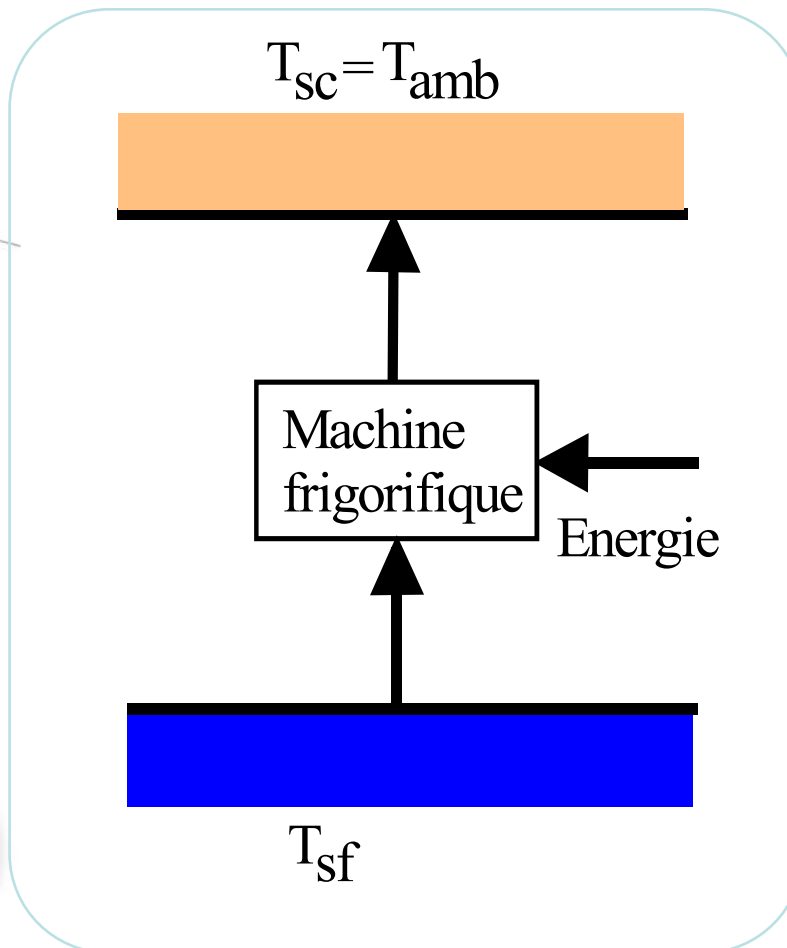


- ⇒ Un travail mécanique peut être intégralement transformé en chaleur (1er principe)
- ⇒ Une chaleur ne peut pas être intégralement transformée en travail mécanique (2e principe)
- ⇒ La chaleur est une forme dégradée de l'énergie
- ⇒ Le 1er principe établit une conservation d'énergie
- ⇒ Le 2e principe précise le sens d'évolution d'une transformation irréversible
- ⇒ Énoncé de Clausius « le passage de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud n'a jamais lieu spontanément ou sans compensation »
- ⇒ Énoncé de Kelvin « un système qui parcourt un cycle mono-thermique, en contact avec une seule source de chaleur est incapable de fournir de travail »

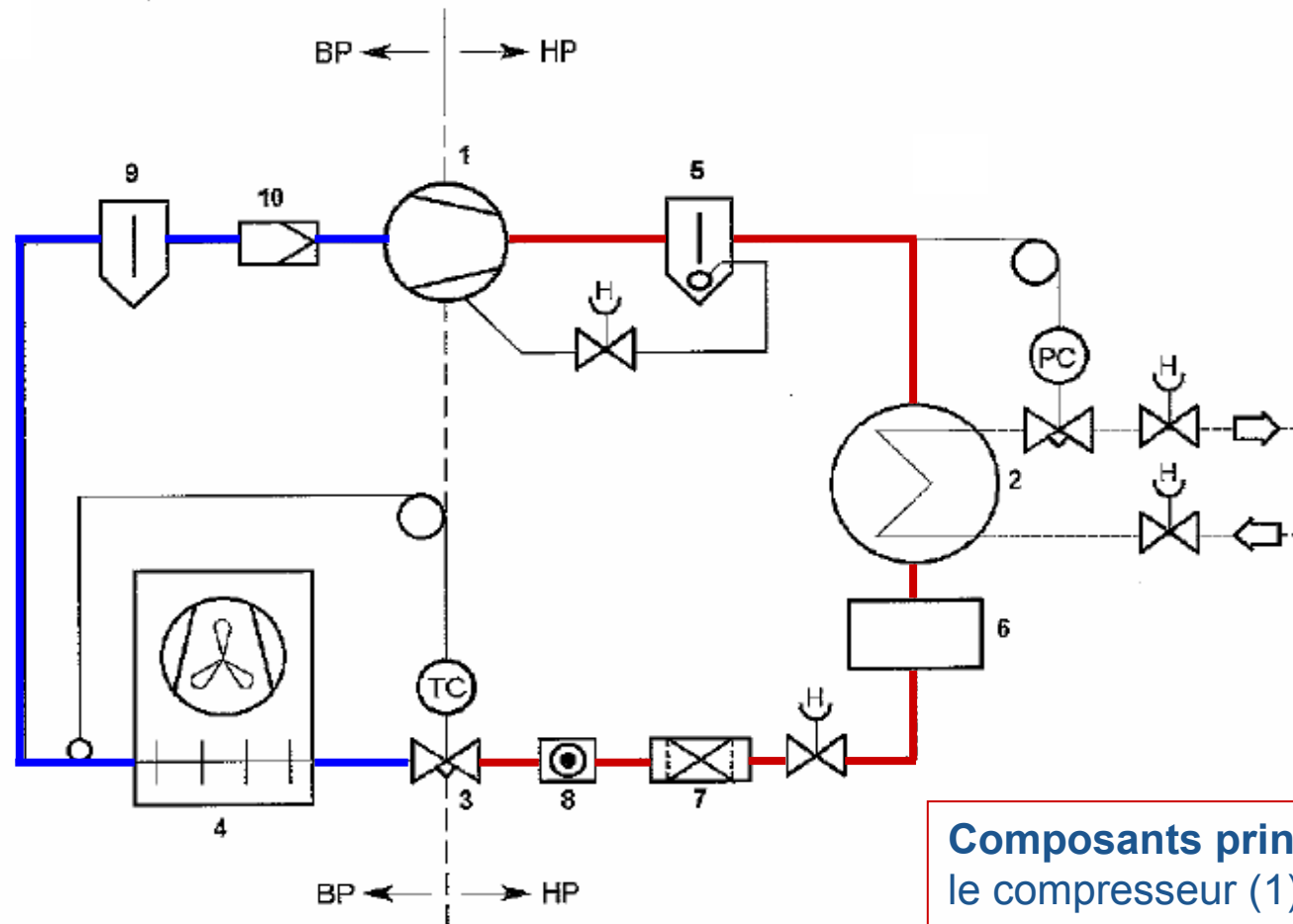


► Machine frigorifique, PAC

⇒ Déplacer une quantité de chaleur d'un niveau bas vers un niveau plus élevé de température



► Constitution d'une installation frigorifique



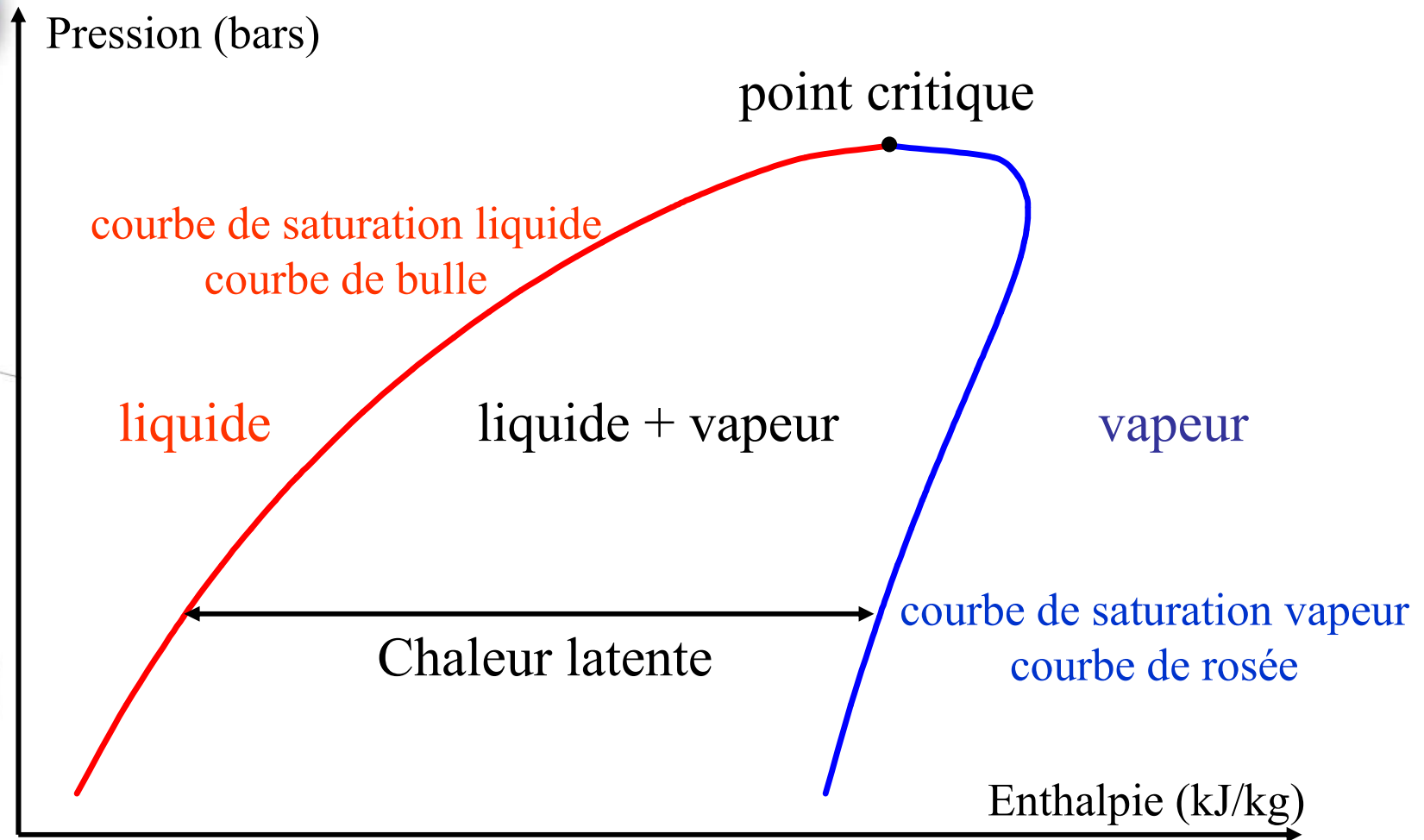
Composants principaux :

le compresseur (1)
le condenseur (2)
le détendeur (3)
l'évaporateur (4)

