

# OÙ ON EN EST

- I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique
- II) Notions de base et définitions
- III) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes fermés)
- IV) *Propriétés des corps purs, simples et compressibles***

heure 9



- *Postulat d'état*
- *Relations P-v-T*
- *Propriétés thermodynamiques*
- *Gaz Parfait*

- V) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)
- VI) 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique
- VII) Entropie
- VIII) Cycles thermodynamiques communs
- IX) Mélanges non réactifs



# IV) PROPRIÉTÉS DES CORPS PURS, SIMPLES ET COMPRESSIBLES

## Révision

- i) Substance pure : substance de composition chimique uniforme et constante (dans l'espace) (éléments purs ou mélanges chimiquement uniformes)
- ii) Phase : quantité de matière physiquement homogène (solide, liquide, gaz) et de composition chimique uniforme
- iii) État : l'état d'un système thermodynamique est défini par la valeur de ses propriétés. *Il faut noter que les propriétés ne sont pas toutes indépendantes les unes des autres. Donc, on peut spécifier un nombre limité de propriétés pour définir un état.*

**1) Postulat d'état:** établit le nombre maximal de propriétés pouvant être fixées de façon indépendante pour spécifier un état.



# 1) POSTULAT D'ÉTAT

- Pour un système de composition chimique constante, le nombre de propriétés intensives indépendantes ( $n$ ) pouvant fixer un état est:

$$n = m + 1$$

- $m$  est le nombre de forces généralisées (pression, gravitation, électrique, ...) pouvant effectuer un travail quasi-statique.
- **Système simple et compressible:** système sans effet gravitationnel, électrique, magnétique, cinétique et tension de surface..., la seule force pouvant effectuer un travail quasi-statique est la pression :  $m=1 \rightarrow n=2$

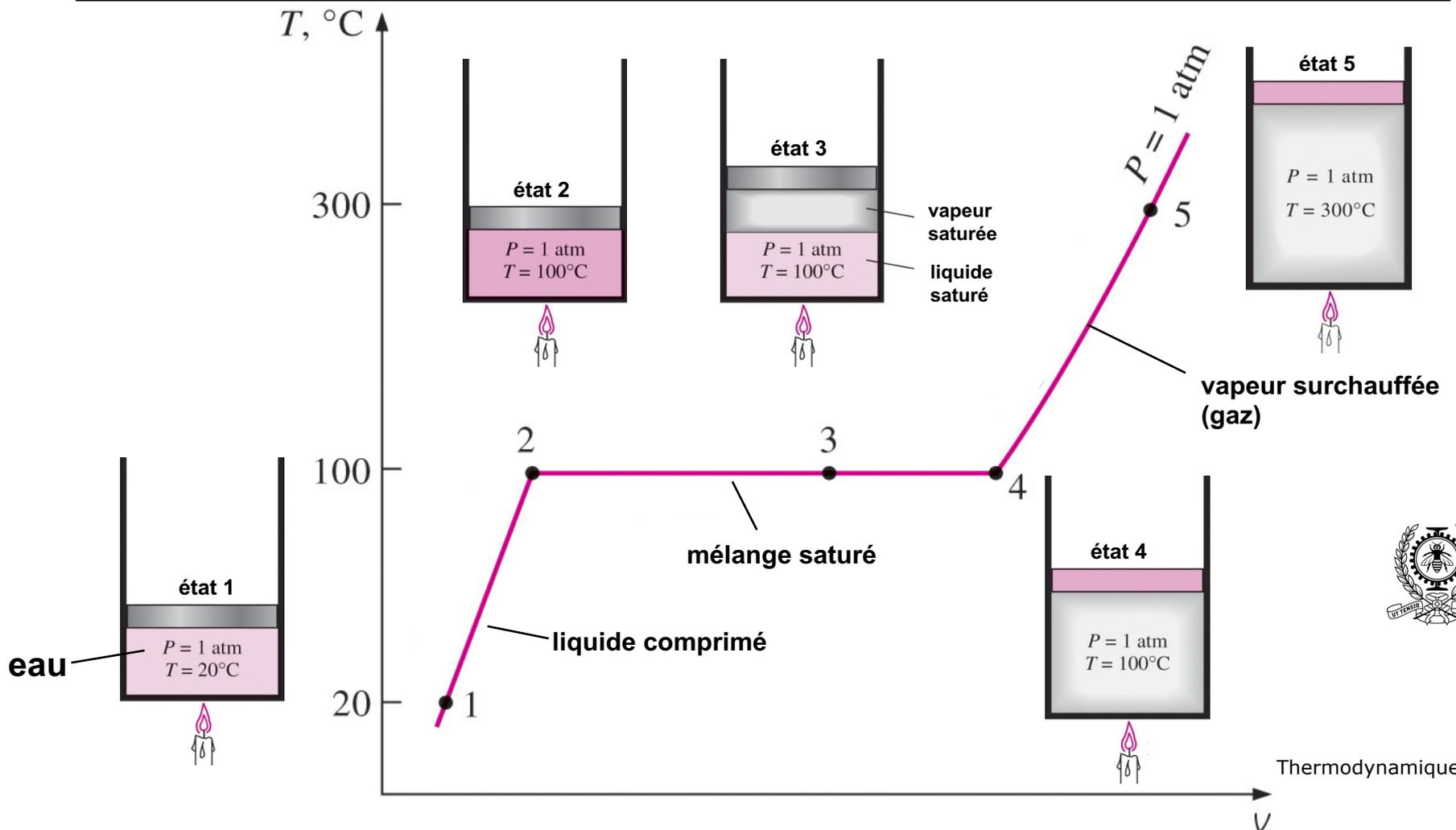
*Pour un système simple et compressible, un état peut être spécifié par deux propriétés intensives indépendantes (exemples :  $P$  et  $T$ , ou  $P$  et  $\rho$ , ou  $T$  et  $\rho$ ; soit  $u=f(P,T)$ ,  $f(P,\rho)$  ou  $f(T,\rho)$  )*

