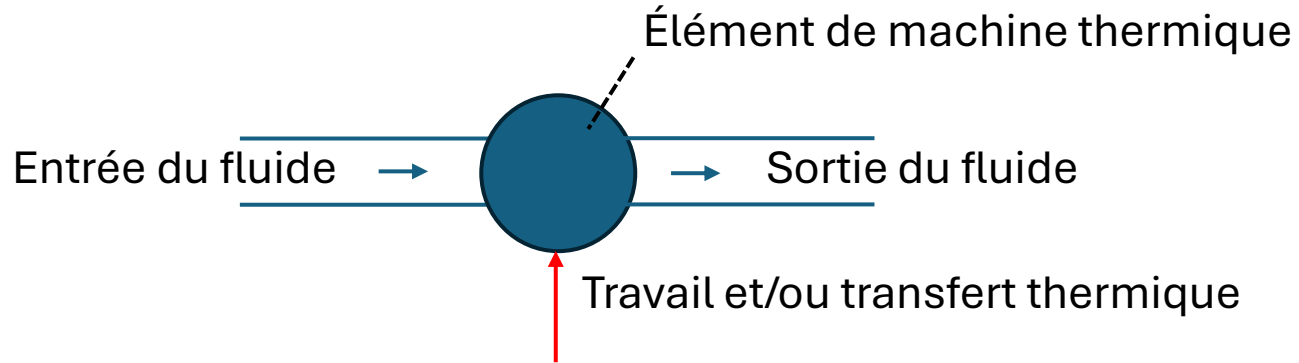


Bilans sur un écoulement stationnaire

Thermodynamique industrielle

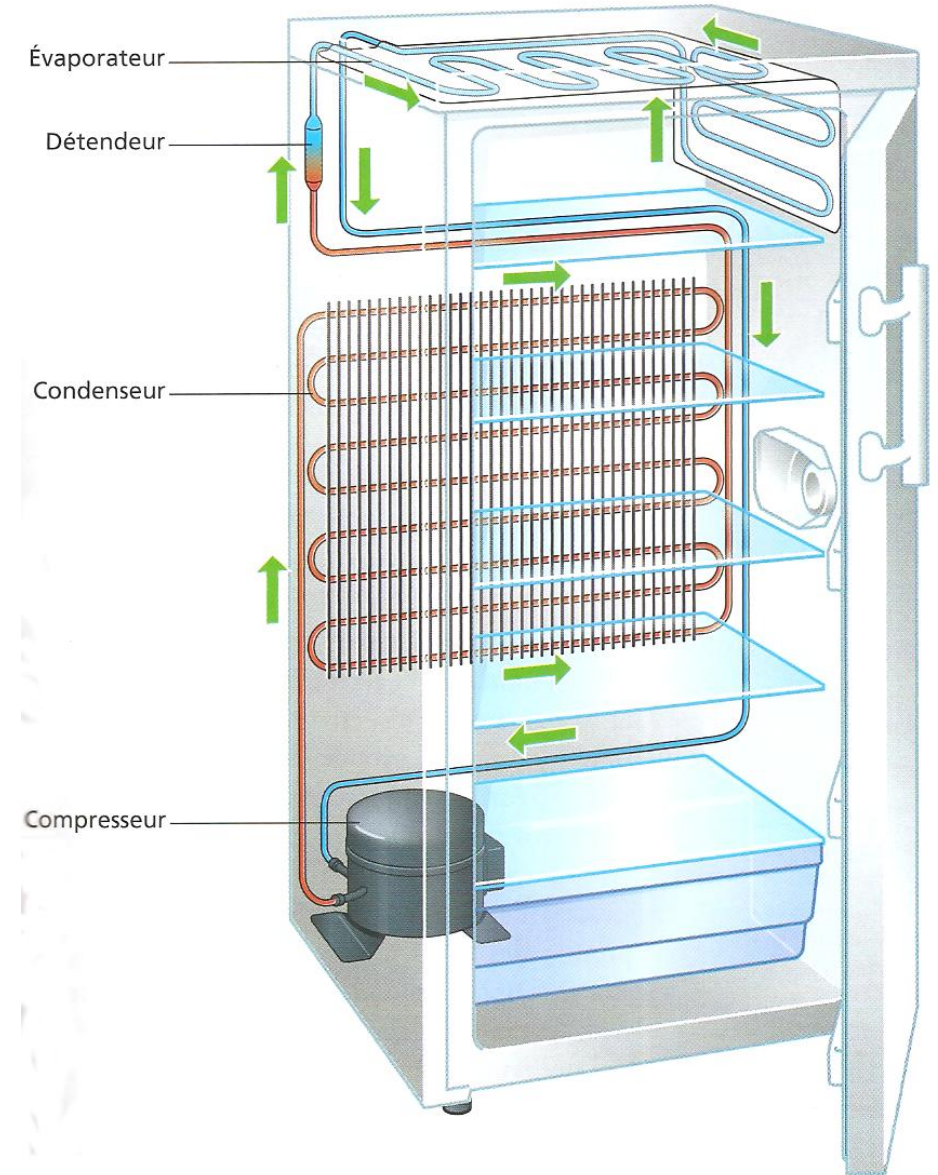
Exemple : frigo



Éléments de machine du frigo :

- Compresseur
- Echangeurs thermiques (évaporateur et condenseur)
- Détendeur

L'objectif est de relier les grandeurs intensives d'entrée et de sortie du fluide caloporteur, lorsque celui-ci traverse un élément de machine en régime stationnaire : principes de la thermodynamique industrielle