Composants annexes :

le séparateur d'huile (5), le réservoir de liquide (6),
le déshydrateur (7), le voyant liquide (8),
la bouteille d'aspiration (9), le filtre d'aspiration (10)

► Diagramme de Mollier



La pression est présentée sur une échelle logarithmique

► Diagramme de Mollier

Terminologie

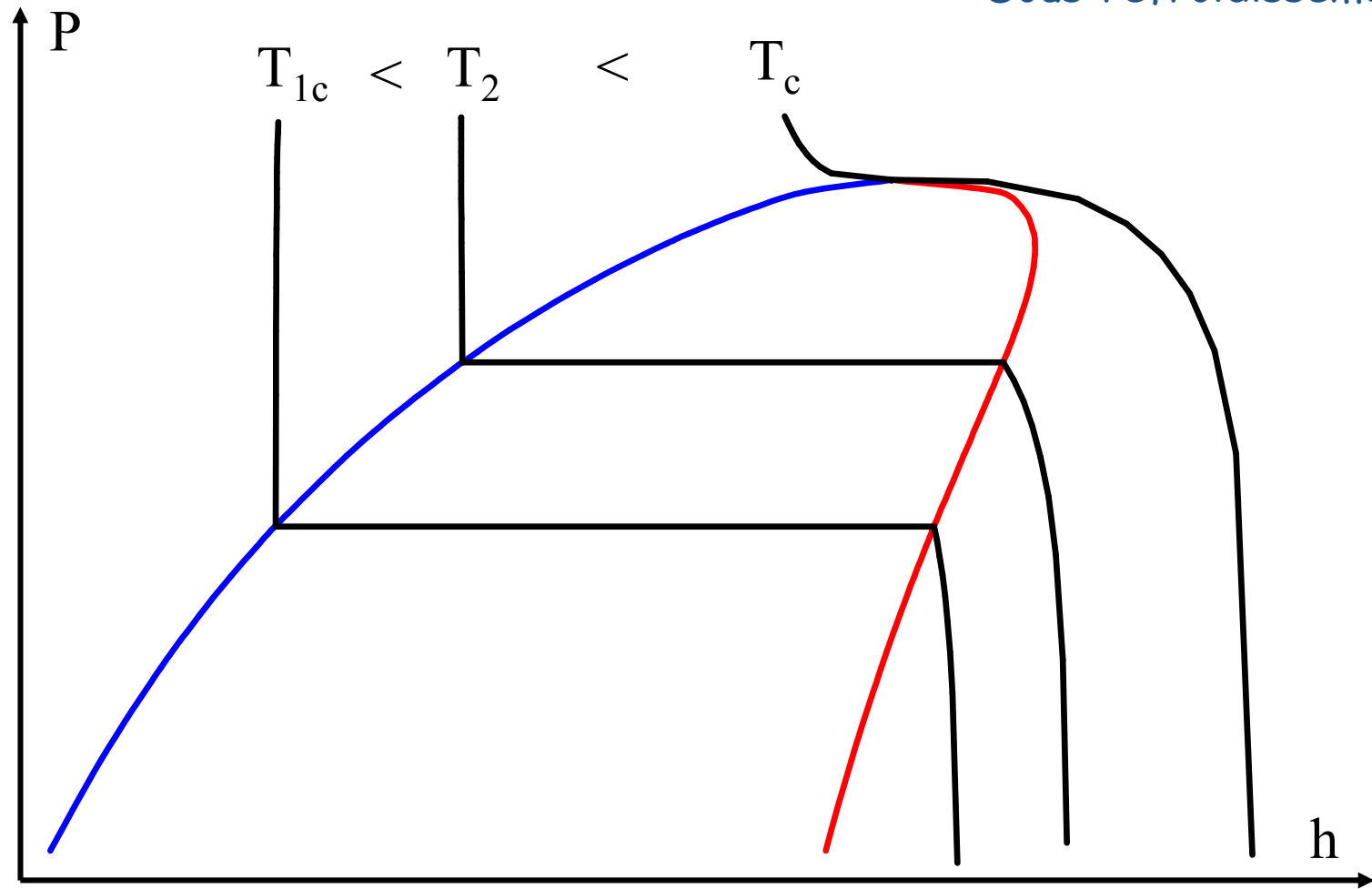
La distinction entre « gaz » et « vapeur » est floue. On parlera de :

- ⇒ « gaz » s'il est improbable qu'il change de phase (l'air ambiant par exemple);
- ⇒ « vapeur » si la probabilité d'occurrence d'un changement de phase est réelle.
- ⇒ Vapeur saturée : vapeur en équilibre avec du liquide.
- ⇒ Liquide saturé : en équilibre avec sa vapeur.
- ⇒ Pression de saturation : pression à laquelle il y a équilibre entre phases pour une température donnée.
- ⇒ Vapeur surchauffée : vapeur qui n'est pas en équilibre avec du liquide et ne peut donc contenir aucune trace de celui-ci.
- ⇒ Liquide sous-refroidi : liquide qui n'est pas en équilibre avec de la vapeur et ne peut donc contenir aucune trace de celle-ci.

► Diagramme de Mollier

→ Courbes isothermes

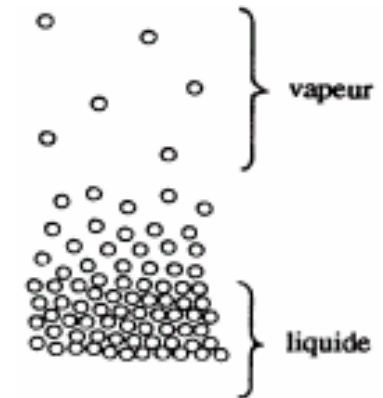
Surchauffe
Sous-refroidissement



► Diagramme de Mollier

Remarques

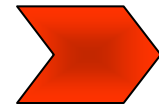
- ⇒ Continuité du passage de l'état liquide à l'état vapeur
(Il n'y a pas de passage brutal entre les deux états)



- ⇒ États métastables

En réalité, en décrivant une isotherme, il peut y avoir :

- un retard de vaporisation : liquide surchauffé
 - un retard de condensation : vapeur sous-refroidie
- évolution brusque vers l'état d'équilibre normal dès la présence des germes de condensation ou des sites de nucléation

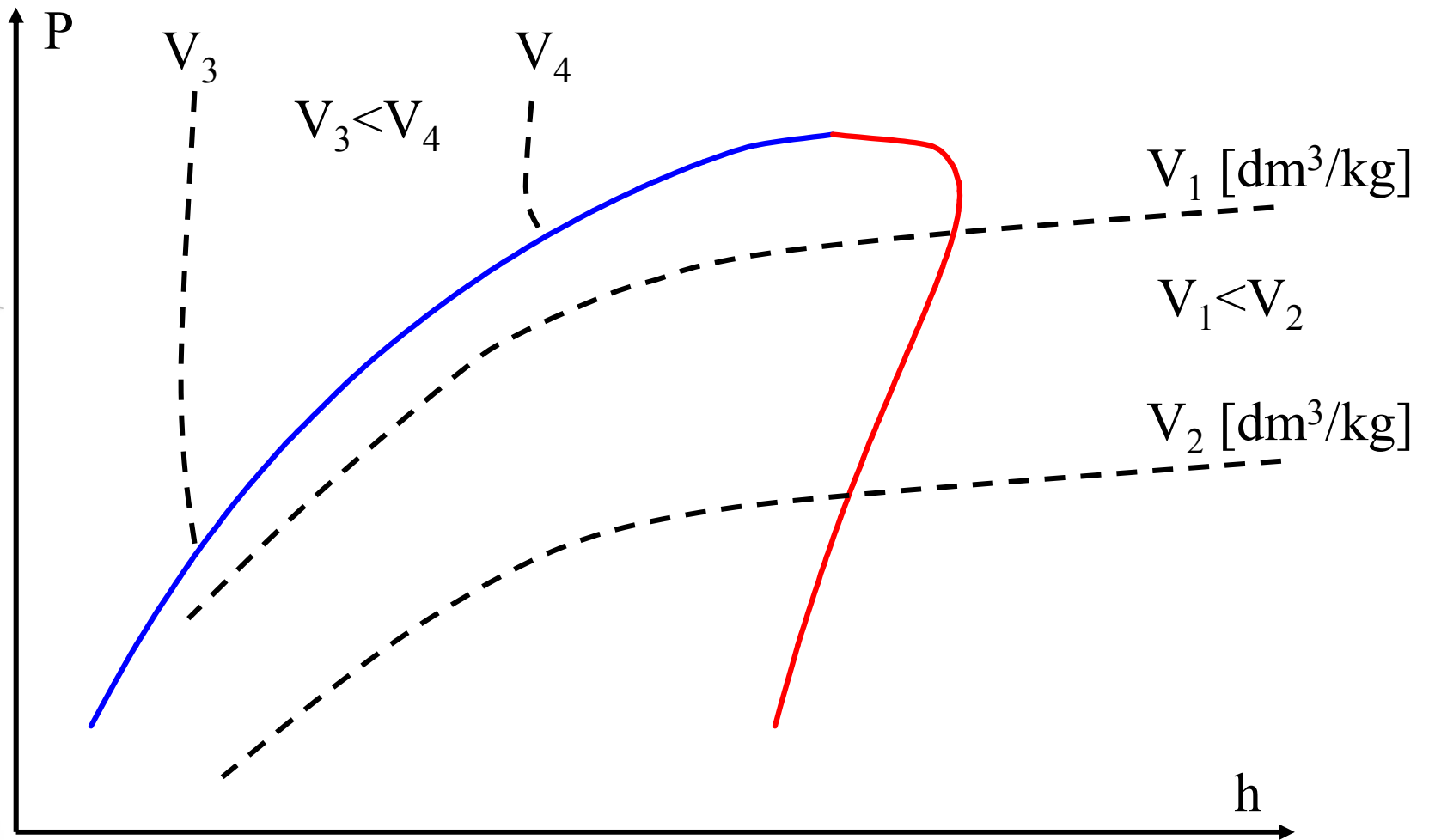


- ⇒ Au-delà du point critique

- Il n'y a plus de changement de phase
- Les isothermes se rapprochent progressivement de la forme hyperbolique, caractéristique d'un gaz idéal