**Notes** : Deux propriétés sont indépendantes si on peut varier une, en gardant l'autre constante. Si on incluait la gravité, il faudrait spécifier une propriété additionnelle, soit la hauteur



## 2) RELATIONS P-v-T

**Exemple** : le chauffage de 1 kg d'eau à *pression atmosphérique constante* dans un cylindre et piston:



# RELATIONS P-V-T, CHAUFFAGE DE L'EAU À PRESSION CONSTANTE

États 1 à 2: L'eau est sous forme de **liquide comprimé**, c'est-à-dire un liquide qui n'est **pas** sur le point de s'évaporer (ex.: eau à 1 atm, en bas de 100°C).

- **La température augmente** (la chaleur fournie augmente l'énergie sensible).

État 2: L'eau commence à vaporiser (changement de phase liquide-gaz)

États 2 à 4: Il y a deux phases de l'eau (liquide, gaz) qui co-existent en équilibre, dont:

- i) **liquide saturé**: liquide sur le point de vaporiser
- ii) **vapeur saturée**: gaz sur le point de condenser

- La température reste constante pendant le changement de phase (la chaleur fournie casse les liens entre molécules caractérisant la phase liquide)

- **Énergie latente de vaporisation**: énergie absorbée par unité de masse vaporisée

- Le taux de vaporisation dépend du taux de chaleur ajoutée ( $dQ/dt$ ).

État 4: L'eau liquide vient d'être entièrement évaporée

États 4 à 5: L'eau est sous forme de **vapeur surchauffée**, c'est-à-dire un gaz qui n'est **pas** sur le point de se condenser (ex.: eau à 1 atm, en haut de 100°C).