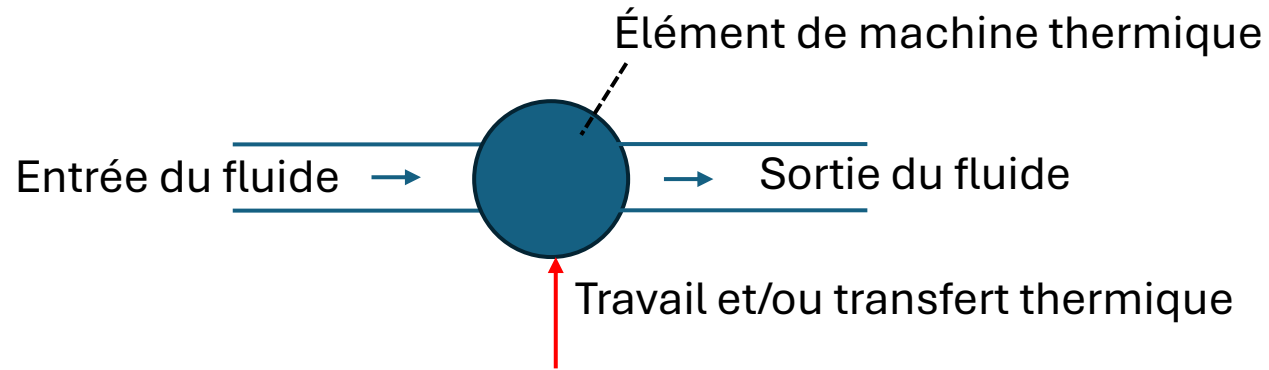


Machines à écoulement stationnaire

Thermodynamique industrielle

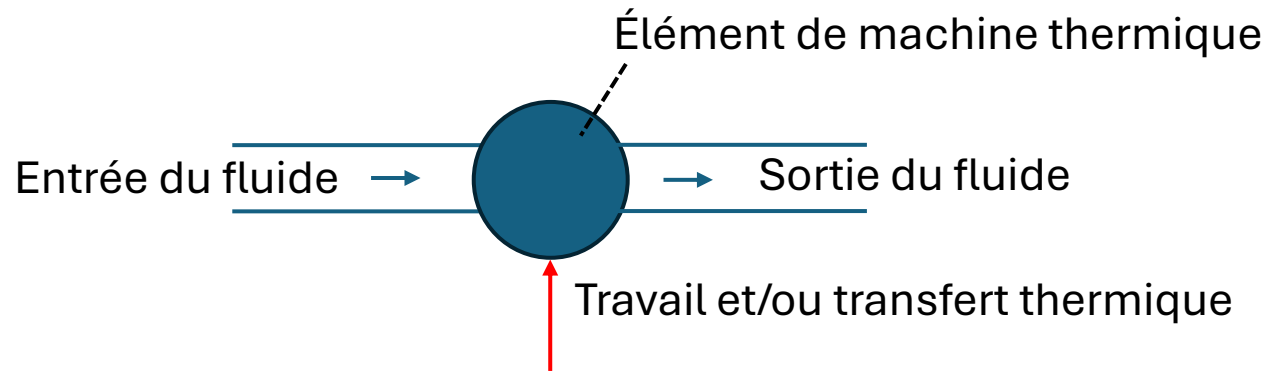
1. Notations
2. Système ouvert, système fermé mobile
3. Premier principe industriel
4. Exemples d'éléments de machine
5. Diagrammes pression-enthalpie massique
6. Deuxième principe industriel
7. Diagramme température-entropie massique

1.1 Débit massique



La machine a démarré et fonctionne en régime permanent. L'écoulement est stationnaire : une masse δm de fluide caloporteur s'écoule à travers l'élément de machine pendant une durée dt . On définit le débit massique $D_m = \frac{\delta m}{dt}$. C'est le même en entrée et en sortie car l'écoulement est stationnaire.

1.2 Travail et transfert thermique

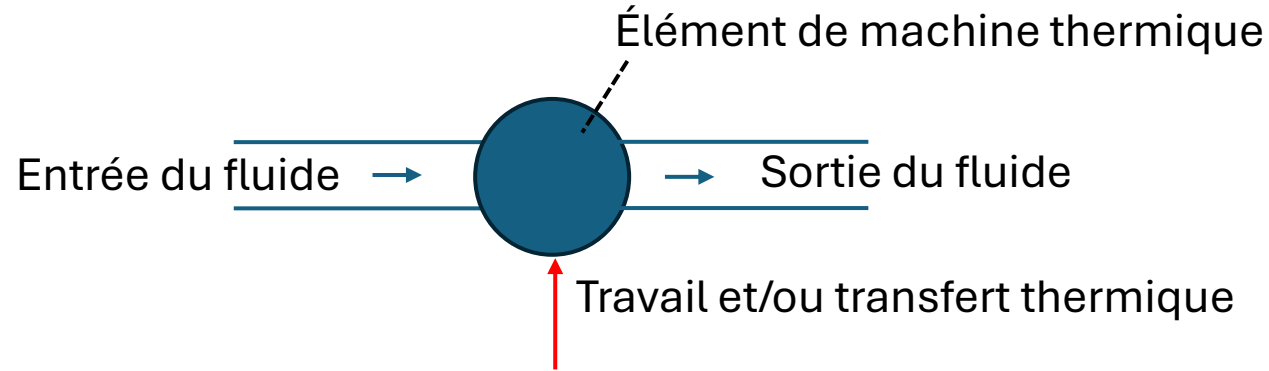


Le fonctionnement est en continu. Le fluide qui traverse l'élément reçoit une puissance mécanique dite « utile » P_u et une puissance thermique P_{th} .

Pendant la durée dt , le fluide reçoit un travail mécanique appelé « travail utile » $\delta W_u = P_u dt$ et un transfert thermique $\delta Q = P_{th} dt$.

Le plus souvent, on raisonne sur 1 kg de fluide qui traverse l'élément, ce qui amène à définir le travail utile « massique » $w_u = \frac{\delta W_u}{\delta m} = D_m P_u$ et le transfert thermique massique $q = \frac{\delta Q}{\delta m} = D_m P_{th}$. Toutes les grandeurs massiques sont écrites en minuscule.

1.3 Variables d'entrée et de sortie



Lors de la traversée de l'élément de machine, les propriétés d'1 kg de fluide peuvent évoluer entre l'entrée et la sortie. On définit :

u l'énergie interne massique

$v = \frac{1}{\rho}$ le volume massique

T la température

P la pression

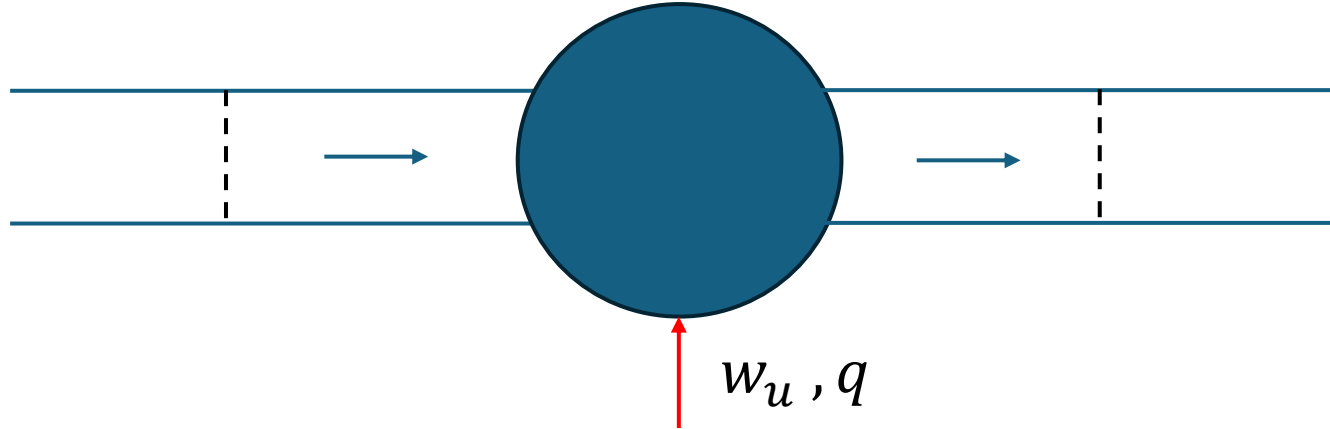
$h = u + Pv$ l'enthalpie massique

$\vec{c}$ la vitesse d'écoulement

z l'altitude

On leur affecte les indices e et s pour entrée et sortie (ou des numéros 1 et 2, ...)

