Ch Th 1 – Systèmes ouverts en régime stationnaire

I. Description d’un système ouvert en régime stationnaire

1) Description d’un système thermodynamique

Définition : Système isolé : ni échange d’énergie, ni échange de matière
fermé : pas d’échange de
ouvert : échange d’énergie et de matière

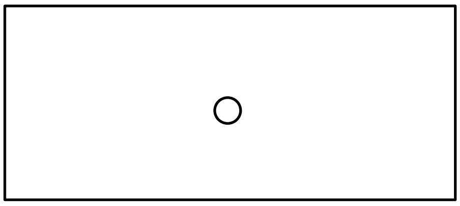
Paramètres d’état : P, V, T, n qui décrivent l’état macroscopique du système
Fonctions d’état : U, H, S…

Grandeurs extensives (proportionnelles à la masse ou à la quantité de matière), exemples :

Grandeurs intensives (indépendantes de la quantité de matière), exemples :
Grandeurs massiques : énergie interne massique u (en $J.kg^{-1}$), enthalpie massique h (en $J.kg^{-1}$), entropie massique s (en $J.K^{-1}.kg^{-1}$), énergie cinétique macroscopique massique $e_c =$, énergie potentielle extérieure massique e_p (exemple : énergie potentielle de pesanteur massique $e_p =$). Elles sont

2) Stationnarité, équilibre, équilibre local

a) Les trois échelles d’observation dans un milieu continu



Définition du milieu continu : C’est un milieu dans lequel on peut définir un élément de volume dV tel que dV<<V et dV contient encore un grand nombre de molécules.

- Echelle microscopique : molécules
- Echelle macroscopique : volume total V
- Echelle mésoscopique : élément de volume dV

b) Stationnarité et équilibre thermodynamique

Système est en **état stationnaire** si ses paramètres d’état sont
Etat d’équilibre thermodynamique : état stationnaire + absence de transfert (énergie+matière) avec le milieu extérieur.
Exemple : barre métallique maintenue à des températures différentes aux deux extrémités.

T_1 T_2

A l’équilibre tous les paramètres intensifs sont dans le
Si paroi mobile, il y a équilibre de pression avec l’extérieur. Si parois non adiabatiques, il y a équilibre de température avec le milieu extérieur.

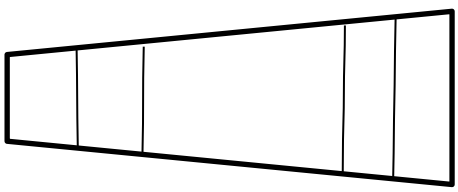
c) Equilibre thermodynamique local

Définition :

Ce n’est possible que si le temps d’évolution est

3) Débit massique

Définition : le débit massique est



$\boxed{D_m = \quad}$

avec c la vitesse du fluide, µ sa masse volumique et S la section

Bilan de matière pour un système ouvert **en régime stationnaire** (conservation de la masse) : dm_e =

En régime stationnaire, il y a égalité des débits d'entrée et de sortie D_m =

Débit volumique D_v =

II. Premier principe pour un système ouvert en régime stationnaire

1) Enoncé pour un système fermé

C'est un bilan d'énergie pour un système $\Delta E =$

avec E l'énergie totale d'un système macroscopique dans un référentiel R :

$E = E_{C/R} + E_{P\,ext} + U$ où $E_{C/R}$ est

et $E_{P\,ext}$ est

et U est l'énergie $U = E_{c\,micros} + E_{P\,\mathrm{int}} + E_{masse}$

avec $E_{c\,micros}$

$E_{P\,\mathrm{int}}$

E_{masse}

et W'_{ext} le travail des actions mécaniques extérieures (travail de la pression interne au système et travail utile) reçu

et Q le transfert thermique reçu

E est une fonction d'état extensive, W et Q ne sont pas des fonctions d'état mais des énergies échangées

Cas particuliers :

- Si le système est macroscopiquement au repos $\boxed{\Delta U = \quad}$
- Forme différentielle du premier principe :

  Pour une transformation infinitésimale $\boxed{dE = \delta W'_{ext} + \delta Q}$

CE : Utiliser avec rigueur les notations d et δ en leur attachant une signification.