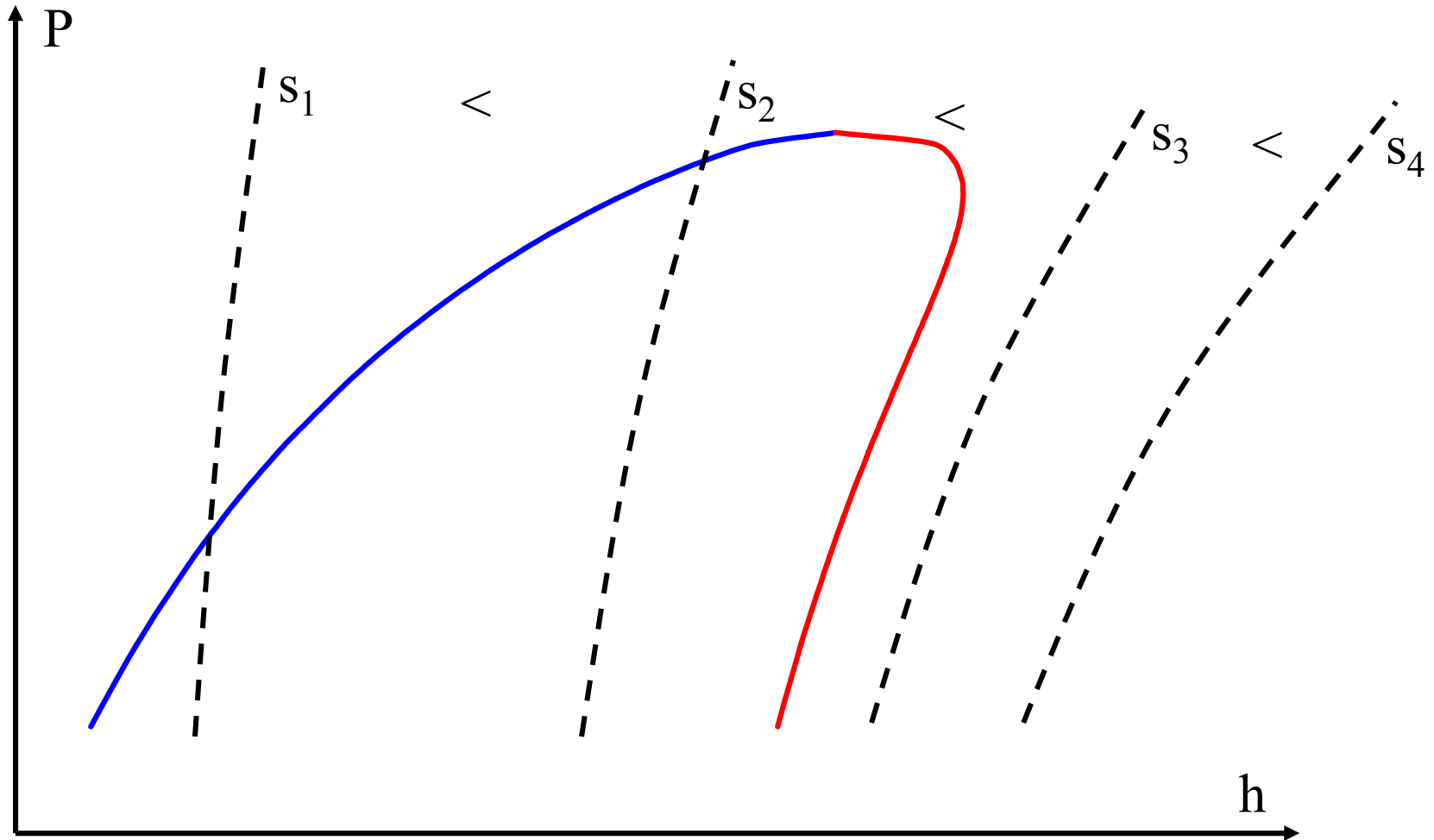
► Diagramme de Mollier

→ Courbes isochores



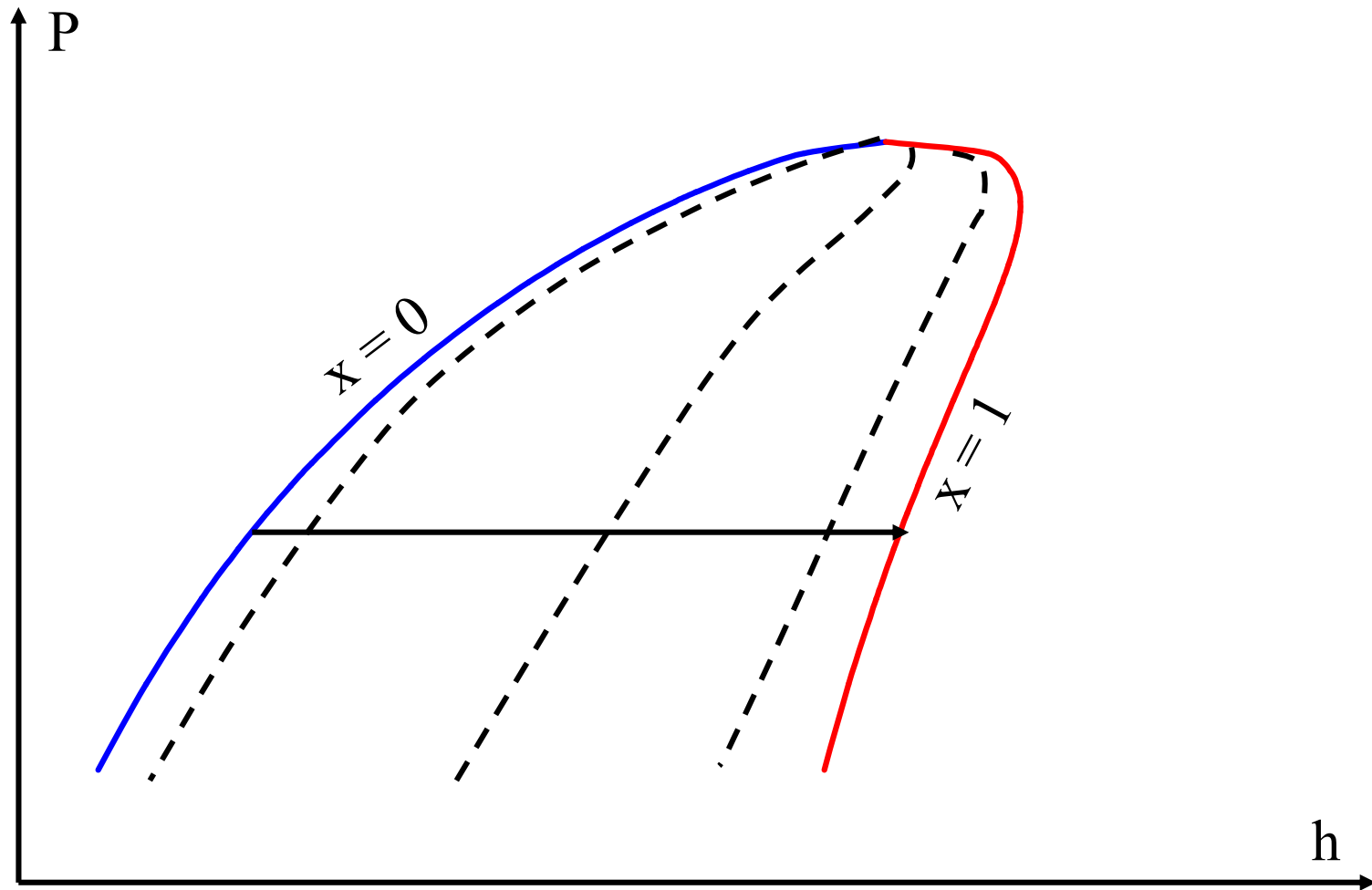
► Diagramme de Mollier

→ Courbes isentropiques

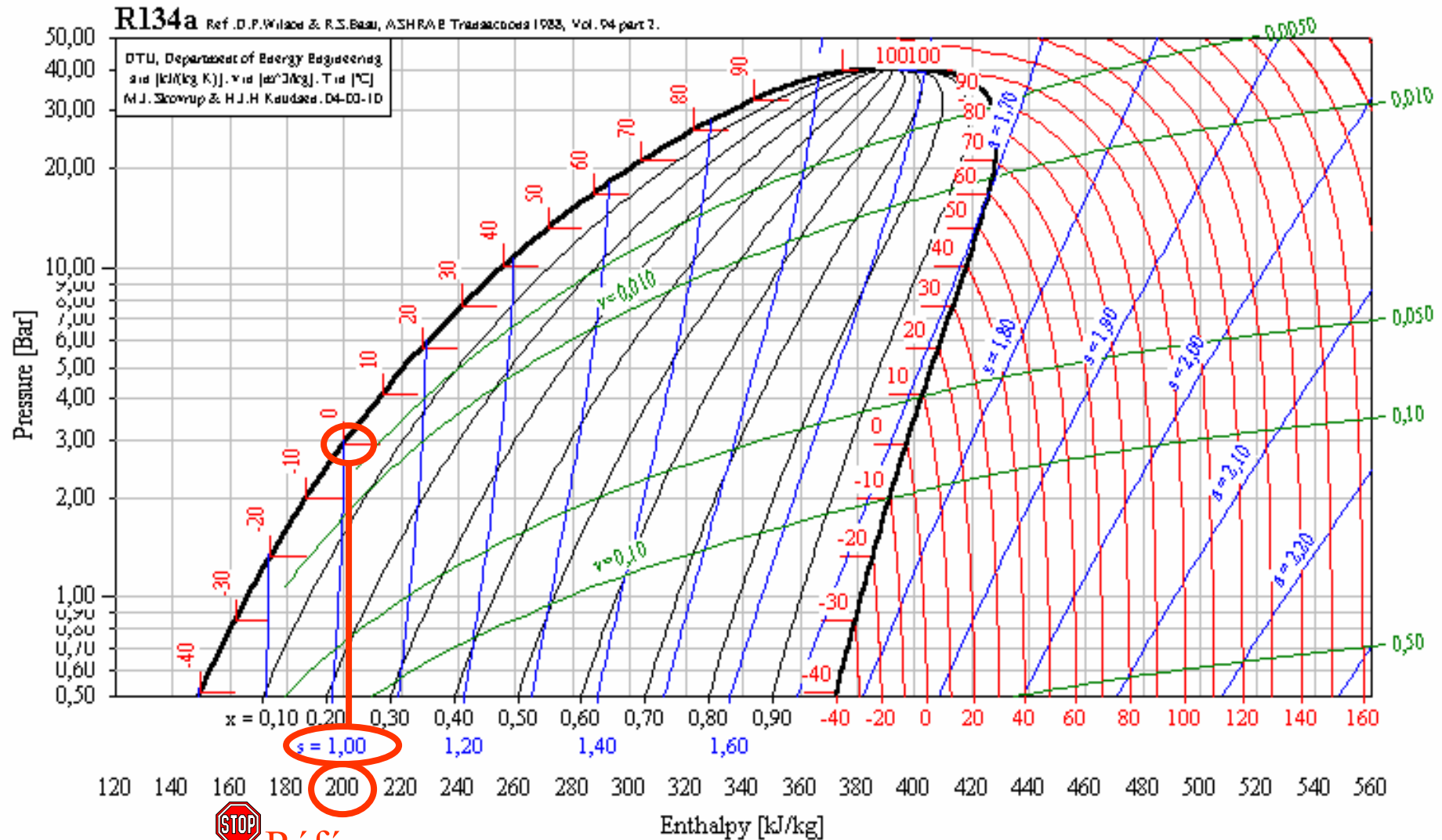


► Diagramme de Mollier

➡ Courbes isotitres en vapeur



► Diagramme de Mollier



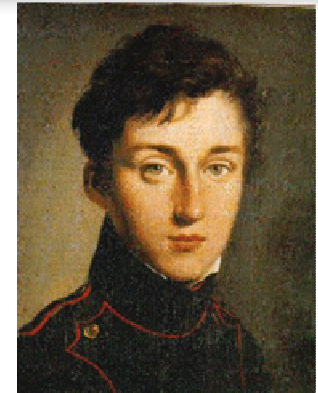
► Cycle de référence

Hypothèses : IRREVERSIBILITES MINIMALES

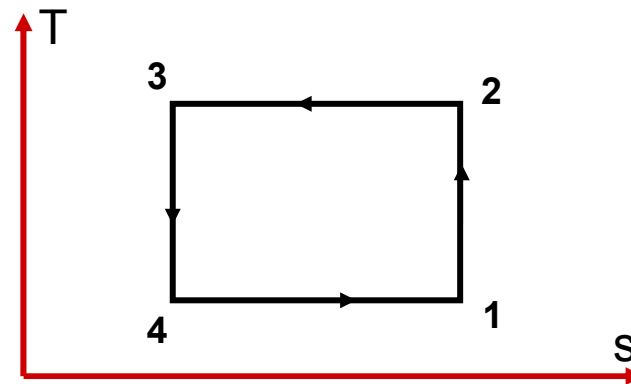
- ⇒ Pas de résistances de transfert de matière
- ⇒ Pas de pertes de pression
- ⇒ Échange thermique réversible
- ⇒ Échange thermique entre fluide frigorigène et fluides secondaires dans les échangeurs uniquement
- ⇒ Compresseur parfait : adiabatique, réversible

► Cycle de Carnot

- ⇒ La machine idéale de Carnot, réversible et sans frottement a permis de comprendre la conversion de chaleur en travail