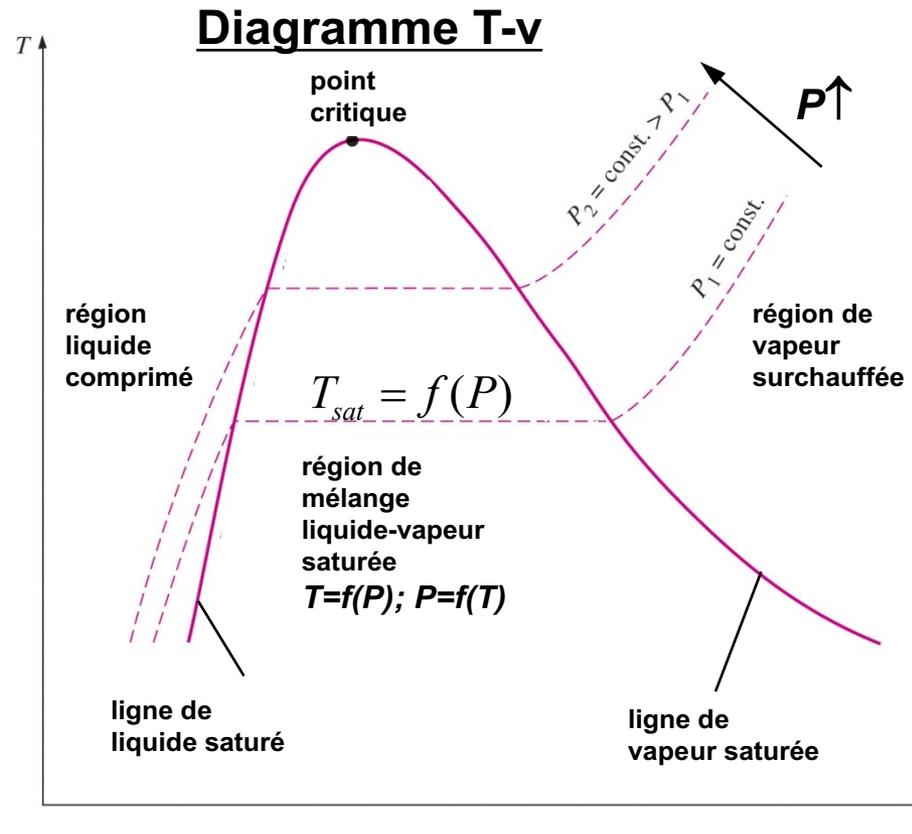
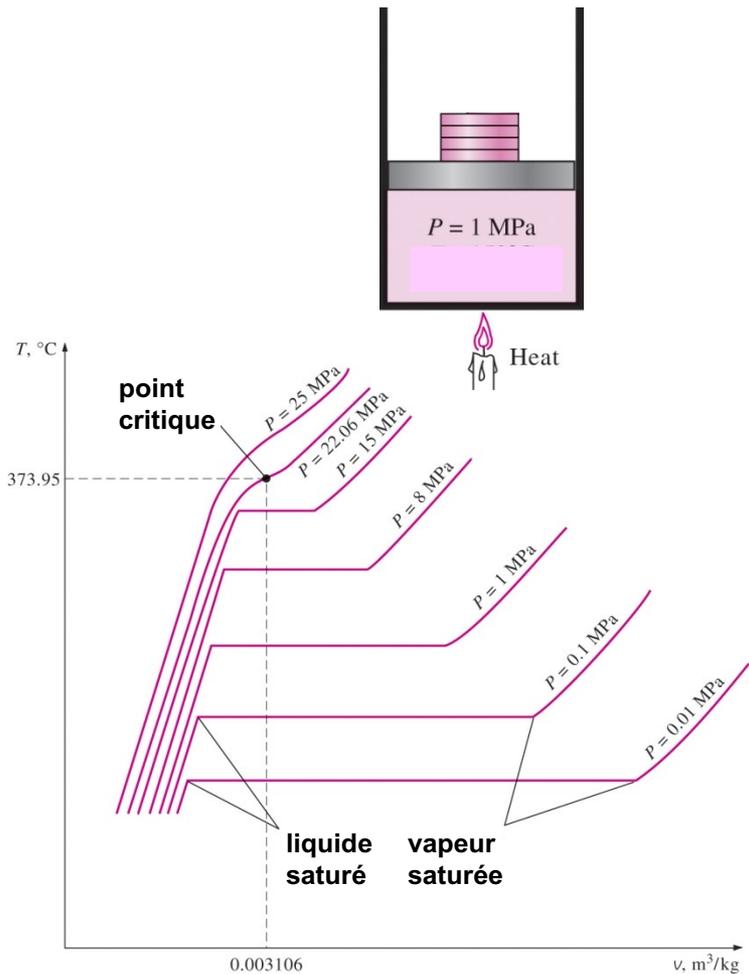
- **La température augmente** (la chaleur fournie augmente l'énergie sensible)

**Note:** Si on enlève de la chaleur à partir de l'état 5, l'évolution 5-1 reprend le même chemin en direction inverse



# A) DIAGRAMME T-v

On répète l'exercice précédent, à chaque fois avec une pression constante différente, en changeant la masse du piston.