- Définition de C_v :

C_v molaire et massique

- Expressions de dU pour un GP de température uniforme dU=

C_v molaire et massique

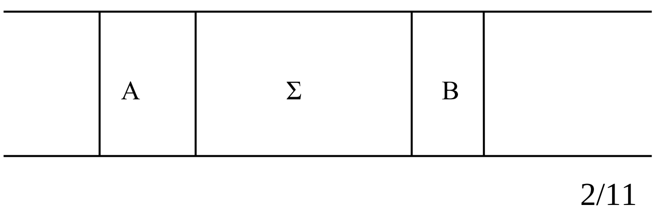
Cas du gaz parfait monoatomique (CE)

- Pour une phase condensée de T uniforme dU=

2) Pour un écoulement stationnaire

*CE : **Établir** les relations $\Delta h + \Delta e = w_u + q$ ...*

- Démonstration exigible :
  - Définition d'un système fermé sur lequel appliquer le premier principe :



système à t :

système à t+dt :

- Premier principe entre t et t+dt appliqué au système fermé :

- Hypothèse d'écoulement stationnaire :

- Travail des forces de pression (échangé avec le fluide en amont et en aval) et travail utile (échangé avec les parties mobiles de la machine):

- **Expression du premier principe pour le système ouvert Σ en régime stationnaire** ***(à connaitre)***
  Ou premier principe industriel :

$$\mathbf{\Delta H+\Delta Ec_{macros}+\Delta Ep_{ext} = [H(B)+Ec_{macros}(B)+Ep_{ext}(B)]- [H(A)+Ec_{macros}(A)+Ep_{ext}(A)]= \delta W_u + \delta Q}$$

- Différences avec le premier principe pour un système fermé :

- Expression en grandeurs massiques *(à connaitre)*

Travail utile massique w_u :

Transfert thermique massique q:

Premier principe en écoulement stationnaire (ou premier principe industriel) en grandeurs massiques :

$$\mathbf{\Delta h+\Delta ec_{macros}+\Delta ep_{ext} = [h(sortie)+ec_{macros}(sortie)+ep_{ext}(sortie)]-[h(entrée)+ec_{macros}(entrée)+ep_{ext}(entrée)] = w_u + q}$$

- Bilan de puissances

Puissance utile Pu :

Puissance thermique Pth :

Premier principe pour un écoulement stationnaire (ou industriel) en puissances :

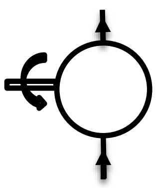
{[h(sortie)+ecmacros(sortie)+epext(sortie)]-[h(entrée)+ecmacros(entrée)+epext(entrée)]}Dm=Pu+Pth

- Rem : Pour un GP :
  Pour une phase condensée :

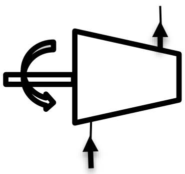
Exercice : Mesure de Cp par écoulement stationnaire
Un liquide de chaleur massique c s'écoule dans un tube horizontal parfaitement calorifugé contenant une résistance R = 10Ω parcourue par un courant d'intensité constante I = 0,50A. On suppose le régime d'écoulement stationnaire, le débit massique du liquide étant $D_m = 1,0$ g.s^{-1}. La température du liquide est de 15,0°C à l'entrée du tube et de 18,3°C à la sortie.
Calculer la capacité thermique massique de ce liquide.

3) Applications à quelques éléments typiques de machines thermiques

a) Compresseur ou pompe

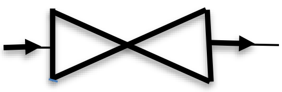


Ou



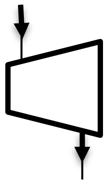
But : Dispositif destiné à accroître la pression d'un gaz (compresseur)
ou d'un liquide (pompe)

b) Détendeur



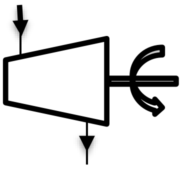
But : Dispositif destiné à abaisser la pression
Bouchon poreux ou tube capillaire

c) Tuyère



But : Dispositif destiné à accroître la vitesse d'écoulement du gaz
Conduite de section variable (croissante… ou décroissante)

d) Turbine

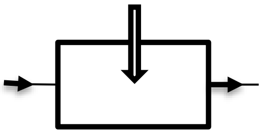


But : Dispositif destiné à fournir du travail à une pièce mobile

e) Evaporateur, condenseur, chambre de combustion

Evaporateur ou chambre de combustion :

Source chaude

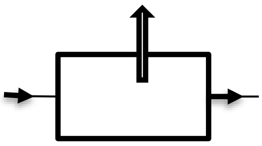


Transfert thermique avec une source chaude

Il y a souvent vaporisation du fluide

Condenseur :

Source froide



Transfert thermique avec une source froide

Il y a souvent condensation du fluide

III. Second principe pour un système ouvert en régime stationnaire

1) Rappels du second principe pour un système fermé (principe d'évolution)

Enoncé : $\Delta S_{i \to f} =$

avec $S_{éch}$

et $S_{créée}$ la

Si la transformation est

Si elle est réversible

S est une fonction d'état extensive, $S_{éch}$ et $S_{créée}$ ne sont pas des fonctions d'état mais des grandeurs échangées

- Forme différentielle du second principe :

CE : Utiliser avec rigueur les notations d et δ en leur attachant une signification.

