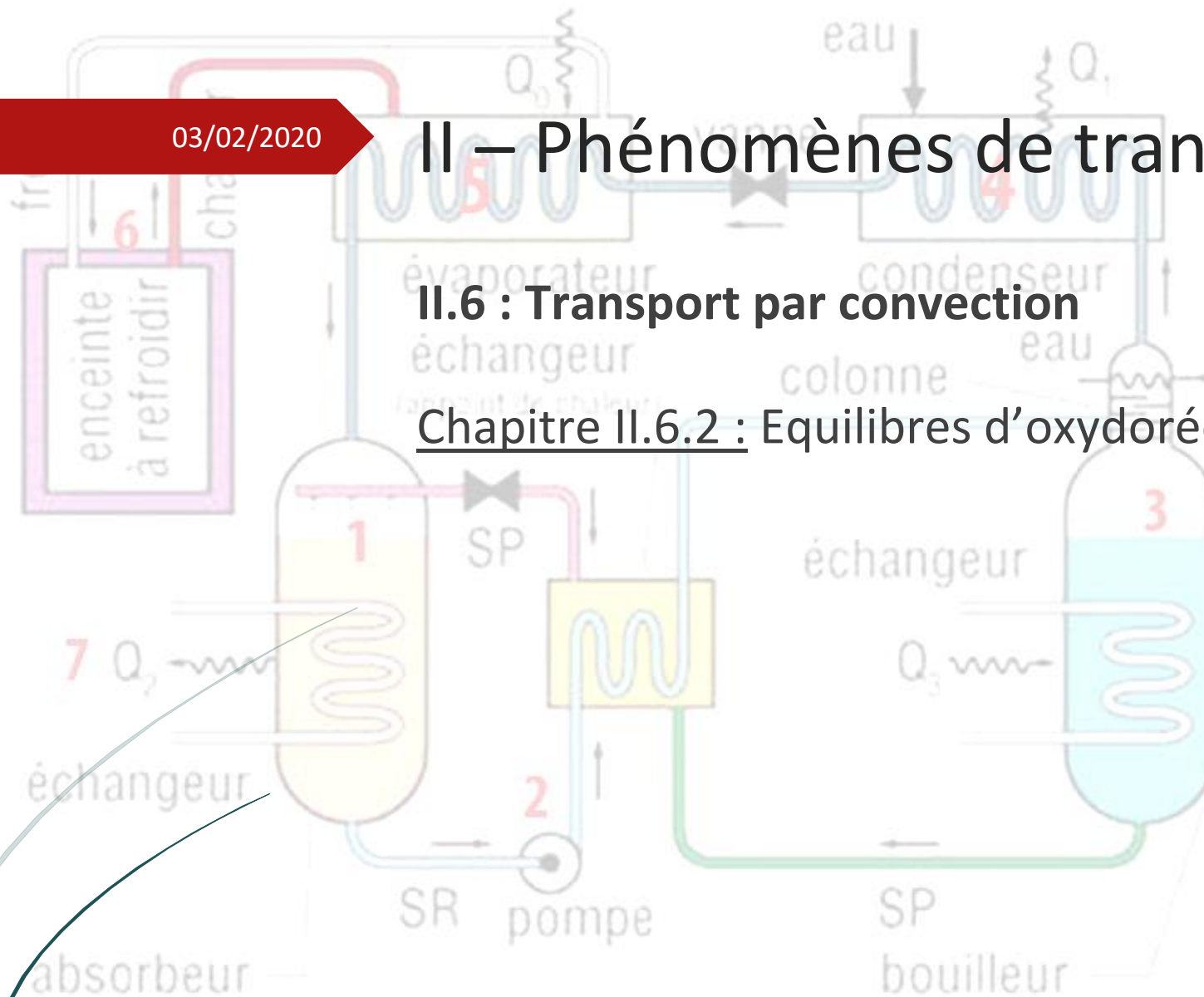


03/02/2020

II – Phénomènes de transport

II.6 : Transport par convection

Chapitre II.6.2 : Equilibres d'oxydoréduction



Source : Internet Yahoo encyclopédie

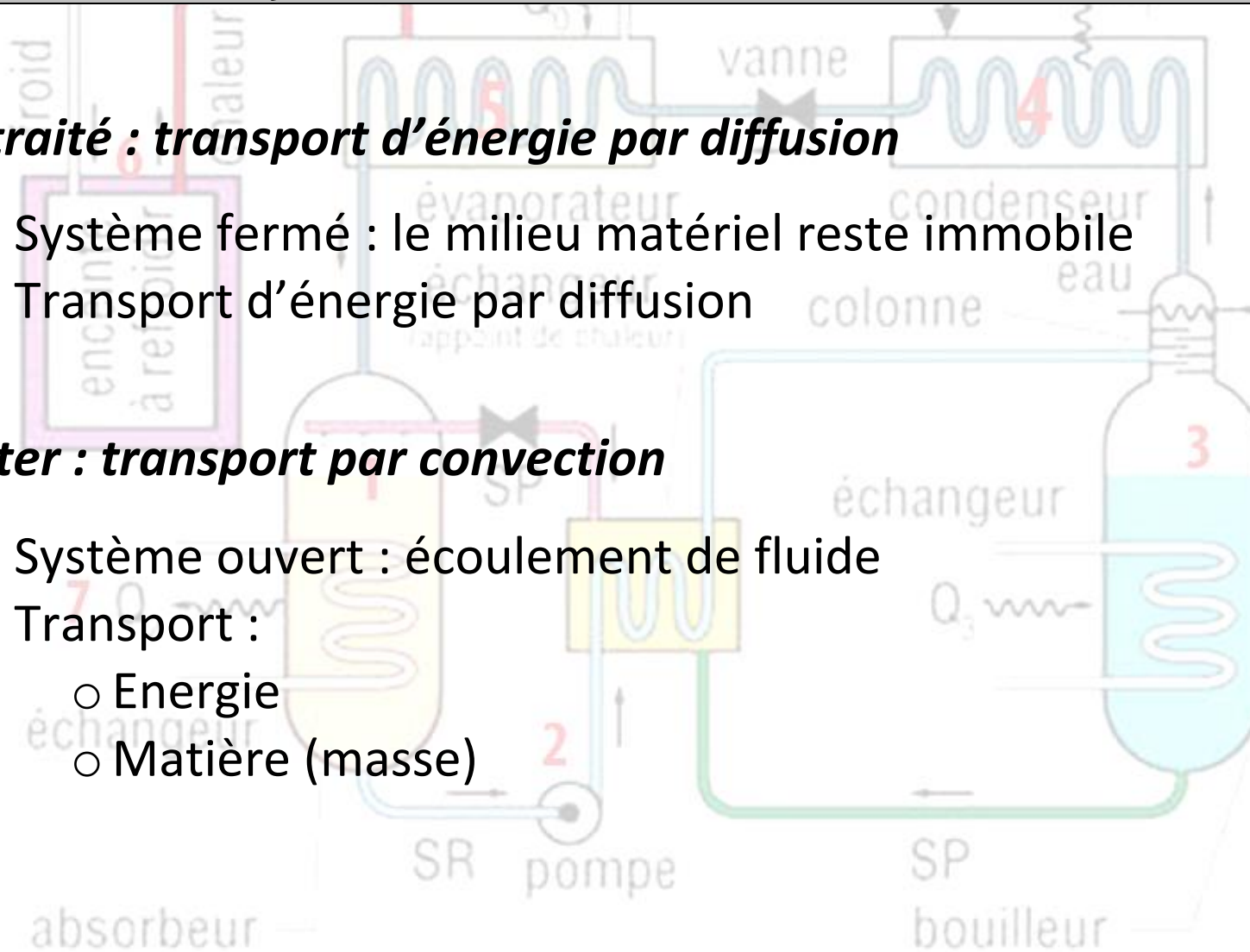
Problématique

Déjà traité : transport d'énergie par diffusion