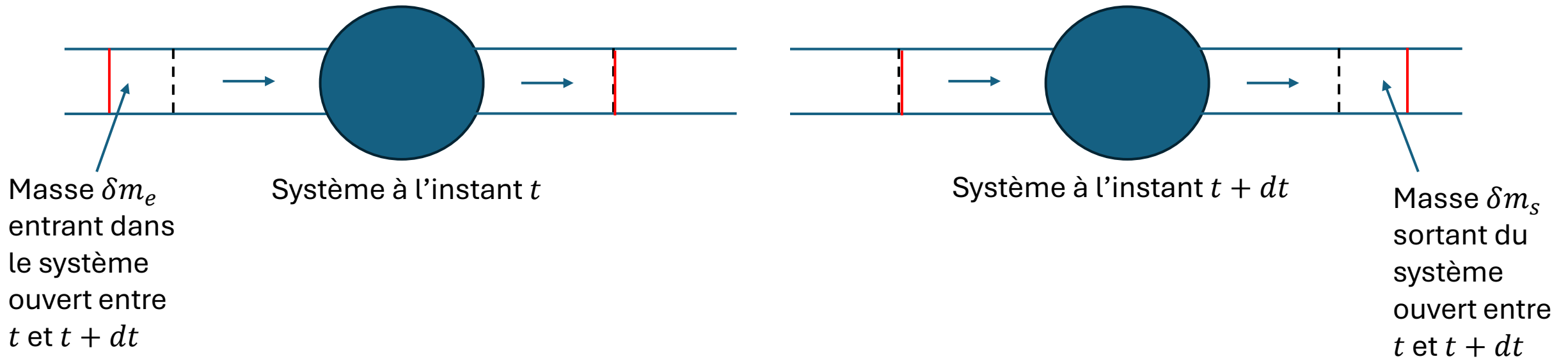
2.1 Système ouvert



Le fluide situé entre les deux parois fictives pointillées fixes est un système ouvert : ce ne sont pas les mêmes molécules de fluide au cours du temps. traversé par l'écoulement.

Mais, en régime stationnaire, les propriétés extensives de ce fluide sont indépendantes du temps : masse, énergie interne, enthalpie, énergie cinétique, énergie mécanique, entropie..

2.2 Système fermé mobile

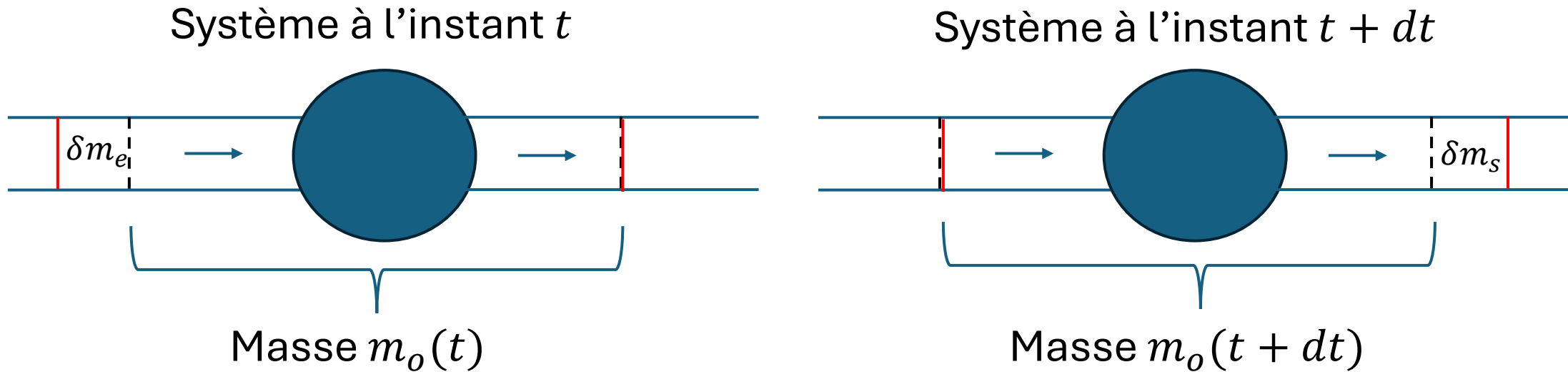


Les parois rouges sont mobiles et suivent l'écoulement : ce sont toujours les mêmes molécules de fluide à l'intérieur aux instants t et $t + dt$.

Il s'agit donc d'un système fermé mobile.

L'application des principes de la thermodynamique nécessite un système fermé, c'est pourquoi nous définissons un tel système un peu compliqué.

2.3 Bilan de masse



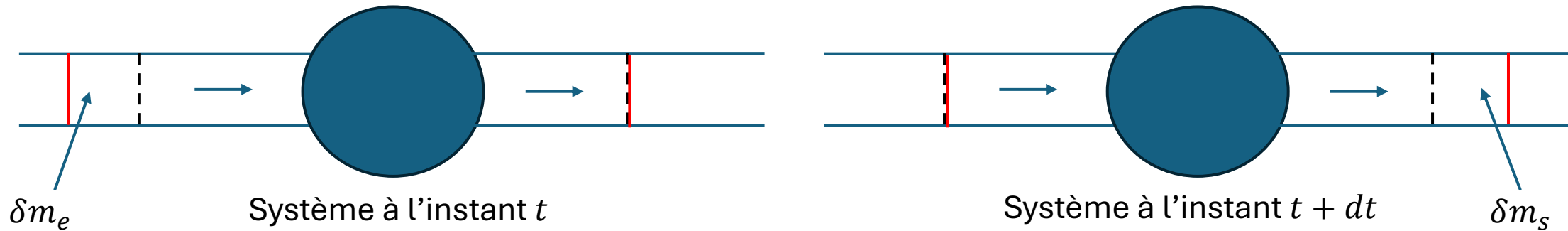
$m_o(t)$ et $m_o(t + dt)$ sont les masses du fluide situé dans le système ouvert aux instants t et $t + dt$.
 $m(t)$ et $m(t + dt)$ sont les masses du fluide situé dans le système fermé aux instants t et $t + dt$.
Bilan de masse : la variation de masse du système fermé entre t et $t + dt$ est

$$m(t + dt) - m(t) = m_o(t + dt) + \delta m_s - m_o(t) - \delta m_e$$

La masse d'un système fermé est constante par définition, et la masse du système ouvert est constante car l'écoulement est stationnaire.