- Identités thermodynamiques :

Hypothèses : système fermé, $dE_c = 0$, $dE_p = 0$, il n'y a pas d'autre travail que celui de la pression

Démonstration :

$dU = TdS - PdV$ et $dH = TdS + VdP$ d'où $dS =$

- Entropie d'un gaz parfait :

D'où $S(T,V) = S(T_0,V_0) + \; n\, c_{v,molaire}\; ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + nR\; ln\left(\frac{V}{V_0}\right)$

Et $S(T,P) = S(T_0,P_0) + \; n\, c_{p,molaire}\; ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - nR\; ln\left(\frac{P}{P_0}\right)$

(CE MPSI) Utiliser l'expression fournie de la fonction d'état entropie

- Relations de Laplace : *(CE MPSI) Citer et utiliser la loi de Laplace et ses conditions d'application*

- Pour une phase condensée :

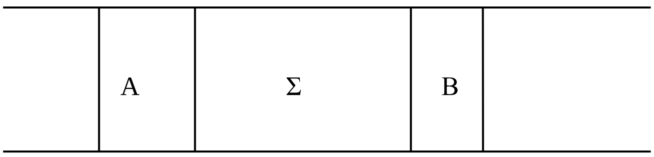
- Lors d'un changement d'état d'un corps pur à température constante, la pression est aussi constante :

(CE MPSI) Citer et utiliser la relation entre les variations d'entropie et d'enthalpie associées à une transition de phase : $\Delta h_{12}\,(T) = T\,\Delta s_{12}\,(T)$

2) Second principe pour un système ouvert en régime stationnaire

CE : Établir les relations ... $\Delta s = s_e + s_c$ ...

- Démonstration exigible :
  - Définition d'un système fermé sur lequel appliquer le second principe :



Système fermé à t :

système fermé à t+dt :

  - Application du second principe au système fermé entre t et t+dt :

  - Hypothèse d'écoulement stationnaire :

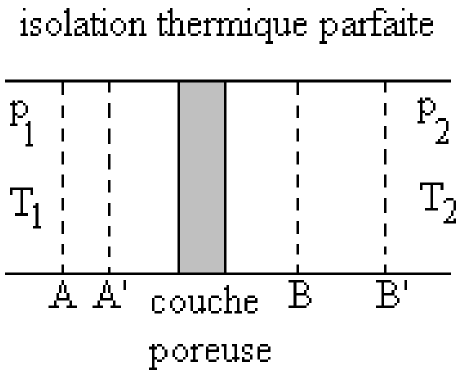
$\Delta S = S(B) - S(A) = \delta S_{éch} + \delta S_{crée}$

- Expression du second principe en grandeurs massiques :

$\boxed{\Delta s = s(sortie) - s(entrée) = s_{éch} + s_{cré}}$

Exercice : En s’écoulant à travers une membrane fixe, un fluide subit une diminution de pression appelée **détente de Joule-Thomson** si le travail utile et le transfert thermique reçus sont nuls.

a) Montrer que la transformation est isenthalpique.
b) Si le fluide est un gaz parfait, en déduire sa variation de température et sa variation d’entropie massique.
c) Evaluer, pour un gaz parfait, l’entropie crée par irréversibilité.

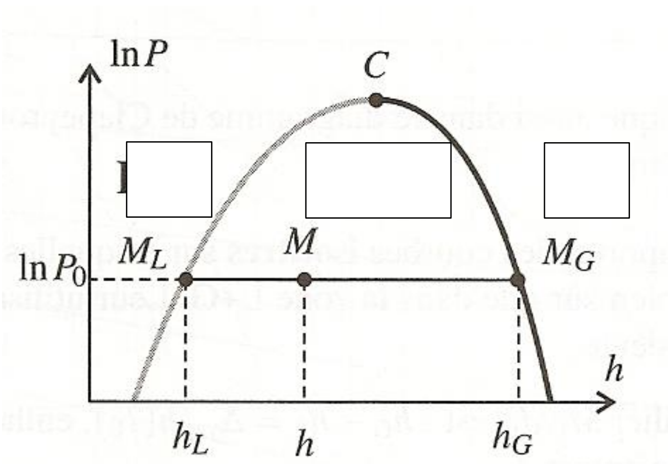


IV. Utilisation du diagramme (P,h) pour l'étude d'une machine thermique

(CE) : Établir les relations $\Delta h+\Delta e = w_u+q$ et $\Delta s = s_e+s_c$ et les utiliser pour étudier des machines thermiques réelles à l'aide du diagramme (P,h).