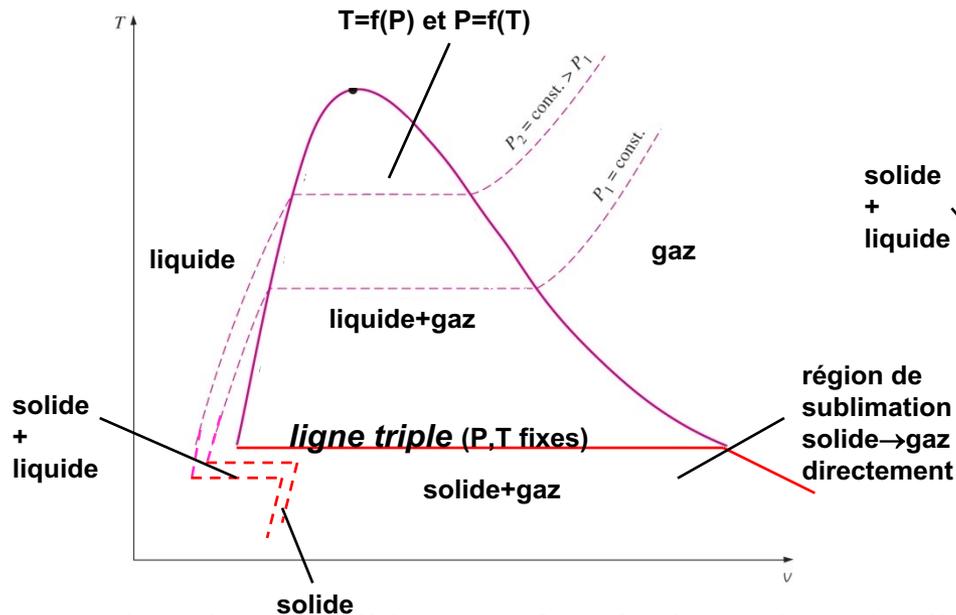
# DIAGRAMME T-v

**Température de saturation ( $T_{sat}$ ):** température à laquelle une substance pure change de phase, sujette à une certaine pression.