- ⇒ Le cycle de Carnot est un cycle réversible entre deux sources de chaleur, il est composé de deux isothermes et de deux isentropes



(1796-1832)



1^{er} PP

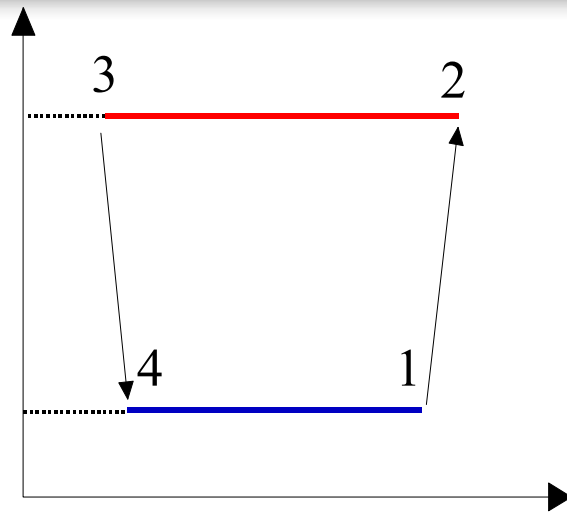
$$Q_o - Q_k + W = 0$$

2^{ème} PP

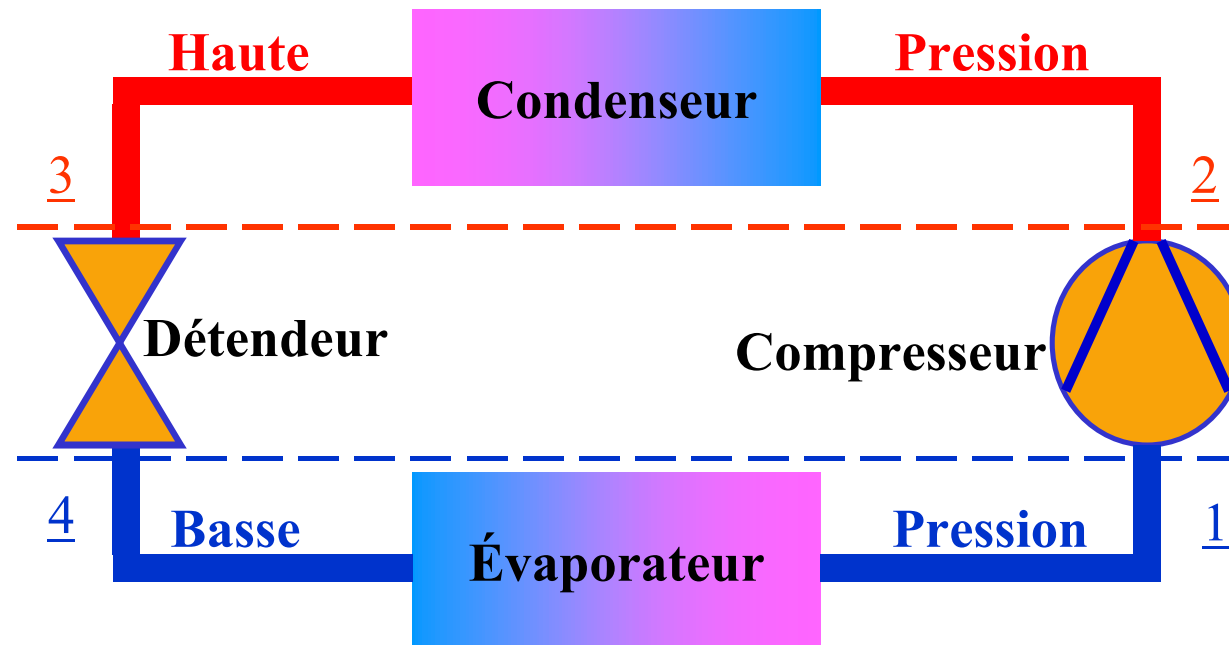
$$\frac{Q_o}{T_o} - \frac{Q_k}{T_k} = 0$$

$$COP_c = \frac{Q_o}{W} = \frac{T_o}{T_k - T_o}$$

► Cycle de référence



4-1 : absorption de chaleur
1-2 : élévation température
2-3 : rejet de chaleur
3-4 : bouclage

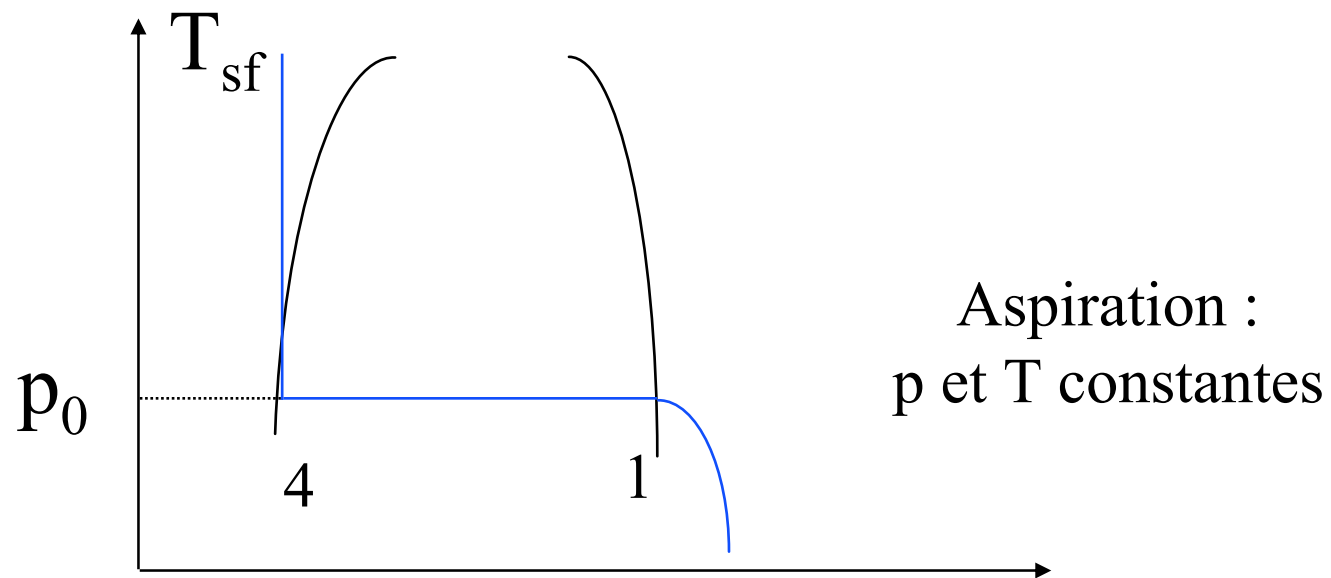


► Cycle de référence

⇒ Évaporateur

$$\begin{array}{ll} \delta p = 0 & p_0 \text{ constante} \\ T_o = T_{sf} & T_o \text{ constante} \end{array}$$

Pour un corps pur ou un mélange azéotrope :
 $T_1 = T_4 = T_o$; $P_1 = P_4 = P_o$ et $X_1 = 1$