1) Diagramme (P,h) d'un fluide

a) Courbe de saturation et composition d'un système diphasé



Zones : L, G, L+G à savoir placer
Courbe de saturation :
- Courbe d'ébullition : où apparaît

- Courbe de rosée : où apparaît

Définition du titre massique en gaz : x =

Un échantillon de masse m contient :
une masse de liquide
et une masse de gaz.

Cas particuliers : x=0 liquide saturant
x=1 vapeur saturante

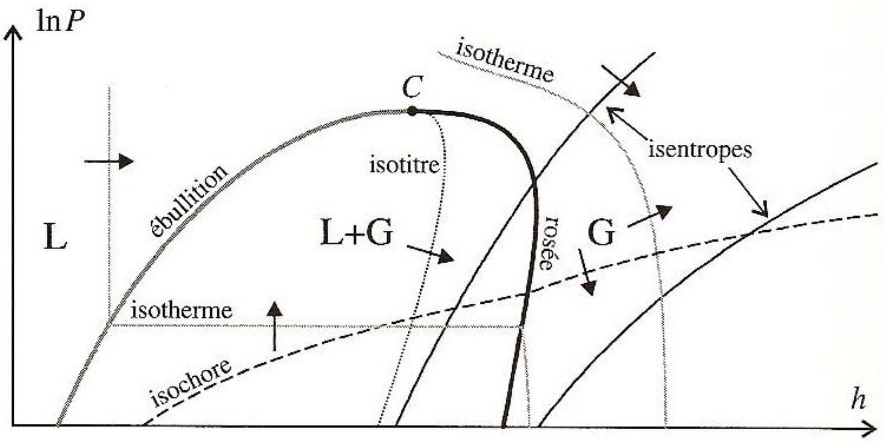
H est extensive donc H =

D'où le théorème des moments : x =

Enthalpie massique de vaporisation : $\Delta_{vap}h$ =

b) Présentation des différentes courbes du diagramme

Différents types de courbes : (remarquer les unités : ce sont des grandeurs massiques)



- Courbe de saturation
- isenthalpes

- isobares

- isotitres

- isochores

- isothermes
  Pour le mélange L+G :

  Dans la zone L :

  Dans la zone G :

- isentropes

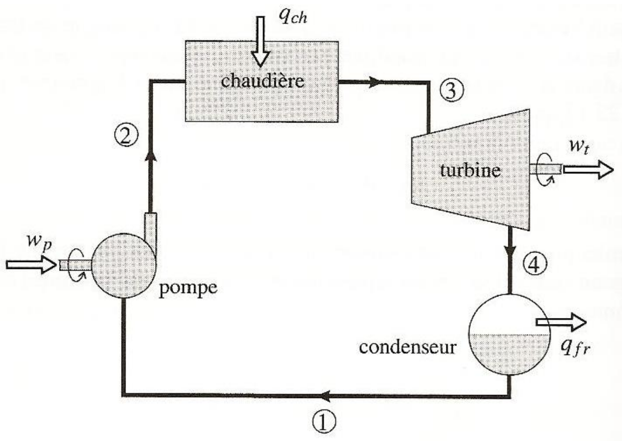
c) Intérêt

On peut lire sur le diagramme les variations des grandeurs thermodynamiques intensives du fluide entre un état initial et un état final connus.
Ces valeurs sont celles d'un **fluide réel**. Elles sont bien plus fiables que celles obtenues en utilisant les modèles du gaz parfait ou du liquide incompressible et indilatable.
Les échanges d'énergie (travail et transfert thermique) sont visualisés sur le diagramme (ln(P),h) :
$h_B - h_A = w_u + q$

2) Exemple : étude du circuit d'eau d'une centrale électrique

Description du cycle (de Rankine) :

C'est un cycle moteur !