- Système fermé : le milieu matériel reste immobile
- Transport d'énergie par diffusion

A traiter : transport par convection

- Système ouvert : écoulement de fluide
- Transport :
 - Energie
 - Matière (masse)



Source : Internet Yahoo encyclopédie

Plan du cours

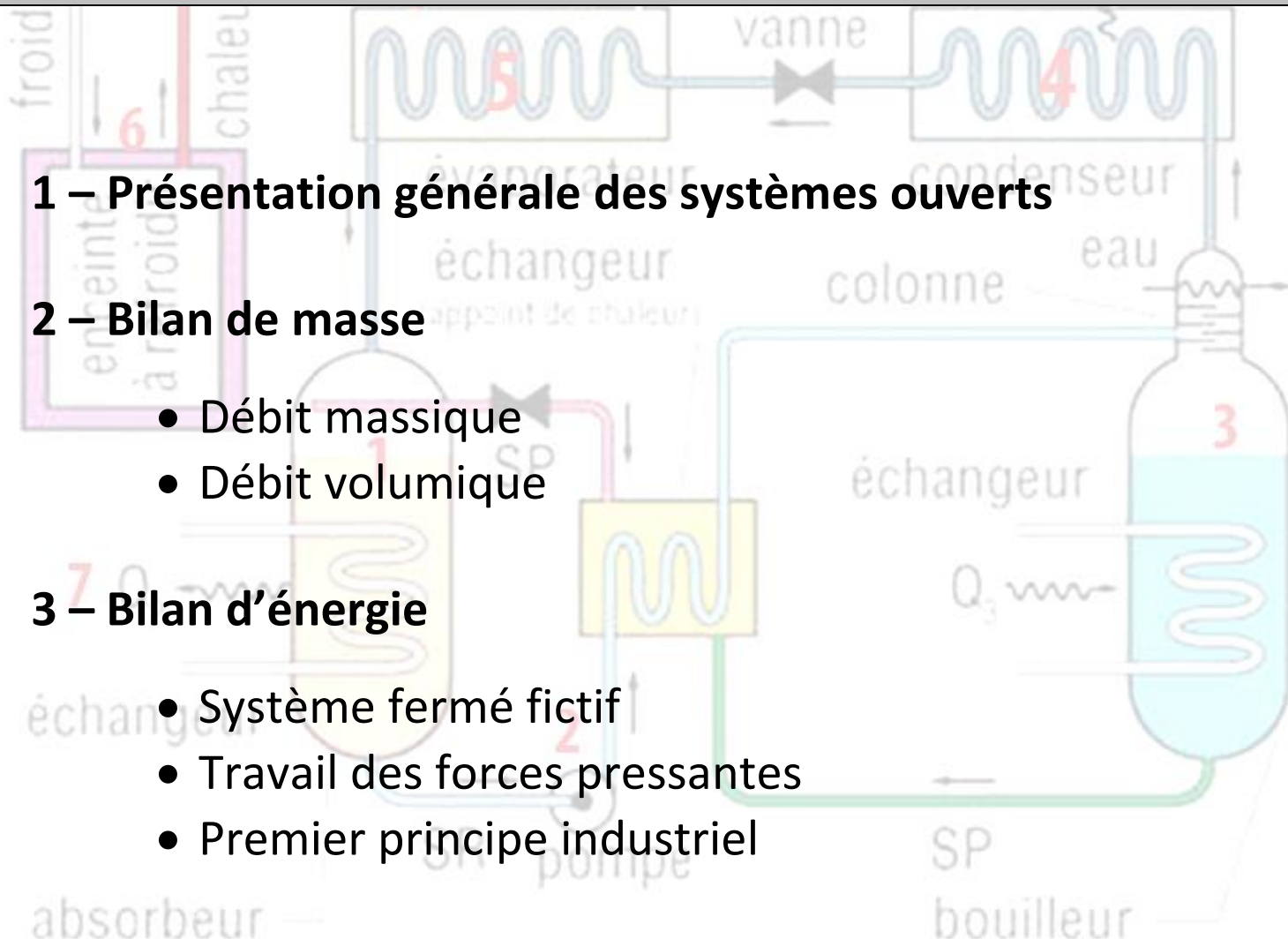
1 – Présentation générale des systèmes ouverts