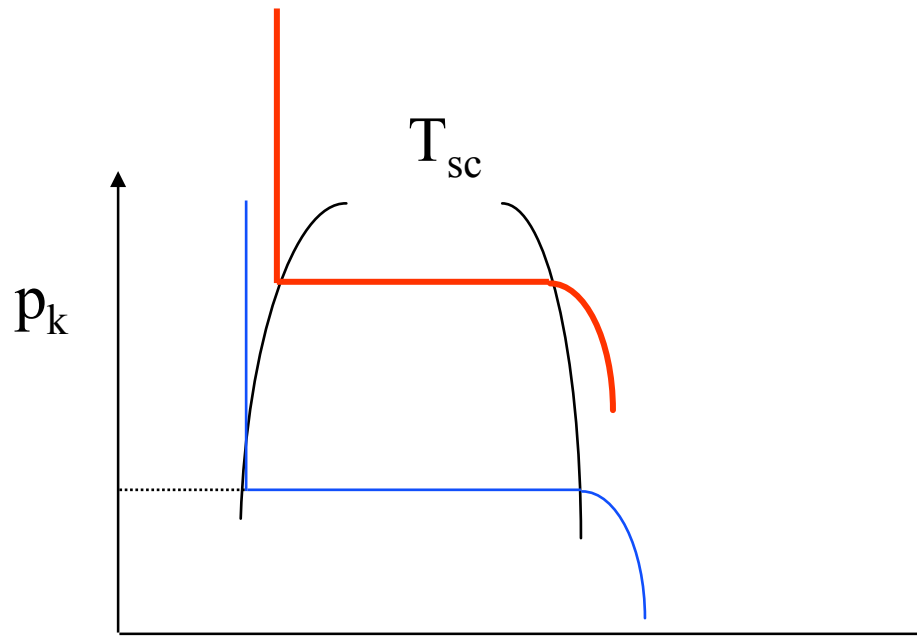
► Cycle de référence

⇒ Condenseur

$$\delta p = 0 \quad P_k \text{ constante}$$

$$T_k = T_{sc} \quad T_k \text{ constante}$$

Pour un corps pur ou un mélange azéotrope :
 $T_3 = T_k$; $P_2 = P_3 = P_k$ et $X_3 = 0$



Conduite liquide :
p et T constantes

► Cycle de référence



⇒ Compresseur

Adiabatique + réversible

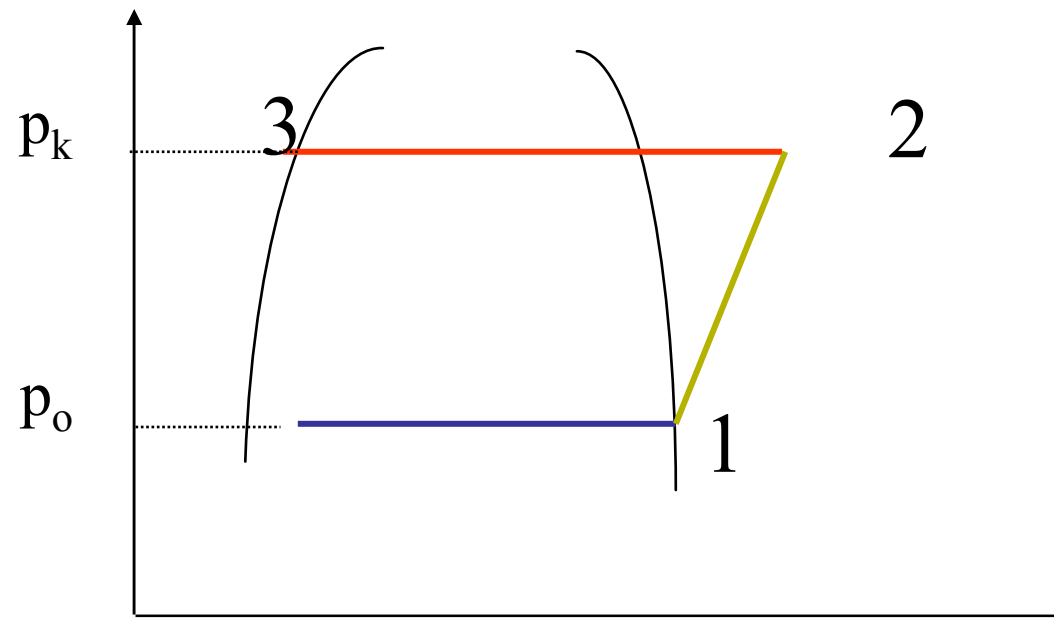


Compression isentropique



$$s_1 = s_2$$

Refoulement compresseur = entrée condenseur



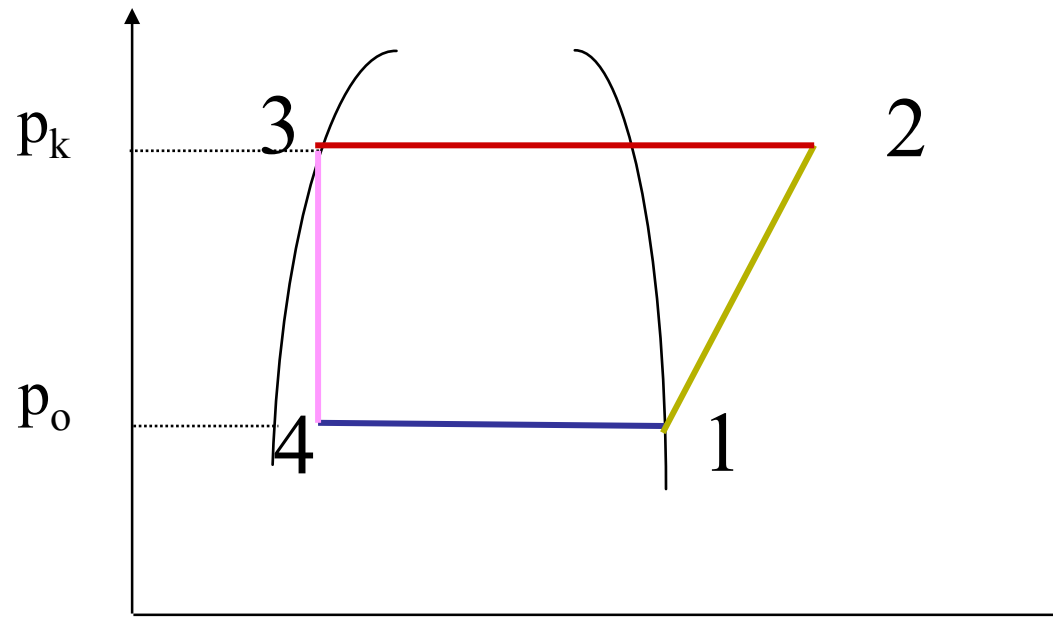
► Cycle de référence

⇒ Détendeur

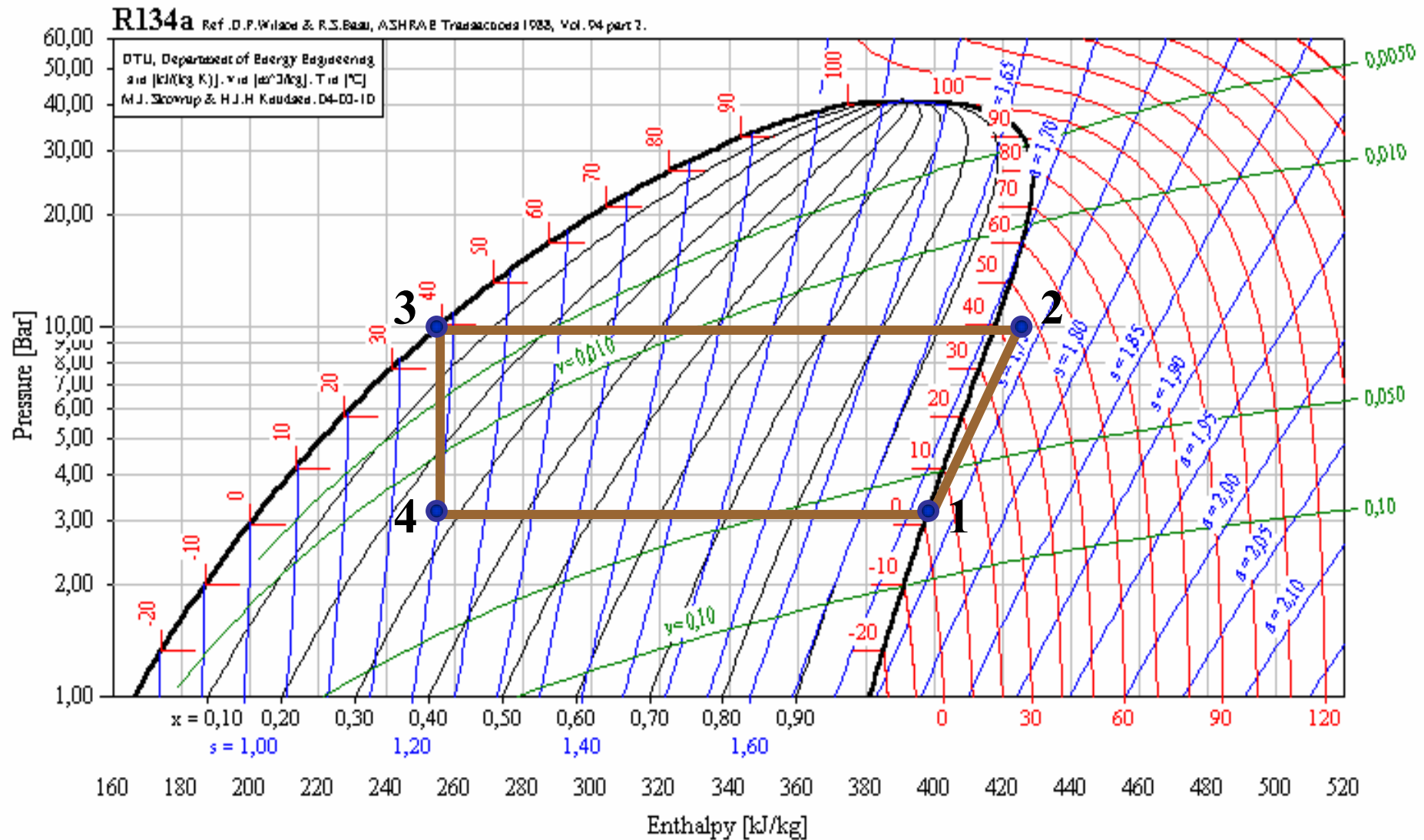
W_{det} non récupéré
 Q_{det} négligeable