Il reste donc $\delta m_e = \delta m_s$, que l'on note simplement δm . On retrouve ainsi la conservation du débit.

3.1 Premier principe appliqué au système fermé



Premier principe au système fermé entre t et $t + dt$:

$$dE = \delta W + \delta Q$$

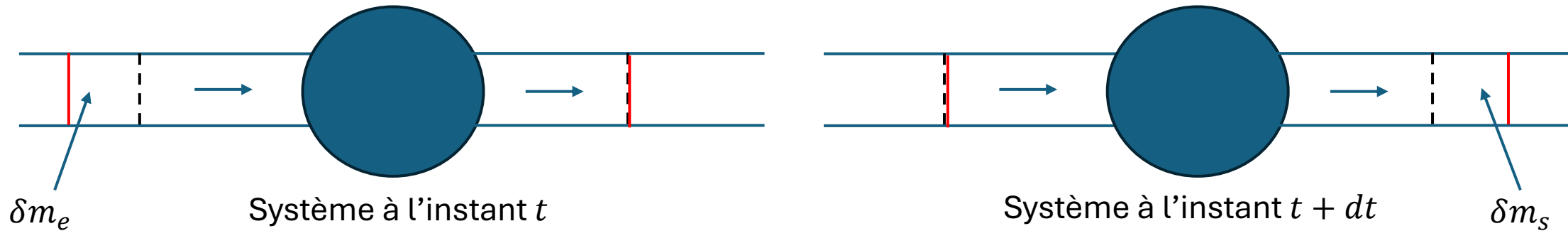
Avec $E = E_c + E_p + U$ l'énergie totale du système.

Contrairement aux machines à piston, les variations d'altitude ou de vitesse du fluide peuvent être importantes sur les machines à écoulement. On prend donc en compte les variations d'énergie cinétique et potentielle de pesanteur.

$$\delta W = \delta W_{pression} + \delta W_{utile}$$

Les parois du système sont mobiles en entrée et en sortie. Il y a donc un travail de forces de pression associé. Le travail fourni au fluide par l'élément de machine est appelé travail utile.

3.2 Variation d'énergie totale du système fermé



$$dE = dE_c + dE_p + dU$$

Décomposons sur l'exemple de l'énergie interne :

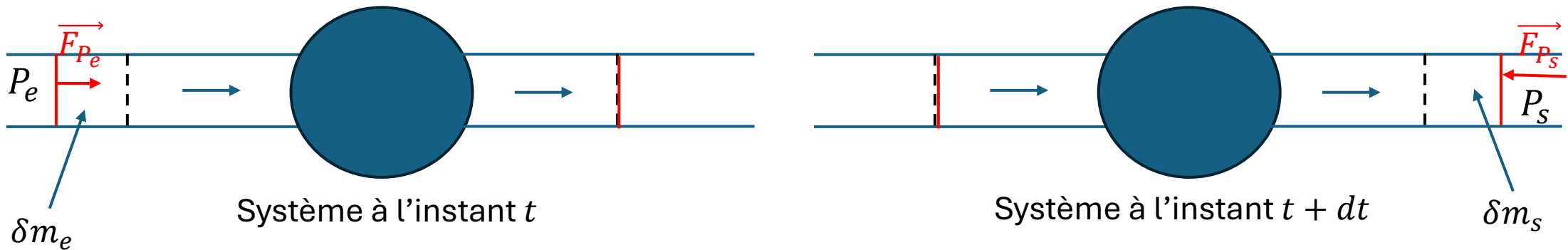
$$dU = U(t + dt) - U(t) = U_o(t + dt) + u_s \delta m_s - U_o(t) - u_e \delta m_e = u_s \delta m_s - u_e \delta m_e$$

car l'énergie interne du système ouvert U_o est indépendante du temps en régime stationnaire.

De même :

$$dE_c = \frac{c_s^2}{2} \delta m_s - \frac{c_e^2}{2} \delta m_e$$
$$dE_p = g z_s \delta m_s - g z_e \delta m_e$$

3.3 Travail des forces de pression



En entrée, la force de pression extérieure est dans le même sens que l'écoulement, donc le travail des forces de pression est positif.

En sortie, la force de pression extérieure est de sens opposé au sens d'écoulement, donc le travail des forces de pression est négatif.

On utilise la relation $\delta W = -PdV$ pour le travail des forces de pression.

On obtient :

$$\delta W_{\text{pression}} = P_e v_e \delta m_e - P_s v_s \delta m_s$$

3.4 Premier principe industriel

Premier principe au système fermé entre t et $t + dt$:

$$dU + dE_c + dE_p = \delta W_{pression} + \delta W_u + \delta Q$$

On remplace les différents termes et on simplifie en tenant compte de $\delta m_s = \delta m_e = \delta m$

$$\delta m \left(u_s - u_e + \frac{c_s^2}{2} - \frac{c_e^2}{2} + gz_s - gz_e \right) = P_e v_e \delta m - P_s v_e \delta m + \delta W_u + \delta Q$$

$$u_s + P_s v_s - (u_e + P_e v_e) + \frac{c_s^2}{2} - \frac{c_e^2}{2} + gz_s - gz_e = \frac{\delta W_u}{\delta m} + \frac{\delta Q}{\delta m}$$

$$h_s - h_e + \frac{c_s^2}{2} - \frac{c_e^2}{2} + gz_s - gz_e = w_u + q$$

Cette dernière relation est appelée premier principe industriel.

On note parfois cette relation avec un Δ . Garder en tête qu'il s'agit d'une variation « sortie – entrée ».