Etat 1 : P_1=0,2 bar liquide saturant

1→2 : dans la **pompe** compression adiabatique réversible $w_u = w_P$

Etat 2 : P_2=100 bar état liquide

2→3 : dans la **chaudière**, le fluide reçoit un transfert thermique q_{ch} à pression constante, il monte en température jusqu'à T_3=340°C

Etat 3 : $P_3 = P_2$ T_3=340°C vapeur sèche

3→4 : dans la **turbine**, détente adiabatique réversible $w_u = w_t$

Etat 4 : $P_4 = P_1$ mélange L+V

4→1 : dans le **condenseur**, la vapeur se condense totalement de manière isobare et isotherme au contact avec la source froide (rivière de température 15°C), transfert thermique q_{fr}

Tracé du cycle (de Rankine) dans le diagramme P-h donné en annexe (page suivante) :

Estimation des transferts :

Définition et calcul du rendement :

Comparaison au rendement du cycle de Carnot (à savoir démontrer !):

Evaluation de l'entropie créée par irréversibilité :

3) **Exemple : étude d'une machine frigorifique :** ex TD Th1

Annexe : diagramme (P,h) de l'eau

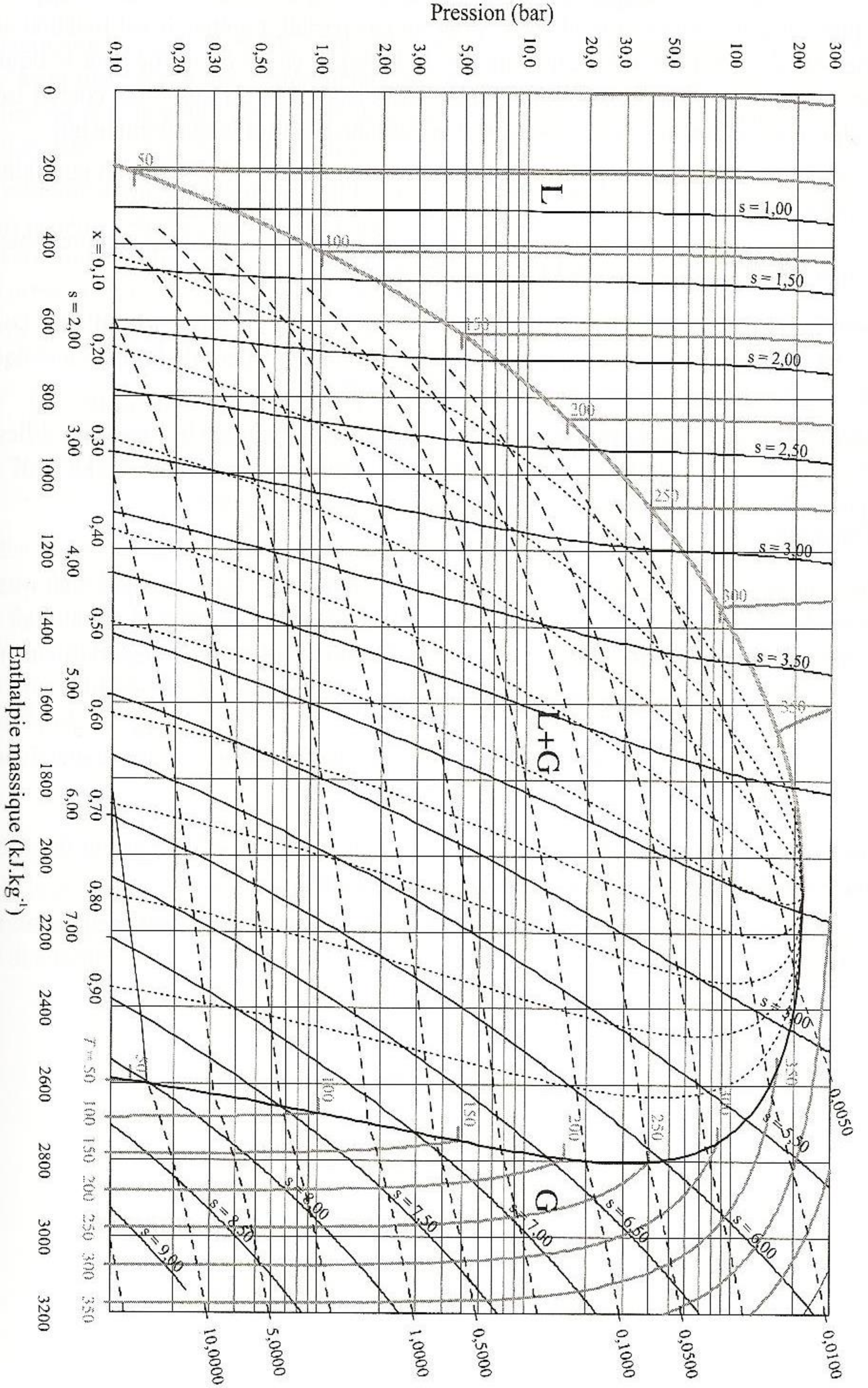


Diagramme (P,h) de l'eau. L'échelle de pression est logarithmique.
Les températures sont en °C, les entropies massiques en $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$
et les volumes massiques en $m^3.kg^{-1}$.