↔ Détente isenthalpe

↔ Détente irréversible



► Cycle de référence



► Cycle de référence

⇒ Bilans énergétiques

Variations des énergies cinétique et potentielle sont nulles

Évaporateur

$$0 = \dot{Q}_o + \dot{m}h_4 - \dot{m}h_1$$

Condenseur

$$0 = \dot{Q}_k + \dot{m}h_2 - \dot{m}h_3$$

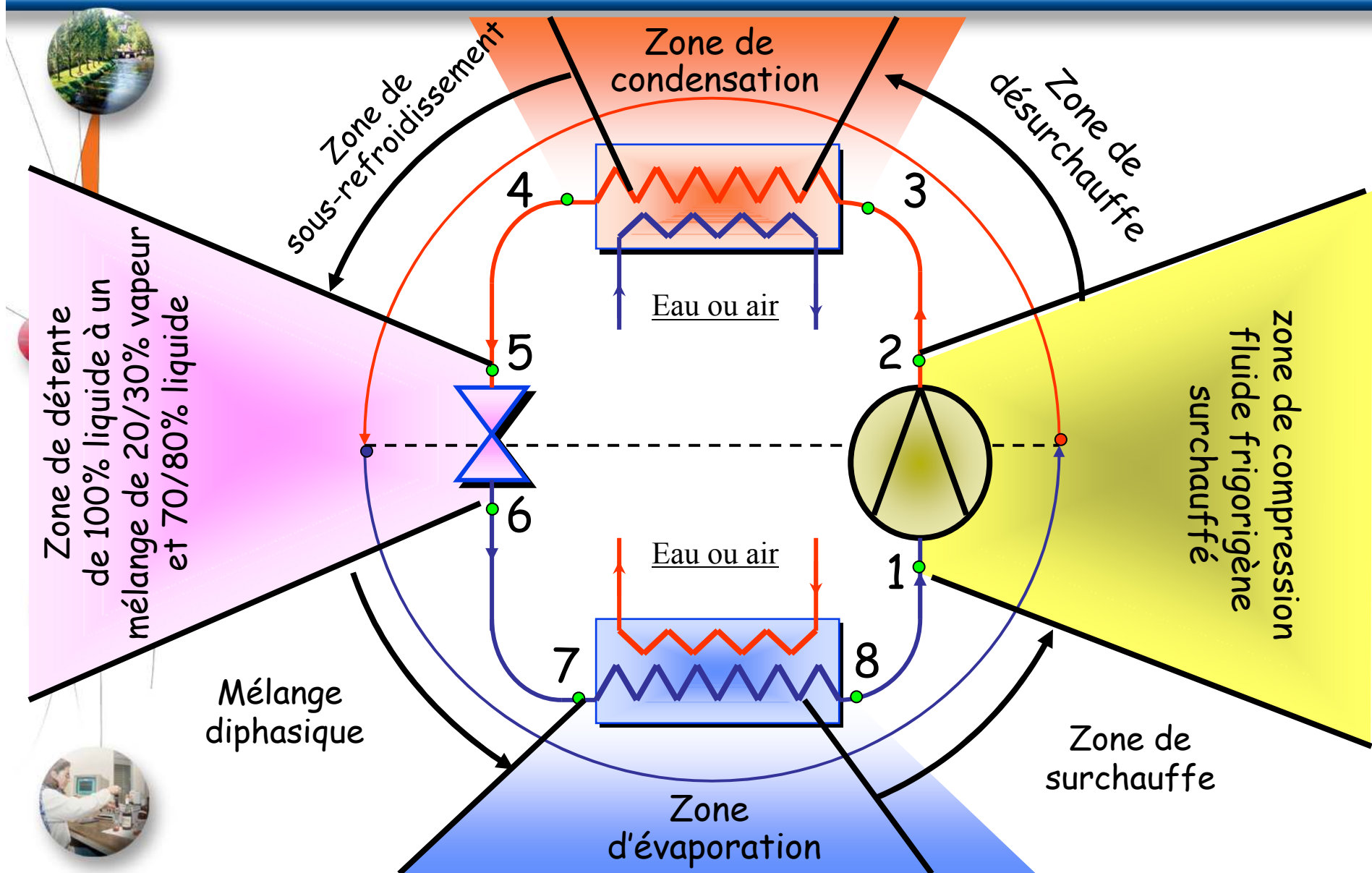
Détendeur

$$0 = \dot{m}h_3 - \dot{m}h_4$$

Compresseur

$$0 = \dot{W} + \dot{m}h_1 - \dot{m}h_2$$

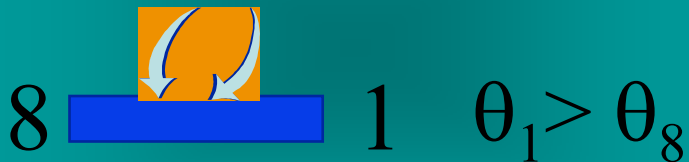
► Cycle réel



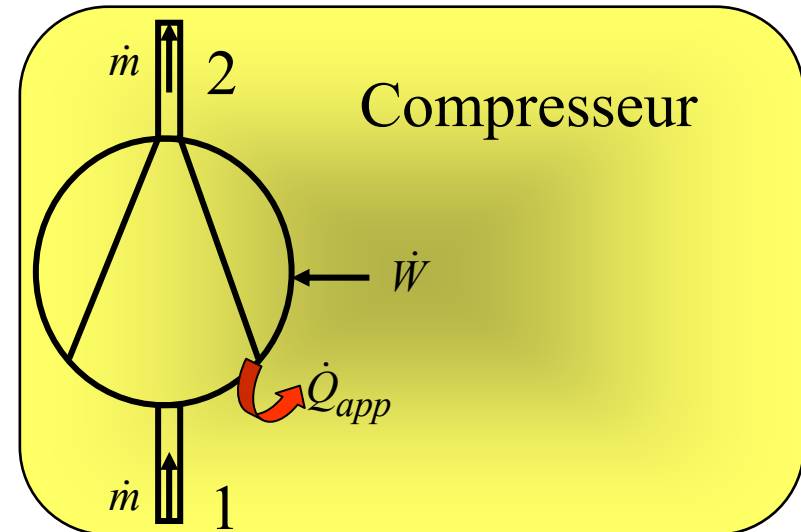
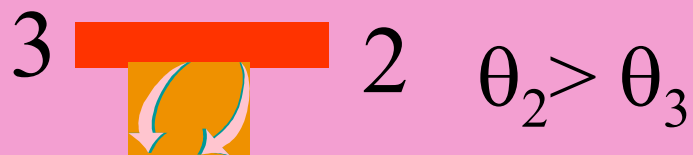
► Cycle réel