2 – Bilan de masse

- Débit massique
- Débit volumique

3 – Bilan d'énergie

- Système fermé fictif
- Travail des forces pressantes
- Premier principe industriel



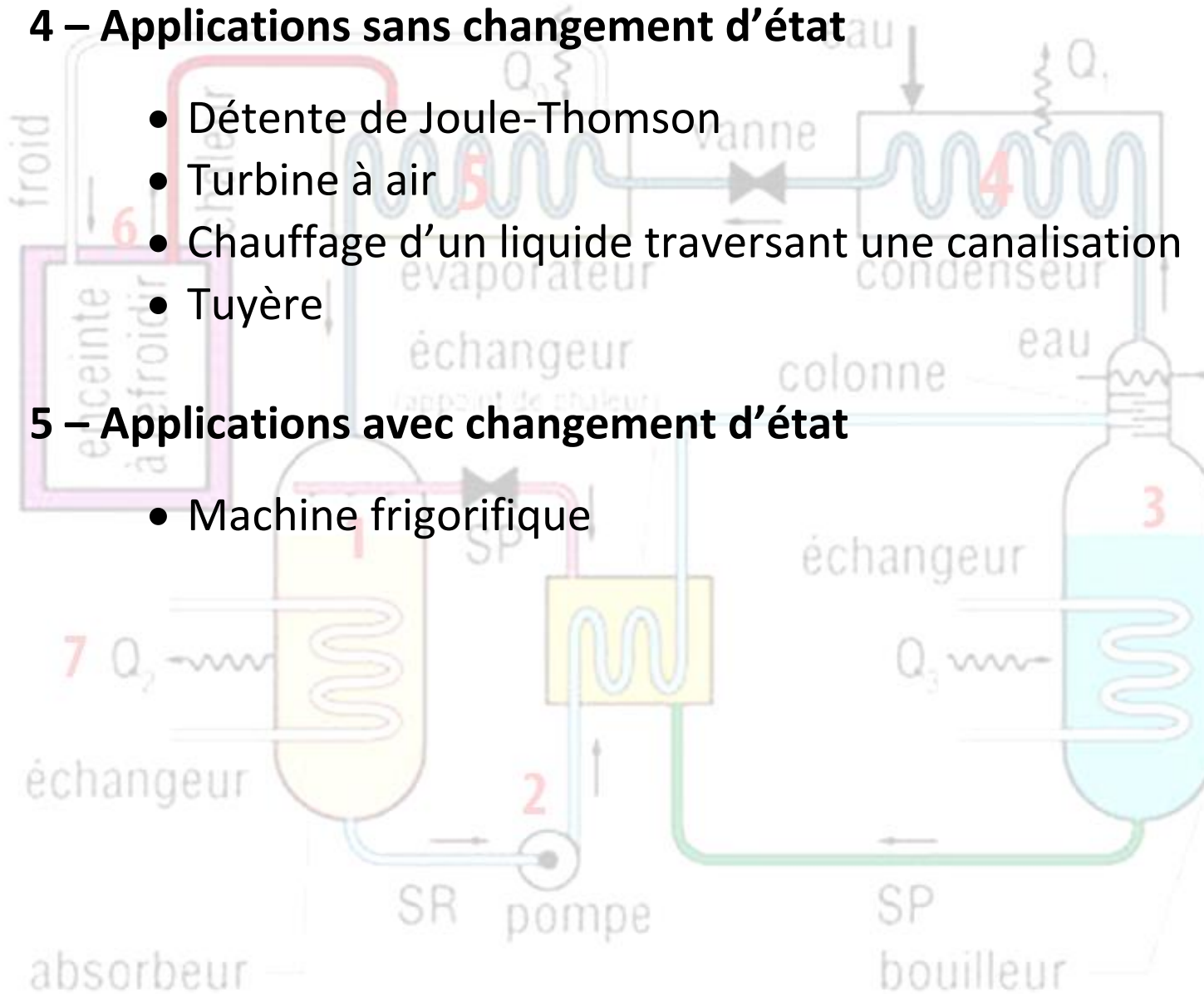
Source : Internet Yahoo encyclopédie

4 – Applications sans changement d'état

- Détente de Joule-Thomson
- Turbine à air
- Chauffage d'un liquide traversant une canalisation
- Tuyère

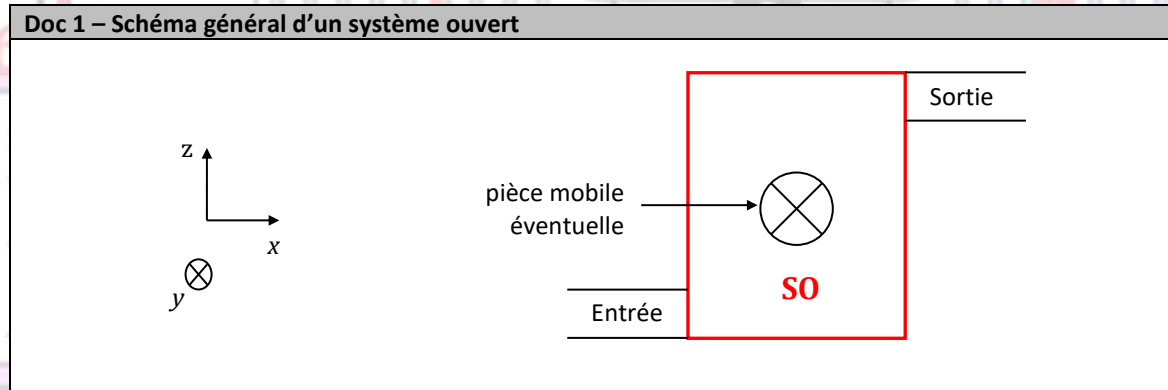
5 – Applications avec changement d'état

- Machine frigorifique



Source : Internet Yahoo encyclopédie

1. Présentation générale des systèmes ouverts



- **Écoulement** : Entrée et/ou sortie de fluide
- **Surface de contrôle** : Délimitation fictive du SO
- **Echanges énergétiques** :
 - Voie thermique : Q
 - Voie mécanique : W_{pression} et W_{utile}