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

3.5 1^{er} principe industriel version puissance

1^{er} principe industriel en version massique

$$h_s - h_e + \frac{c_s^2}{2} - \frac{c_e^2}{2} + g(z_s - z_e) = w_u + q$$

On multiplie par le débit massique :

$$D_m \left(h_s - h_e + \frac{c_s^2}{2} - \frac{c_e^2}{2} + g(z_s - z_e) \right) = D_m w_u + D_m q$$

$$D_m = \frac{\delta m}{dt}, w_u = \frac{\delta W_u}{\delta m}, q = \frac{\delta Q}{\delta m}$$

$$D_m w_u = \frac{\delta W_u}{dt} = P_u, D_m q = \frac{\delta Q}{dt} = P_{th}$$

Débit massique

$$D_m \left(h_s - h_e + \frac{c_s^2}{2} - \frac{c_e^2}{2} + g(z_s - z_e) \right) = P_u + P_{th}$$

Variation d'énergie massique, sortie - entrée

Puissance utile
(parties mobiles)

Puissance thermique
(diffusion à travers
une paroi)

4. Exemples d'éléments de machine

Sauf cas exceptionnel, les variations d'énergie cinétique et potentielle de pesanteur sont négligées.

Compresseur : une partie mobile apporte du travail w_u , ce qui fait monter la pression et la température.

Approximation courante : on considère la transformation adiabatique $q = 0$

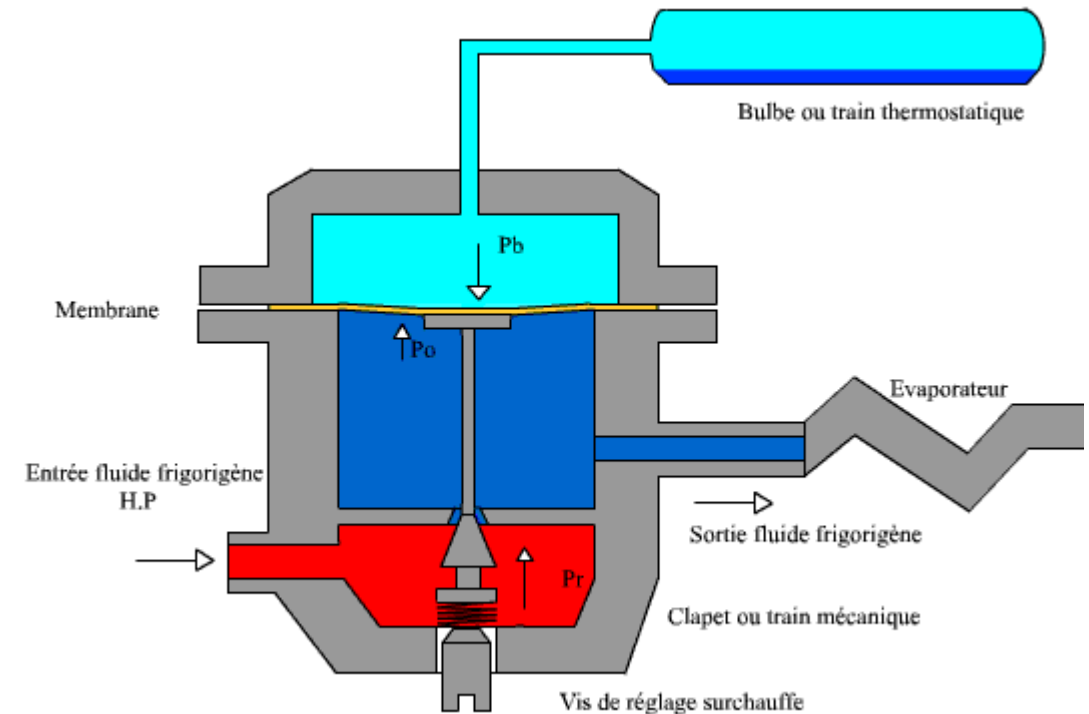
$$\Delta h = w_u$$

Détendeur : étranglement

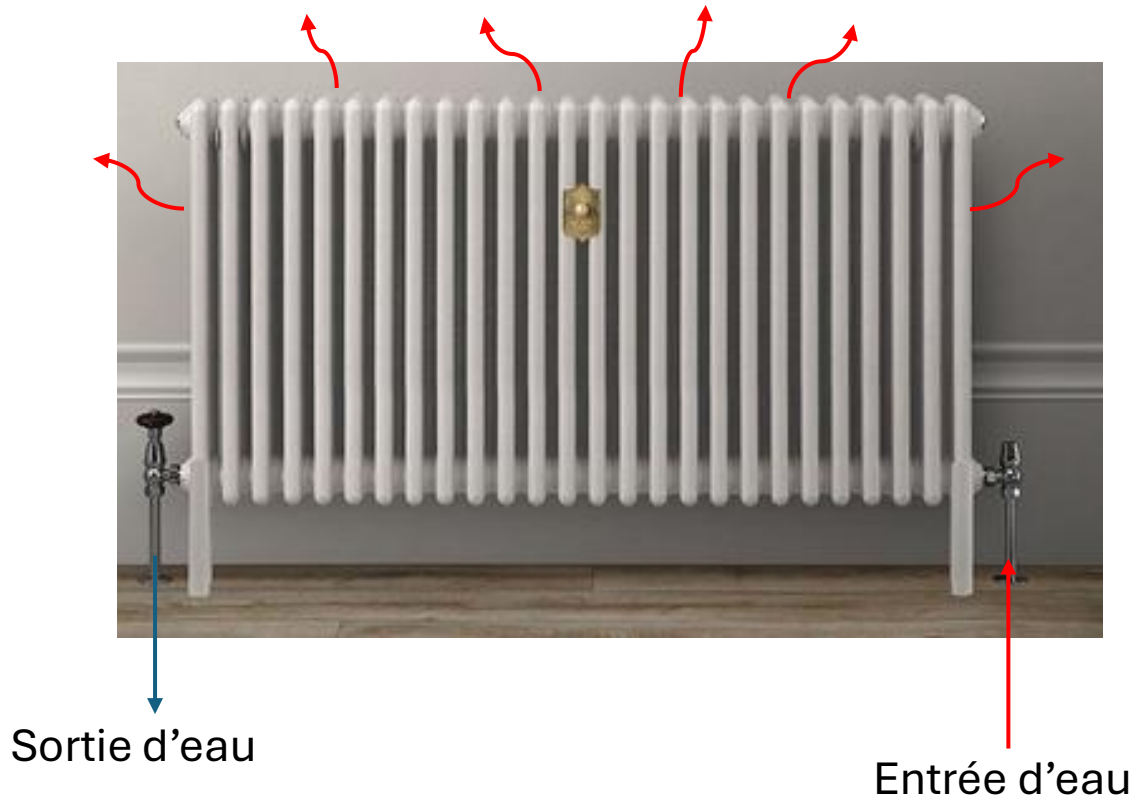
Pas de parties mobiles $w_u = 0$, et le transfert thermique est négligeable $q = 0$.

$$\Delta h = w_u + q = 0$$

$h = cte$, la transformation est **isenthalpique**



Echangeur thermique



Pas de parties mobiles donc $w_u = 0$.