➡ Avec pertes thermiques et sans pertes de pression

Ligne d'aspiration



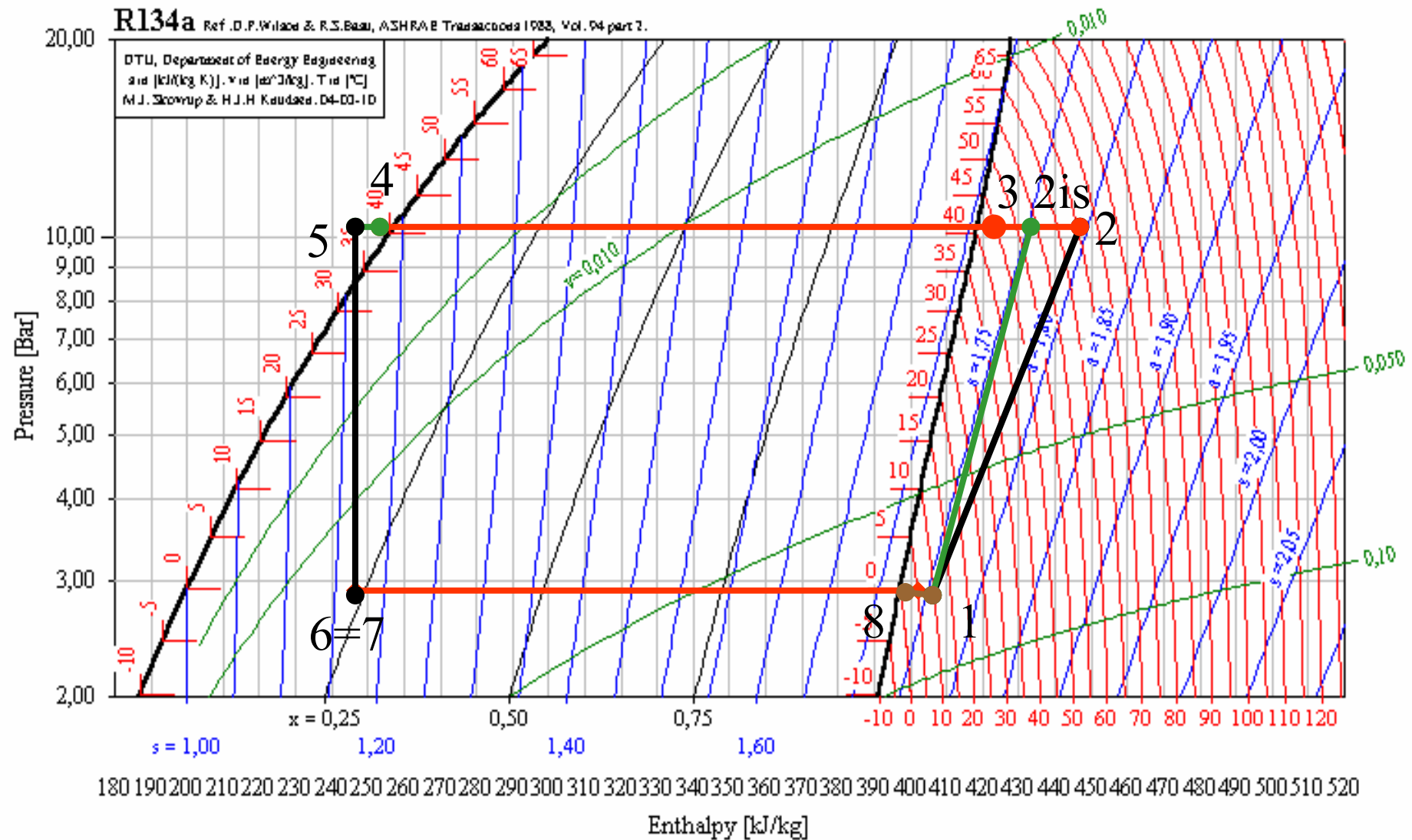
Ligne de refoulement



Ligne liquide

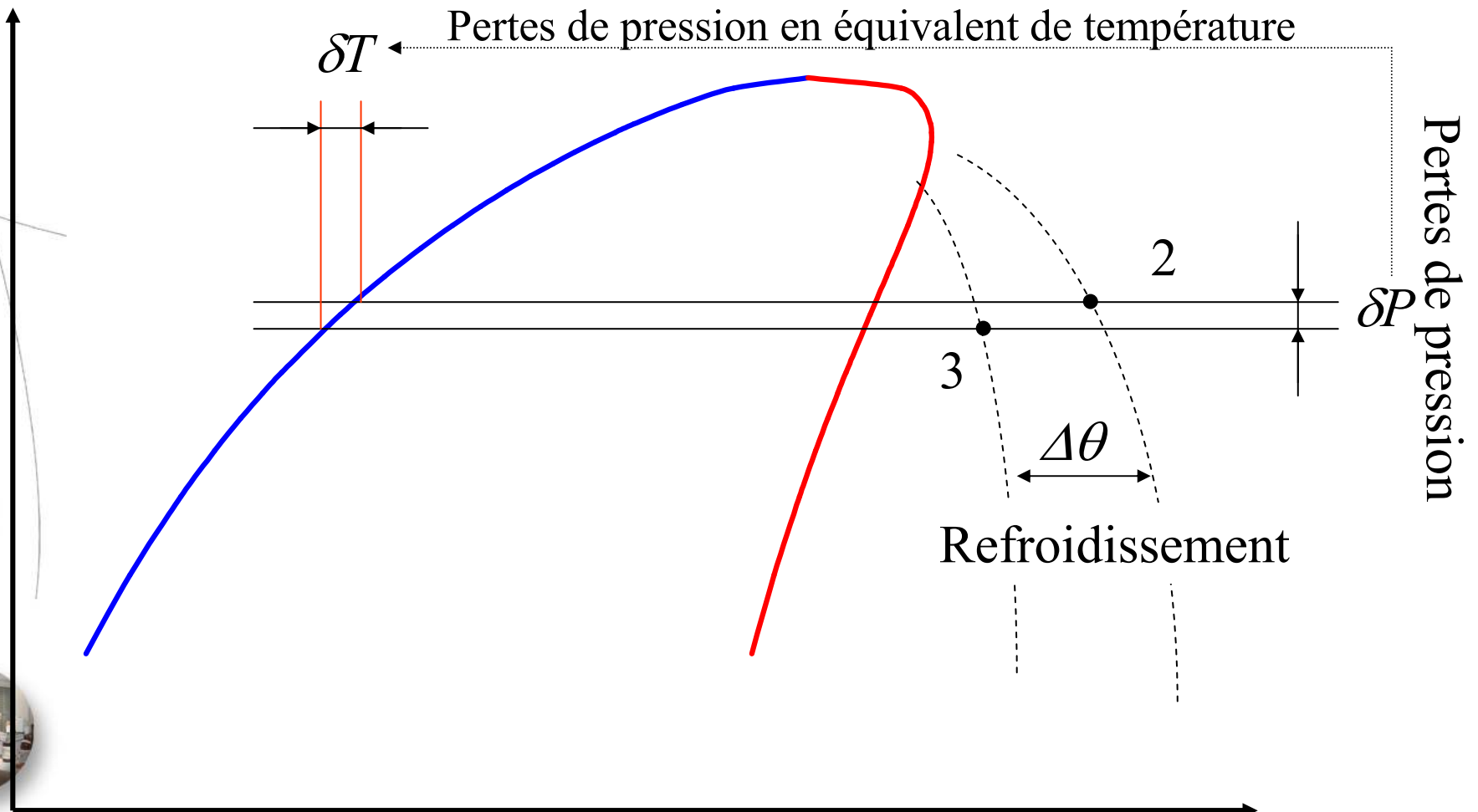


► Cycle réel

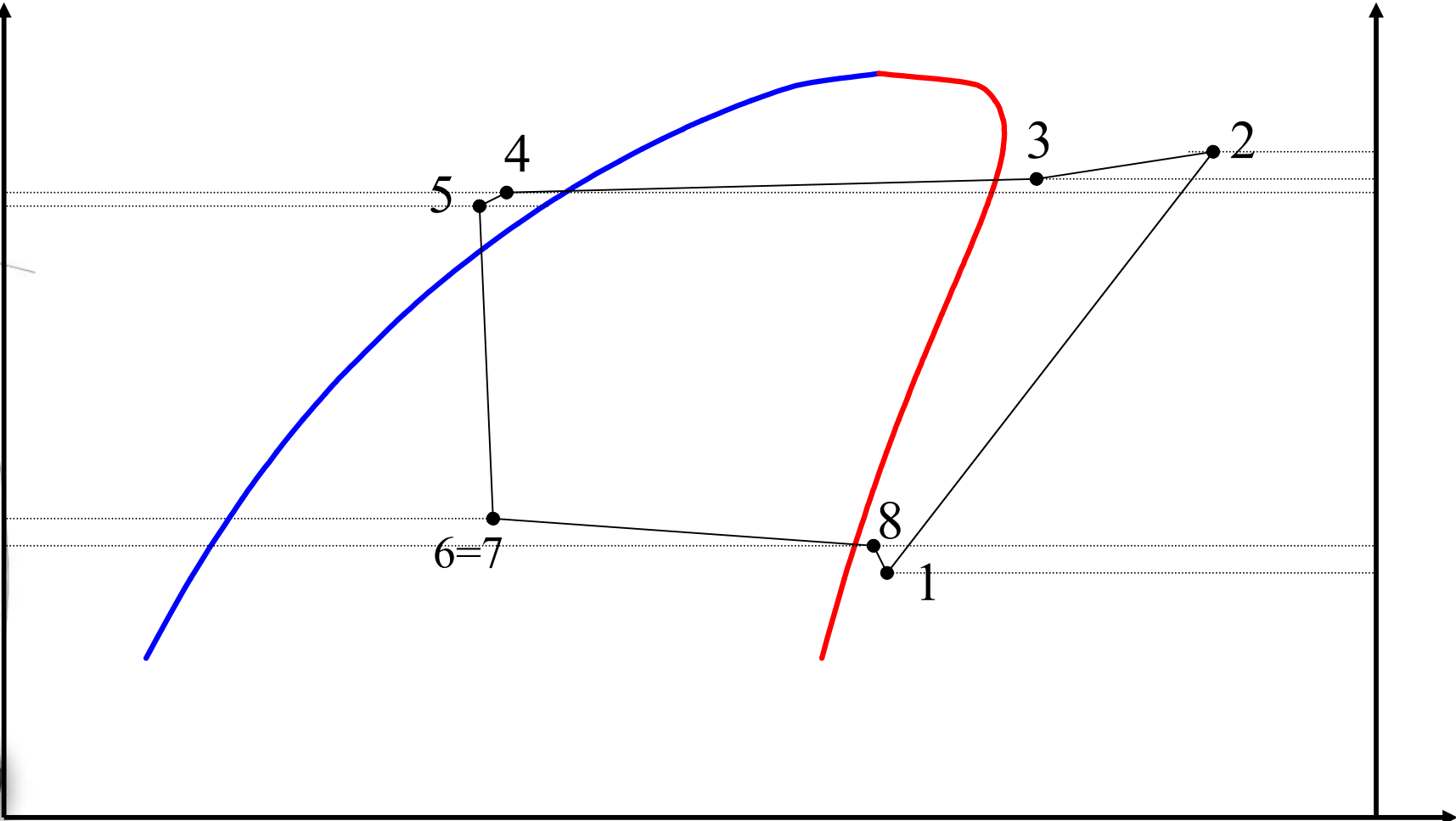


► Cycle réel

➡ Avec pertes thermiques et pertes de pression



► Cycle réel



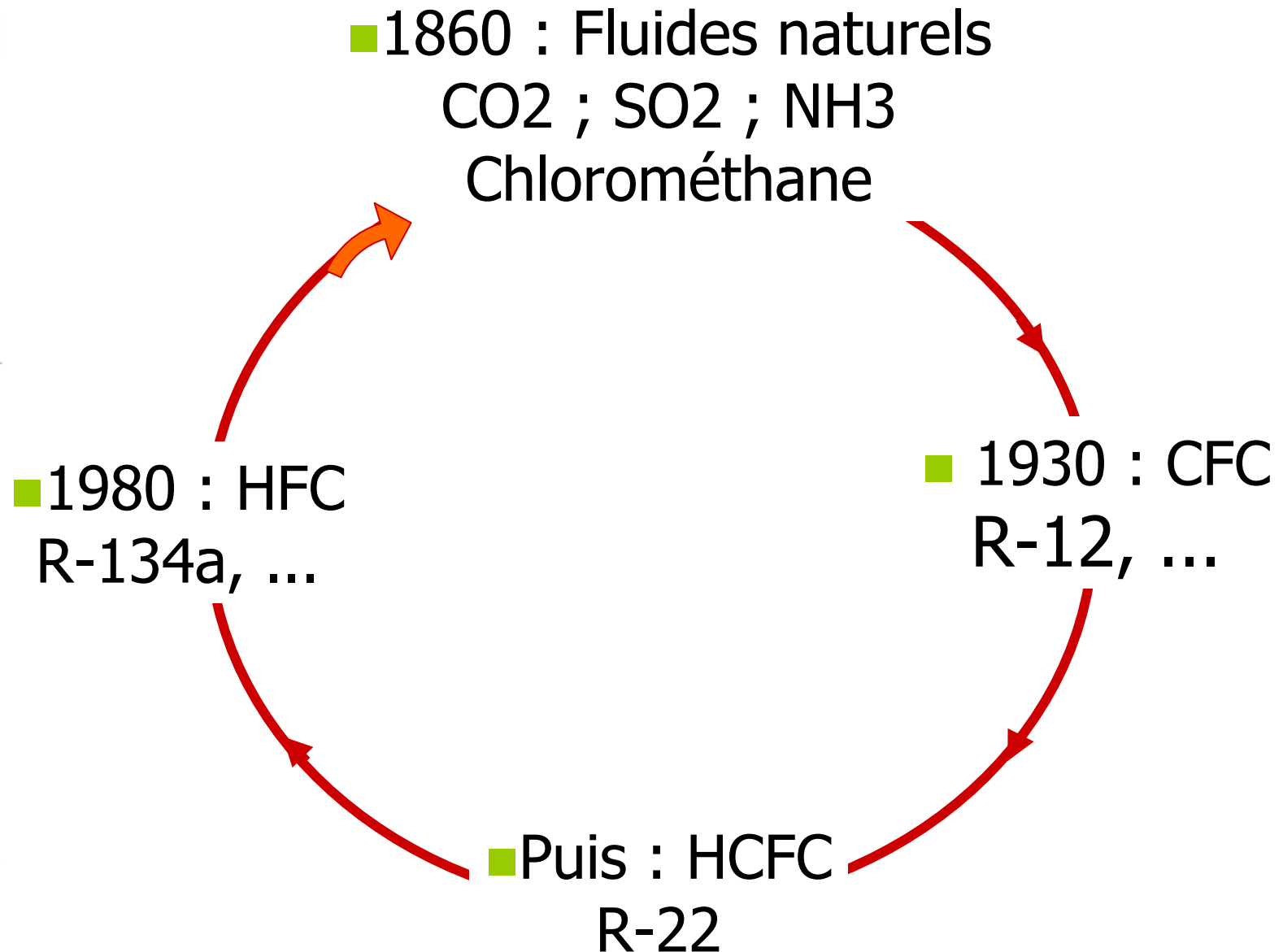
► Les frigorigènes

Types de frigorigènes

- Fluides naturels
NH₃, HC, CO₂
- CFC : ChloroFluoroCarbures
Molécules très stables, destructrices d'ozone (ODP élevé), premier frigorigène synthétique
- HCFC : HydroChloroFluoroCarbures
Molécules moins stables que CFC, destructrices d'ozone (ODP faible), fluides de transition
- HFC : Hydrofluorocarbures
ODP = 0, fluides de substitution