Source : Internet Yahoo encyclopédie

2. Bilan de masse

2.1. Débit massique

- **Notation** : quantité δm traversant Σ pendant dt
- **Débit massique** :

$$D_m = \frac{\delta m}{dt}$$

- **Expression en fonction des données de l'écoulement**

- Distance parcourue par le fluide pendant dt : $d\ell = v \cdot dt$
- Volume élémentaire $\delta V = S \cdot d\ell$
- Débit massique :

$$D_m = \rho \cdot v \cdot S$$

Source : Internet Yahoo encyclopédie

2.2. Débit volumique

- **Notation** : volume δV traversant Σ pendant dt

- **Débit massique** :

$$D_v = \frac{\delta V}{dt}$$

- **Expression en fonction des données de l'écoulement**

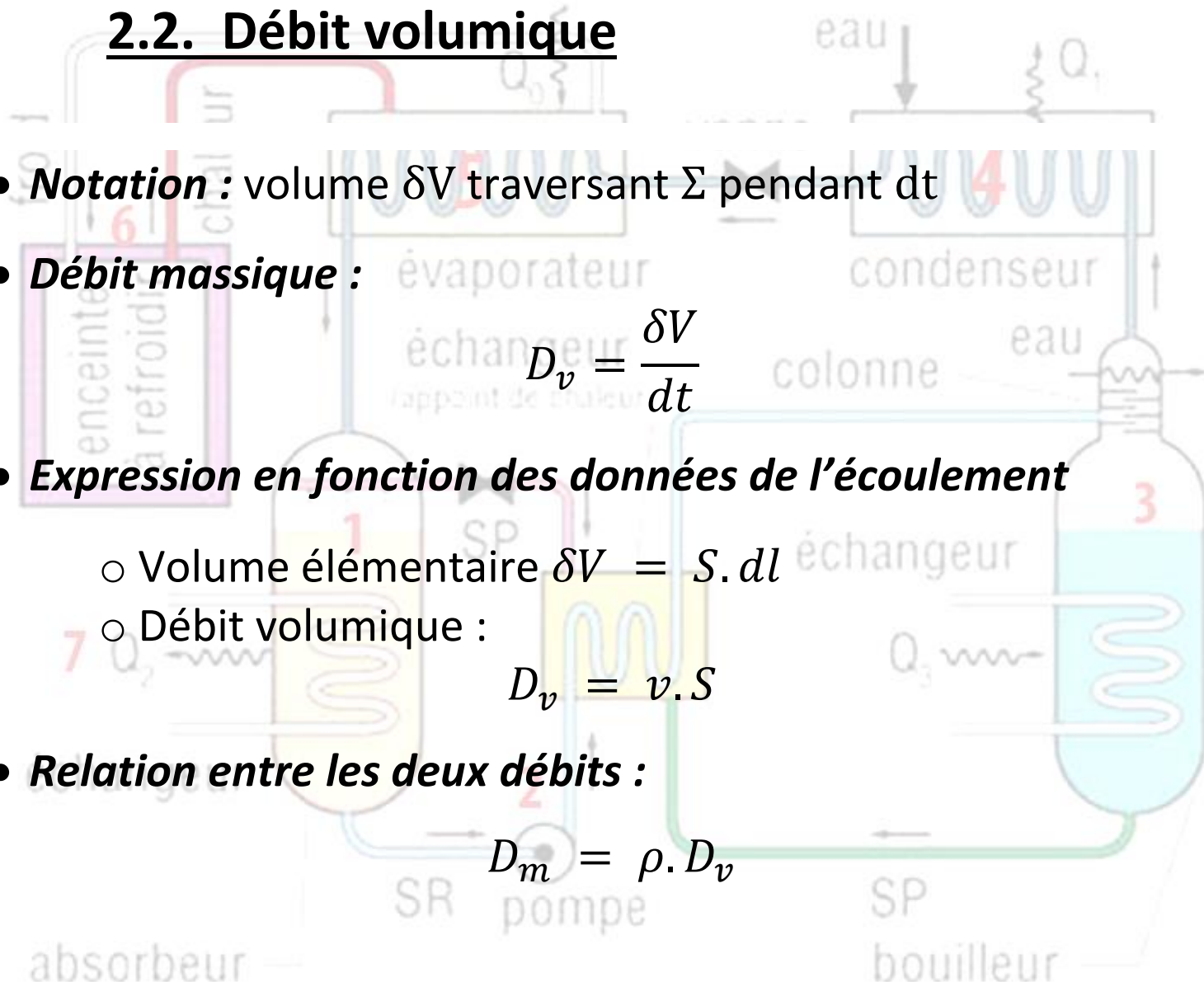
- Volume élémentaire $\delta V = S \cdot dl$

- Débit volumique :

$$D_v = v \cdot S$$

- **Relation entre les deux débits :**

$$D_m = \rho \cdot D_v$$



Source : Internet Yahoo encyclopédie

2.3. Bilan de masse

- **Bilan de masse d'un système ouvert**

$$dm_{SO} = \delta m_e - \delta m_s$$
$$dm_{SO} = D_{me} \cdot dt - D_{ms} \cdot dt$$

- **Bilan de masse sur système ouvert :**

$$\frac{dm_{SO}}{dt} = D_{me} - D_{ms}$$

- **Conséquence en régime stationnaire ?**

$$\frac{dm_{SO}}{dt} = 0 \Rightarrow D_{me} = D_{ms} \Rightarrow \delta m_e = \delta m_s$$