L'eau qui circule transfère de l'énergie thermique vers l'air donc $q < 0$.

$$\Delta h = q$$
$$c_p(T_s - T_e) = q \quad \text{avec } c_p \text{ la capacité thermique de l'eau qui circule}$$
$$D_m c_p(T_s - T_e) = P_{th}$$

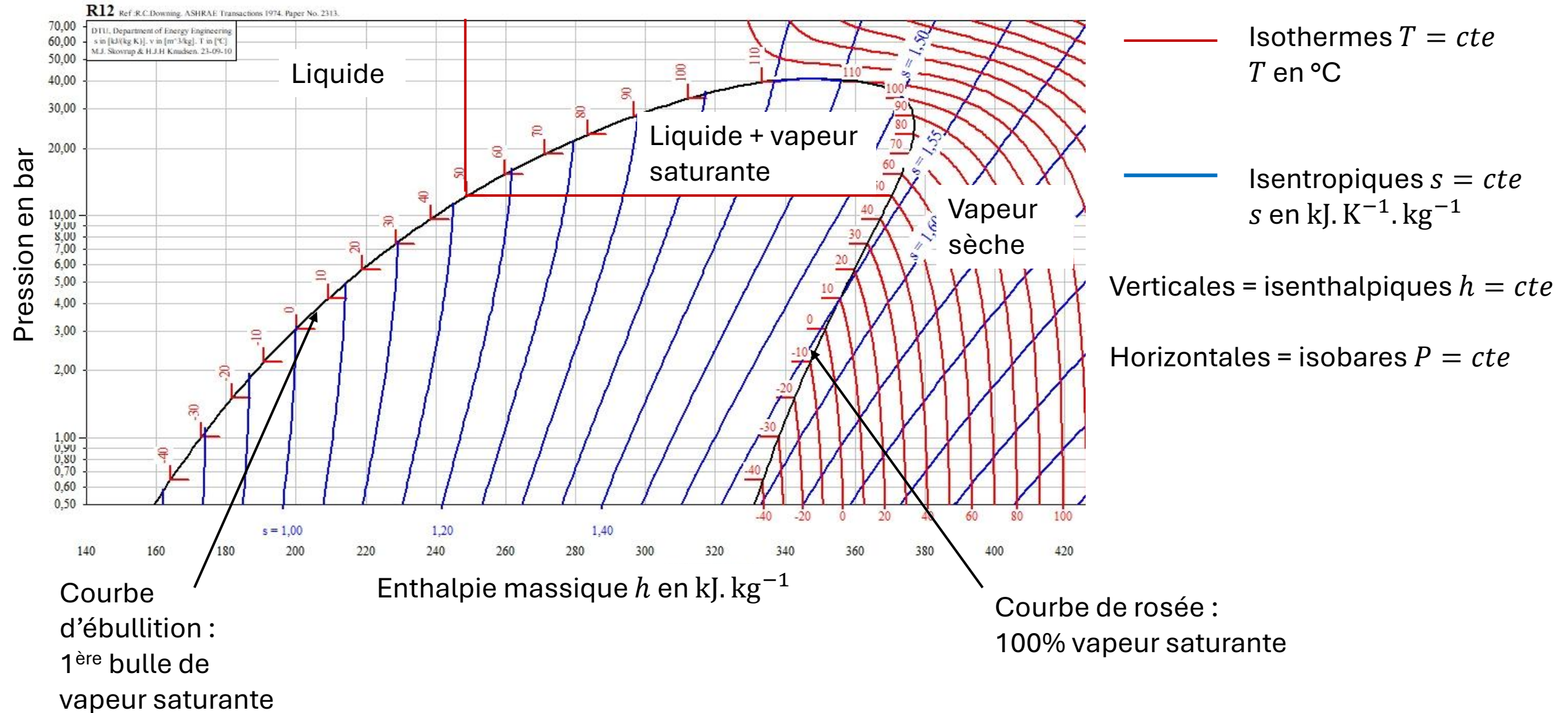


Chaudière à gaz :

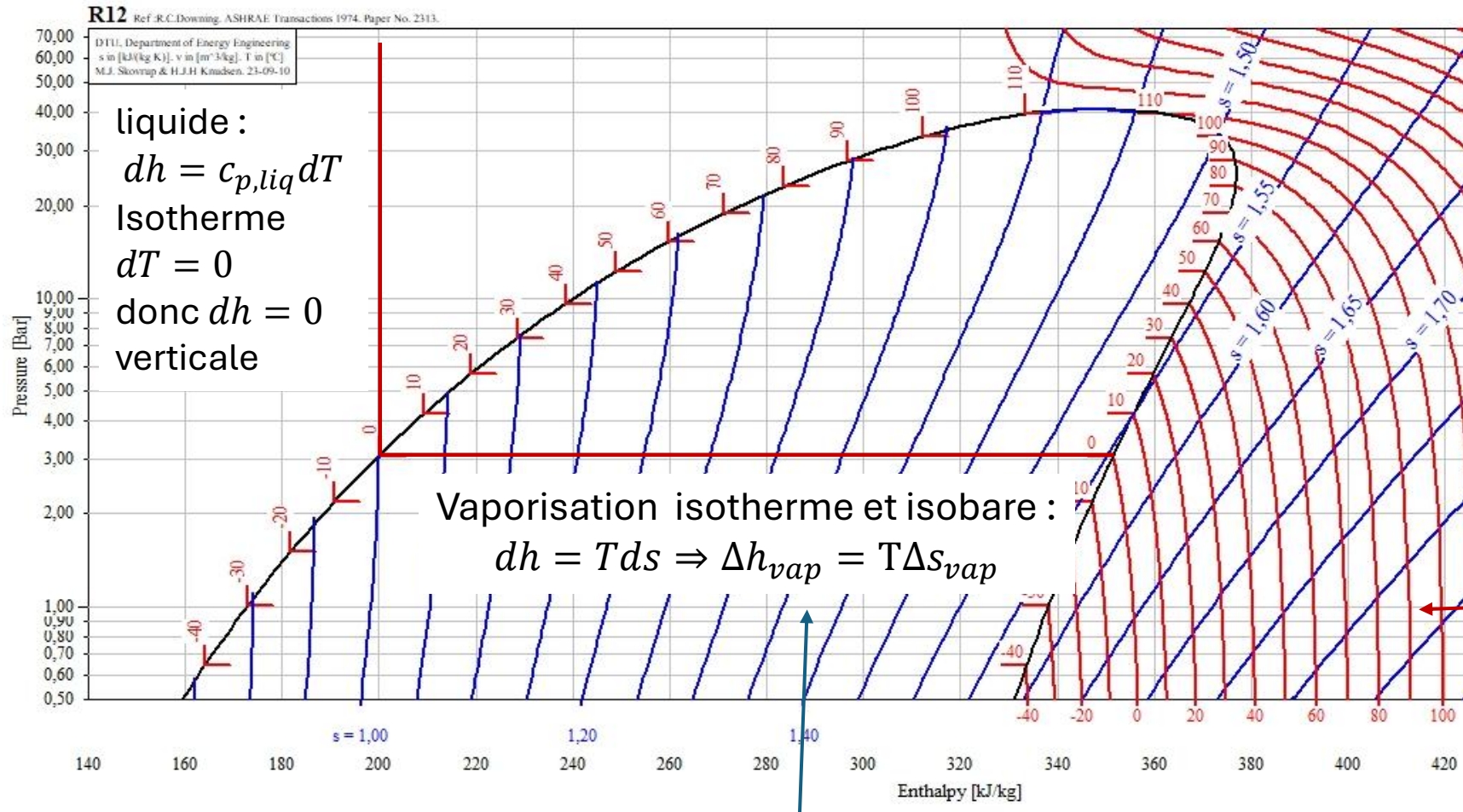
$w_u > 0$ et $q > 0$
pour mettre en mouvement l'eau et la chauffer.