CFC/HCFC/HFC participent à l'effet de serre
Soumis à des contraintes réglementaires

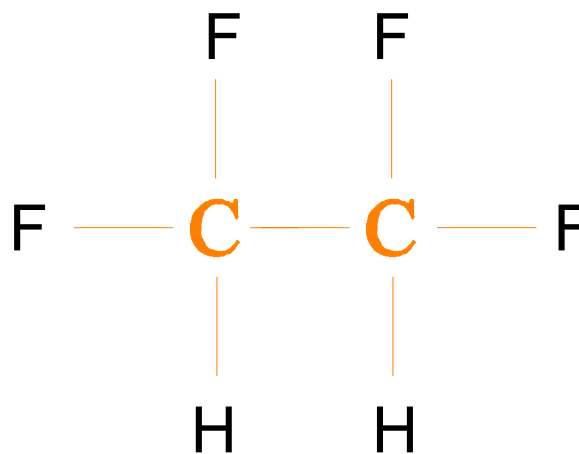
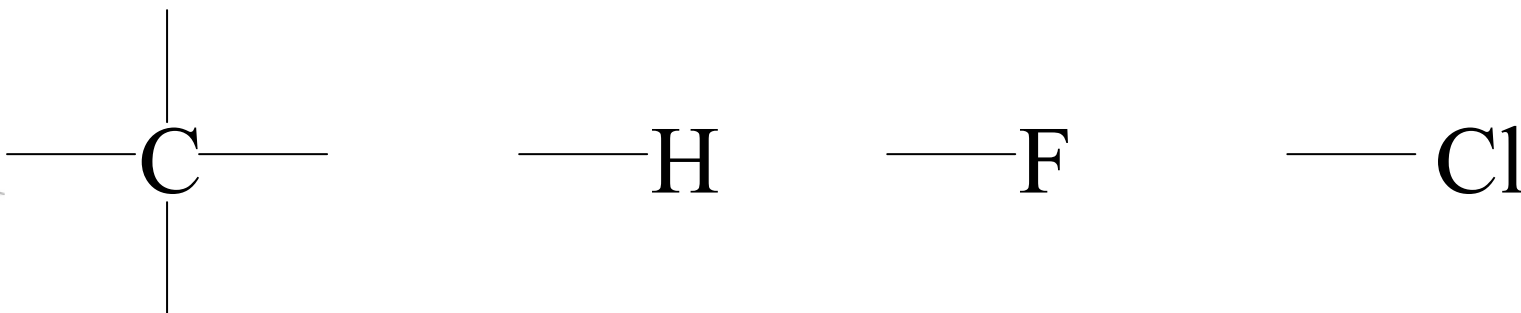
► Les frigorigènes



► Les frigorigènes

⇒ Nomenclature

- Atomes : C, H, F, (Cl), Br,...



► Les frigorigènes

⇒ Nomenclature

- C ; H ; F ; Cl

- R X Y Z

↓
Refrigerant

↓ Nombre de C-1

↓ Nombre de H+1

↓ Nombre de F

R-134a

C = 2 H = 2 F = 4

R-012

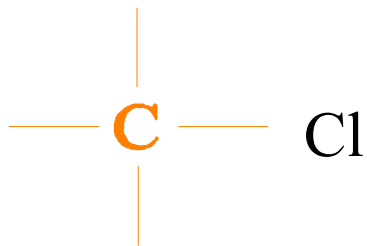
C = 1 H = 0 F = 2

► Les frigorigènes

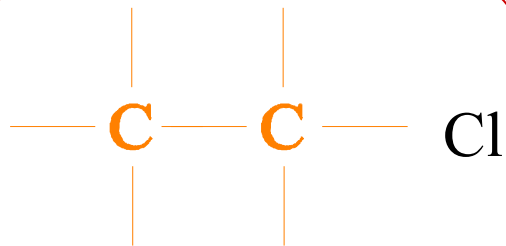
Reconnaître un CFC

• R - **X** **Y** **Z** $\longrightarrow$ CFC : C, F, Cl ; **H = 0**
C H F

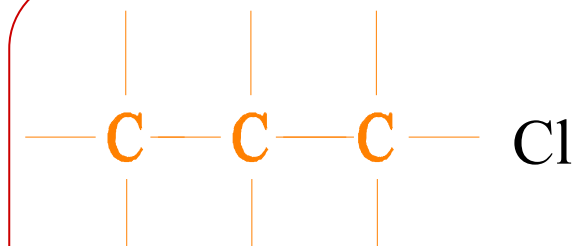
Y=1



$Z \leq 3$



$Z \leq 5$



$Z \leq 7$

Exemple : R11, R12, R13, R14, R113, R114, R115, R116

► Les frigorigènes

Reconnaître un HCFC

• R - **X** **Y** **Z** $\longrightarrow$ HCFC : C, H, F, Cl ; **H** $\geq$ 1
C H F

$Y \geq 2$ et $Cl \geq 1$



$$Y + Z \leq 3$$



$$Y + Z \leq 5$$



$$Y + Z \leq 7$$

Exemple : R123, R124, R22, R141a, R142b

► Les frigorigènes

⇒ Reconnaître un HFC

□ Quand $X=0$ (famille de méthane) $\longrightarrow Y+Z = 5$

Exemple : R32, R23

□ Quand $X=1$ (dérivés de l'éthane) $\longrightarrow Y+Z = 7$

Exemple : R134a, R125, R152a, R143a

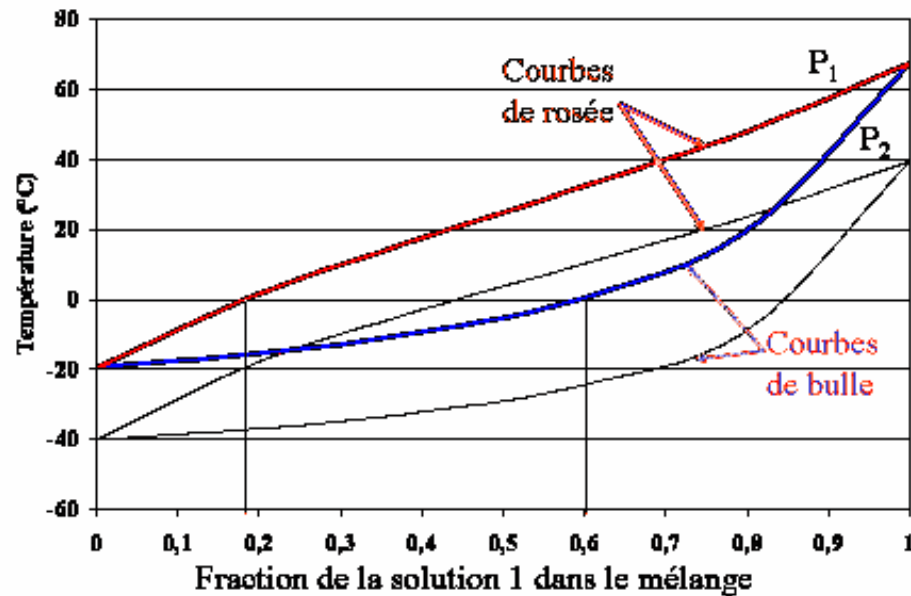
⇒ Mélanges zéotropes (Série 400)

□ Un frigorigène zéotrope (ou non-azéotropique) est un mélange dont les compositions en phase liquide et en phase vapeur diffèrent lorsque les deux phases coexistent.

□ Ces mélanges se voient attribuer un numéro commençant par 4 et finit à mesure de leur découverte

Exemple : R404A, R407C, R410A

► Les frigorigènes



⇒ Mélanges azéotropes (Série 500)

□ Un frigorigène azéotrope se comporte comme un fluide pur.

Exemple : R502, R507, R410A

⇒ Hydrocarbures (Série 600)

Exemple : R600, R600a

► Les frigorigènes

⇒ Les composés inorganiques (Série 700)

La règle consiste à rajouter la masse molaire du fluide a près le chiffre 7

NH_3 : M = 14 + 3

R-717

H_2O : M = 2 + 16

R-718

CO_2 : M = 12+ 32

R-744

NH_3 (60%)+Diméthyléther (40%) : M = 12+ 32

R723

Applications	Remarques	Fluides existants	Fluides alternatifs
Froid domestique	• nécessité de l'amélioration des compresseurs • mise en place de nouveaux lubrifiants	R12	R134a
			R600a (isobutane)
Froid commercial		R12 R502 R22	R134a, R404a R404a R404a, R134a
• petites et moyennes puissances 1 à 10 kW • froid positif			
Procédés agro-alimentaires et les autres procédés industriels	problème de surcoût pour l'utilisation de l'ammoniac	ammoniac R22 R502	ammoniac R404a
Groupes refroidisseurs d'eau		R22 R22 R22	ammoniac R407c, R410a, R404a pas de remplaçant R134a
P < 10 kW			
100 kW < P < 1 MW P > 1 MW			
Climatisation AIR/AIR	Changement du lubrifiant	R22	R410a, R407c, R134a

Tableau de synthèse des fluides frigorigènes alternatifs aux CFC par application.

► Les frigorigènes



Critères thermodynamiques

- efficacité : $\frac{h_8 - h_6}{h_2 - h_1}$ et chaleur latente, élevés (cycle théorique)



Critères de sécurité et d'environnement

- toxicité ;
- inflammabilité ;
- effet sur la couche d'ozone ;
- effet de serre.



Critères technologiques, opérationnels et économiques

- masse volumique du liquide élevée = compacité
- pression de fonctionnement : P_k modérée et $P_k > P_{atm}$
- propriétés aérauliques et thermiques : viscosité faible et conductivité thermique élevée ;
- compatibilité (huile ; matériaux ; stabilité chimique et thermique) ;
- coût et disponibilité.