→ Conservation du débit massique en régime stationnaire

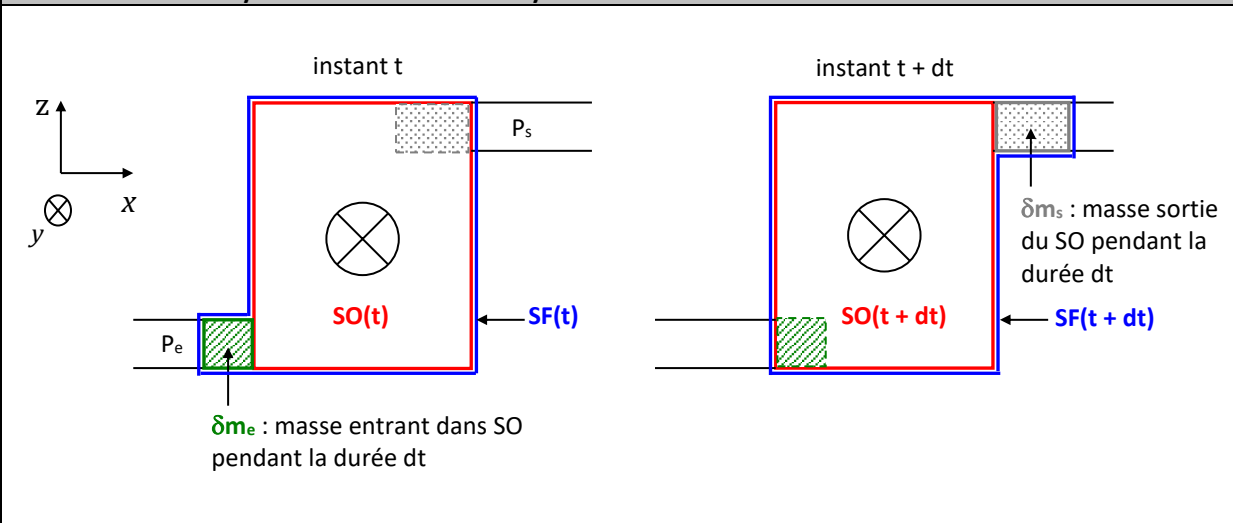
- **Conditions pour que le débit volumique se conserve**

3. Bilan d'énergie totale

3.1. Système fermé fictif associé au SO

- **Raison de l'introduction d'un Système fermé fictif**
- **Définition**

Doc 2 – Schéma du système fermé associé au système ouvert



Source : Internet Yahoo encyclopédie

3.2. Travail des forces pressantes en écoulement

- **Travail des forces pressantes sur la surface d'entrée :**
 - Expression
 - Interprétation du signe
- **Travail des forces pressantes sur la surface de sortie :**
 - Expression
 - Interprétation du signe
- **Expression en régime stationnaire :**

$$\delta W_p = \delta m(P_e v_e - P_s v_s)$$

Source : Internet Yahoo encyclopédie

3.3. Bilan d'énergie totale

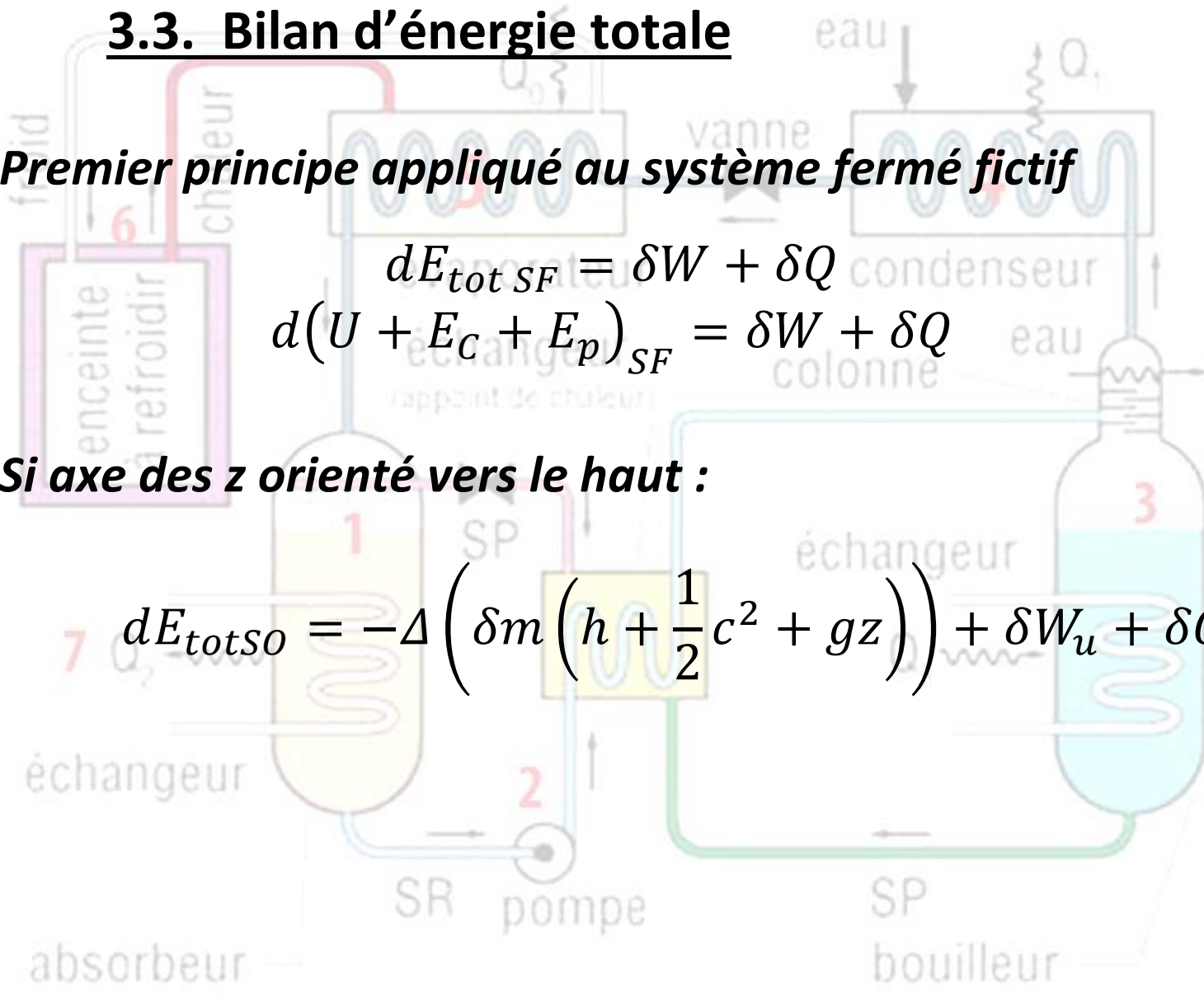
- **Premier principe appliqué au système fermé fictif**