q est apportée par la combustion d'un gaz.

5.1 Diagramme P-h : zones et courbes



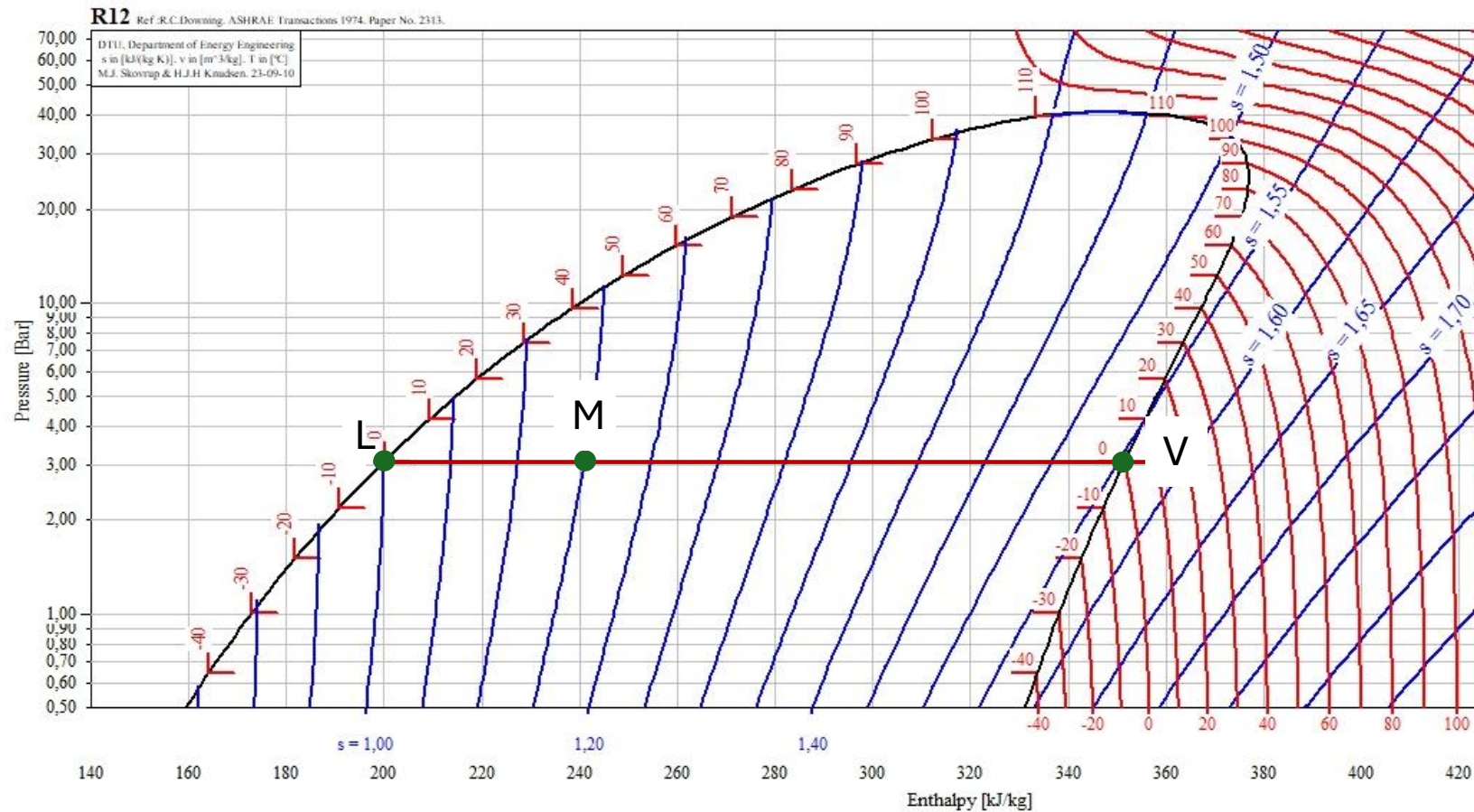
5.2 Isotherme dans le diagramme $P - h$



Vérification : $\Delta h_{vap}(273K) = 350 - 200 = 150 \text{ kJ.kg}^{-1}$

$T\Delta s_{vap} = 273 \times (1,55 - 1,02) = 144 \text{ kJ.kg}^{-1}$

5.3 Théorème des moments dans le diagramme $P - h$



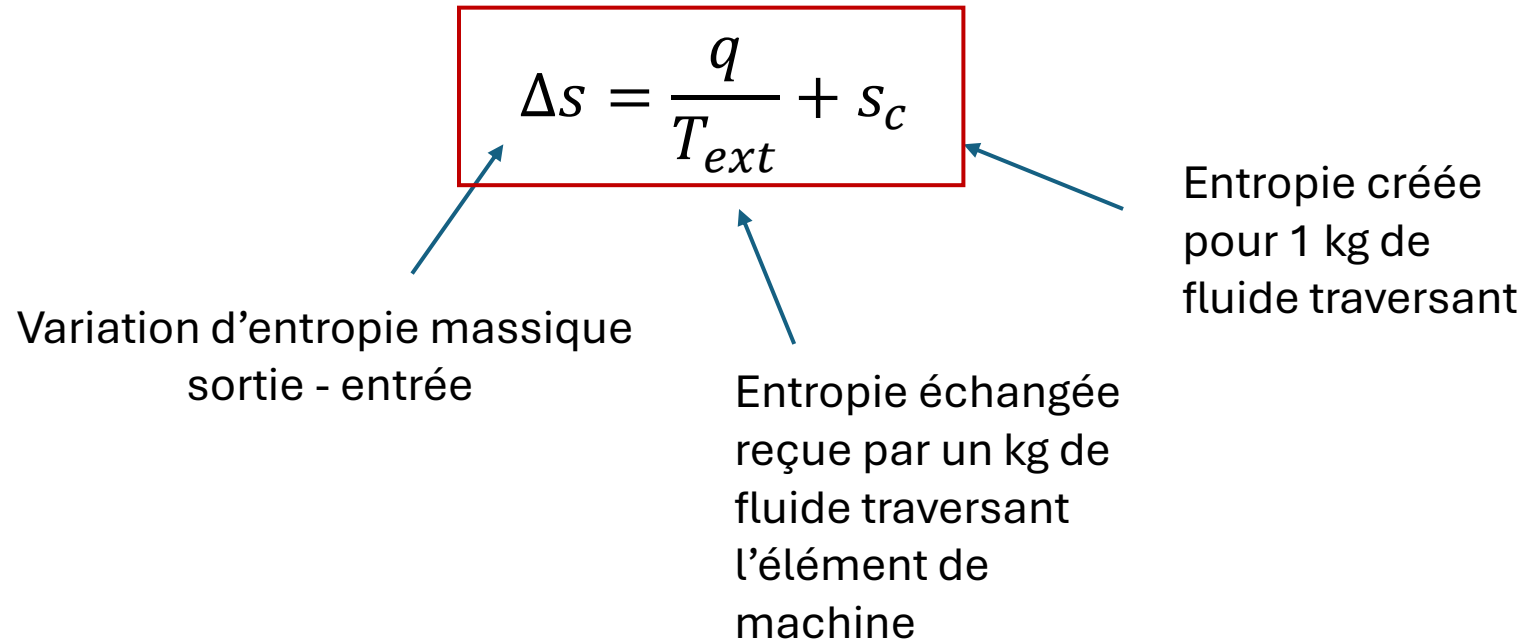
Titre massique en vapeur en un point M de la zone diphasée :

$$x = \frac{h_M - h_L}{h_V - h_L} \approx 30\% \text{ sur cet exemple}$$

6. 2^{ème} principe