$$dE_{tot SF} = \delta W + \delta Q$$

$$d(U + E_C + E_p)_{SF} = \delta W + \delta Q$$

- **Si axe des z orienté vers le haut :**

$$dE_{tot SO} = -\Delta \left(\delta m \left(h + \frac{1}{2} c^2 + gz \right) \right) + \delta W_u + \delta Q$$



Source : Internet Yahoo encyclopédie

3.4. Premier principe industriel

- **Hypothèses :**

- Ecoulement en régime stationnaire
- Axe des z orienté vers le haut

$$\delta m \cdot \Delta \left(h + \frac{1}{2} c^2 + gz \right) = \delta W_u + \delta Q$$

- **Formulation massique :**

$$\Delta \left(h + \frac{1}{2} c^2 + gz \right) = w_u + q$$

- **Formulation en puissance :**

$$D_m \cdot \Delta \left(h + \frac{1}{2} c^2 + gz \right) = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th}$$

Source : Internet Yahoo encyclopédie

4. Applications sans changement d'état

4.1. Détente de Joule-Thomson

- **Hypothèses :**

- *Écoulement de fluide dans une conduite :*

- Horizontale
- Rigide
- Calorifugée

- *Variation de vitesse négligée*

- **Caractère isenthalpique**

- Conséquence pour le GP
- Ecart au modèle pour les gaz réels

Source : Internet Yahoo encyclopédie

4.2. Turbine à air

- **Hypothèses :**

- Air = GP
- Turbine calorifugée
- Détente réversible

- **Données :**

- Air :

- $\gamma = 1,4$
- $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$
- Débit massique : $D_m = 100 \text{ kg.s}^{-1}$.

- Entrée :

- $T_e = 350 \text{ °C}$
- $P_e = 200 \text{ bar}$

- Sortie :

- $T_s = ?$
- $P_s = 19 \text{ bar}$

- **Puissance fournie à l'extérieur**



Source : Internet Yahoo encyclopédie

4.3. Chauffage d'un liquide dans une canalisation

- **Hypothèses :**

- Pression constante

- **Données :**

- Liquide :

- Capacité thermique massique : $c = 4 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- Débit massique : $D_m = 2 \text{ kg.s}^{-1}$.

- Entrée : $T_e = 15 \text{ °C}$

- Sortie : $T_s = T_{\text{ext}} = 60 \text{ °C}$

- Durée : 1 h

- **Puissance thermique reçue par le fluide**

- **Variation d'entropie massique**

- **Entropie massique créée**

Source : Internet Yahoo encyclopédie

4.4. Tuyère

- **Hypothèses :**

- Tuyère horizontale et calorifugée
- Régime stationnaire
- Vitesse de sortie grande devant vitesse d'entrée

- **Données :**

- Gaz :

- Capacité thermique massique : $c = 1,0 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- Débit massique : $D_m = 2 \text{ kg.s}^{-1}$
- $r = R/M = 290 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

- Entrée : $T_e = 1600 \text{ K}$; $P_e = 52 \text{ bar}$

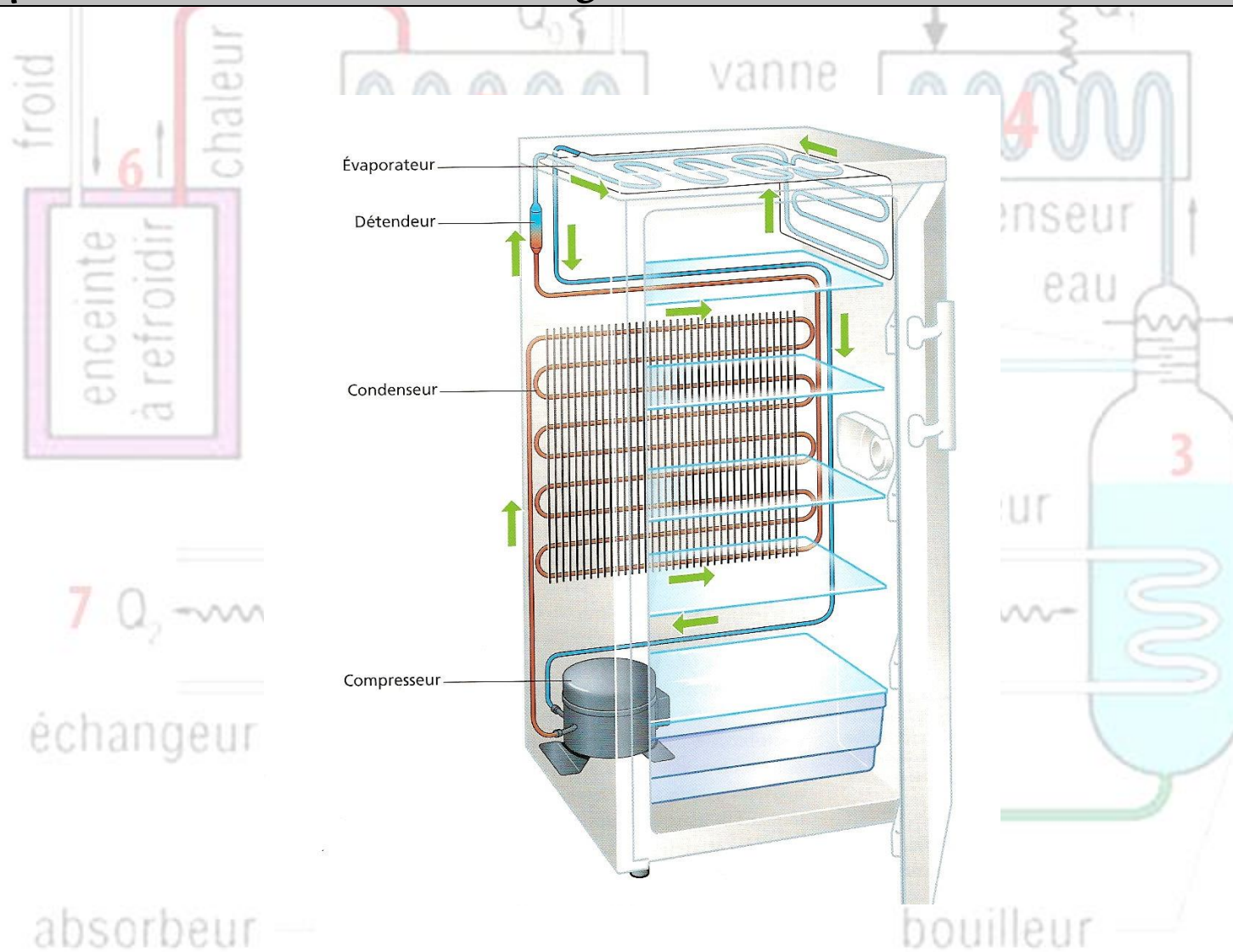
- Sortie : $T_s = 550 \text{ K}$; $P_s = 1 \text{ bar}$

- **Vitesse de sortie (conditions ?)**

- **Détente isentropique ?**

Source : Internet Yahoo encyclopédie

5. Application avec changement d'état



Source : Internet Yahoo encyclopédie

L'agent de la transformation est le Fréon, il subit :

- ✓ Une détente de Joule-Thomson $A \rightarrow B$ dans le détendeur ;
- ✓ Une vaporisation partielle à température et pression constantes $B \rightarrow C$ dans l'évaporateur. Il reçoit alors un transfert thermique massique de la source froide q_2 dont la température est $T_2 = 268 \text{ K}$;
- ✓ Une compression adiabatique $C \rightarrow D$ dans le compresseur ;
- ✓ Une liquéfaction totale $D \rightarrow A$ dans le condenseur. Il fournit alors un transfert thermique massique à la source chaude q_1 dont la température est $T_1 = 298 \text{ K}$.

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
p (bar)	7,5	2,2	2,2	7,5
T (K)	303	263	263	303
x_{vap}	0	0,24	0,98	1

Données thermodynamiques : Enthalpies massiques de vaporisation :

$$\ell_v(263 \text{ K}) = 159 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\ell_v(303 \text{ K}) = 139 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

a) Cycle dans le diagramme de Clapeyron.

b) Etude de $A \rightarrow B$:

- Variation d'enthalpie massique
- Variation d'entropie massique en introduisant :
 - le point B' ($P_{B'} = 2,2 \text{ bar}$, $T_{B'} = 263 \text{ K}$, $x_{B'} = 0$)
 - et la capacité thermique massique du Fréon liquide c , supposée indépendante de la température.

Montrer que les données permettent de calculer c .

A.N : calculer c et $s_B - s_A$, ainsi que l'entropie produite.

c) Etude de $B \rightarrow C$:

- Transfert thermique massique q_2 avec la source froide
- Variation d'entropie massique $s_C - s_B$
- Entropie échangée
- Entropie produite.

d) Etude de $C \rightarrow D$:

- Travail utile massique w' reçu par le Fréon.
- Variation d'entropie massique $s_D - s_C$
- Entropie produite.

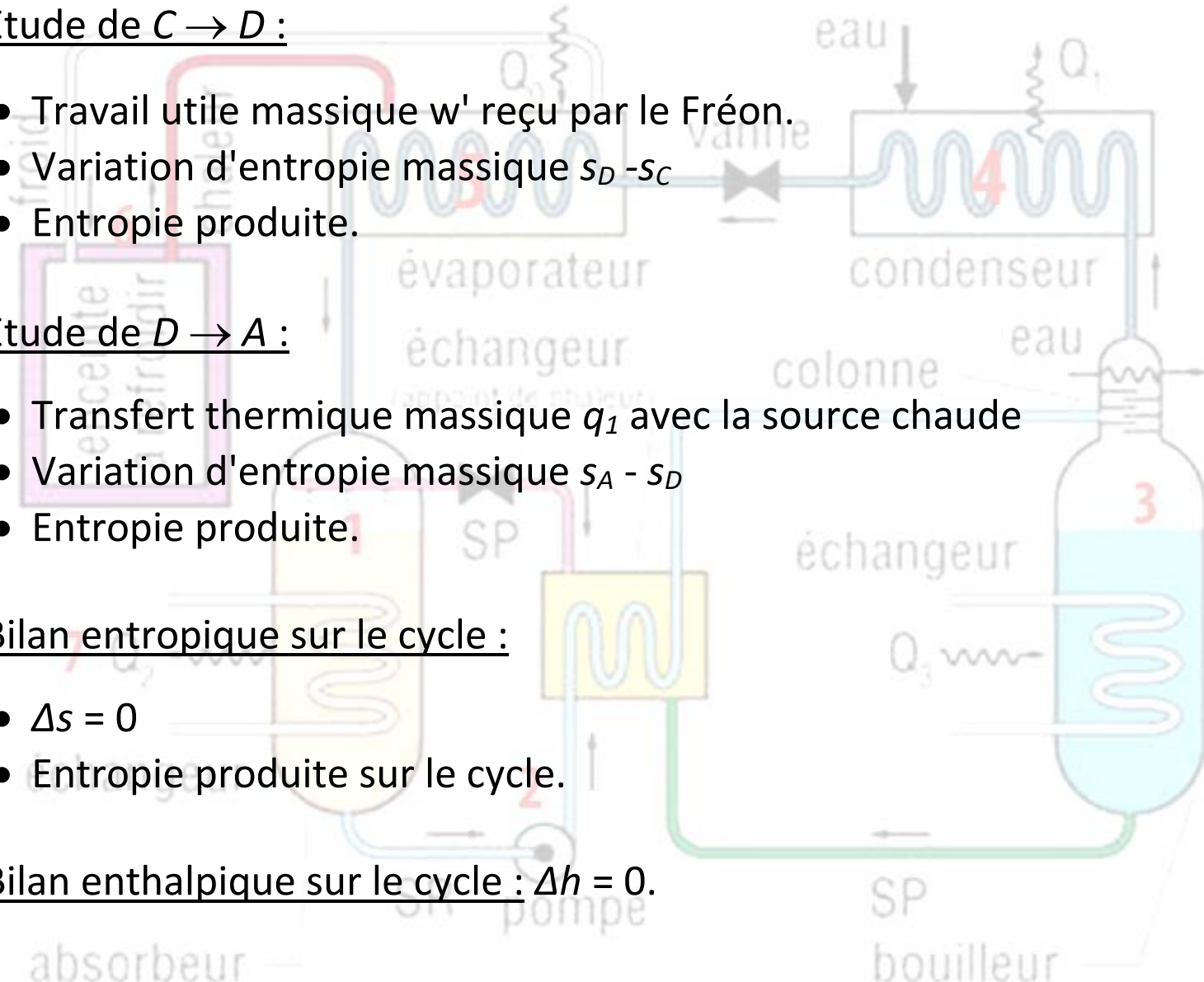
e) Etude de $D \rightarrow A$:

- Transfert thermique massique q_1 avec la source chaude
- Variation d'entropie massique $s_A - s_D$
- Entropie produite.

f) Bilan entropique sur le cycle :

- $\Delta s = 0$
- Entropie produite sur le cycle.

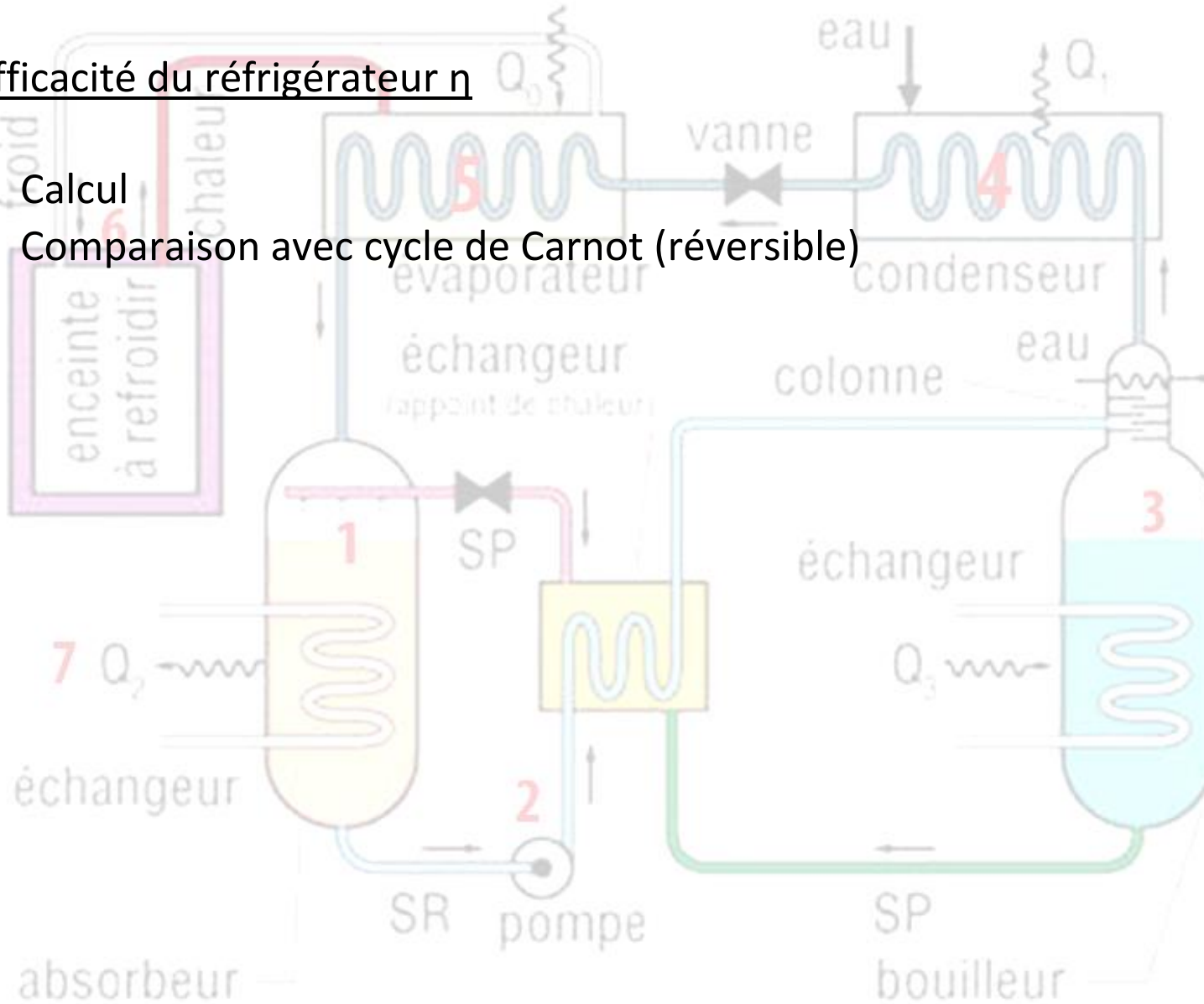
g) Bilan enthalpique sur le cycle : $\Delta h = 0$.



Source : Internet Yahoo encyclopédie

h) Efficacité du réfrigérateur η

- Calcul
- Comparaison avec cycle de Carnot (réversible)



Source : Internet Yahoo encyclopédie