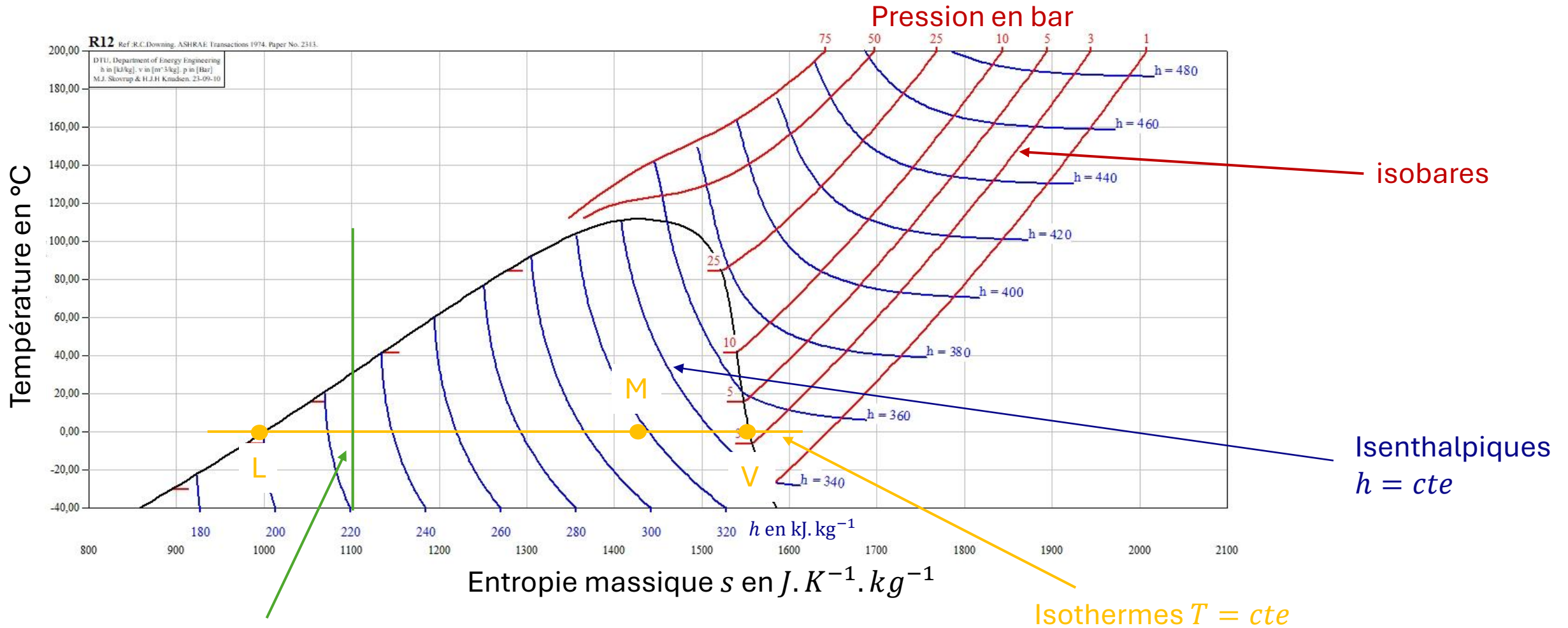
Par application du second principe entre t et $t + dt$, on obtient

$$S_{\text{sortie}} - S_{\text{entrée}} = S_{\text{échangée}} + S_{\text{créée}}$$
$$\Delta S = s_e + s_c$$



Cas particulier : transformation adiabatique et réversible :
adiabatique $\Rightarrow q = 0 \Rightarrow s_e = 0$, réversible $\Rightarrow s_c = 0$
 $\Delta s = 0 \Rightarrow$ transformation isentropique $s = \text{cte}$

7. Diagramme Température-entropie massique $T - s$



Titre en vapeur au point M ; $x = \frac{s_M - s_L}{s_v - s_L} \approx 70\%$ ici