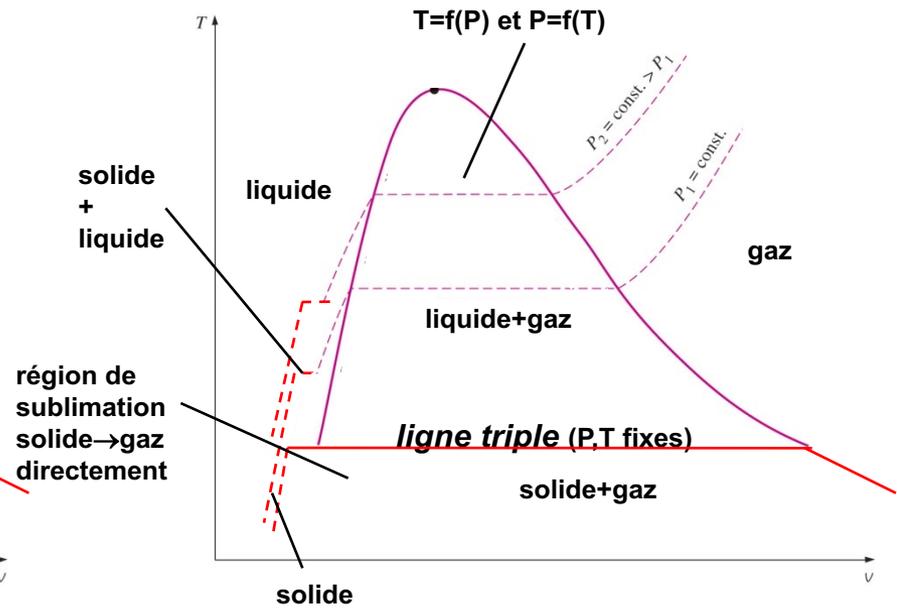
$$T_{sat} = f(P)$$

**Point critique:** point au-dessus duquel il n'y a pas de distinction entre liquide et vapeur saturée.

Substance qui s'expand sur congélation



Substance qui se contracte sur congélation



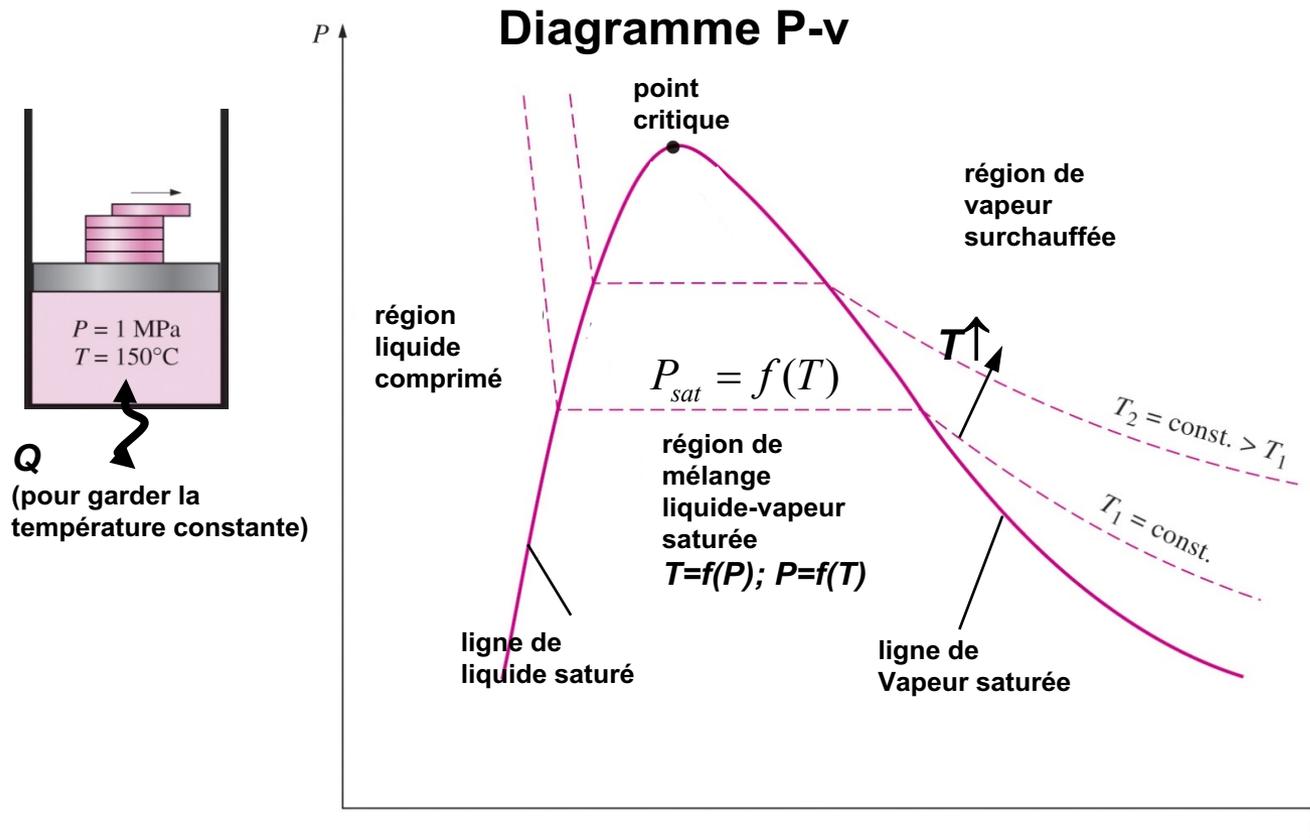
- La phase solide peut être incluse dans le diagramme T-v:

- **Ligne triple:** ligne où les trois phases coexistent (P et T y sont fixes)



# B) DIAGRAMME P-v

Obtenu en enregistrant le changement de volume spécifique associé à une lente variation de pression, à température constante.



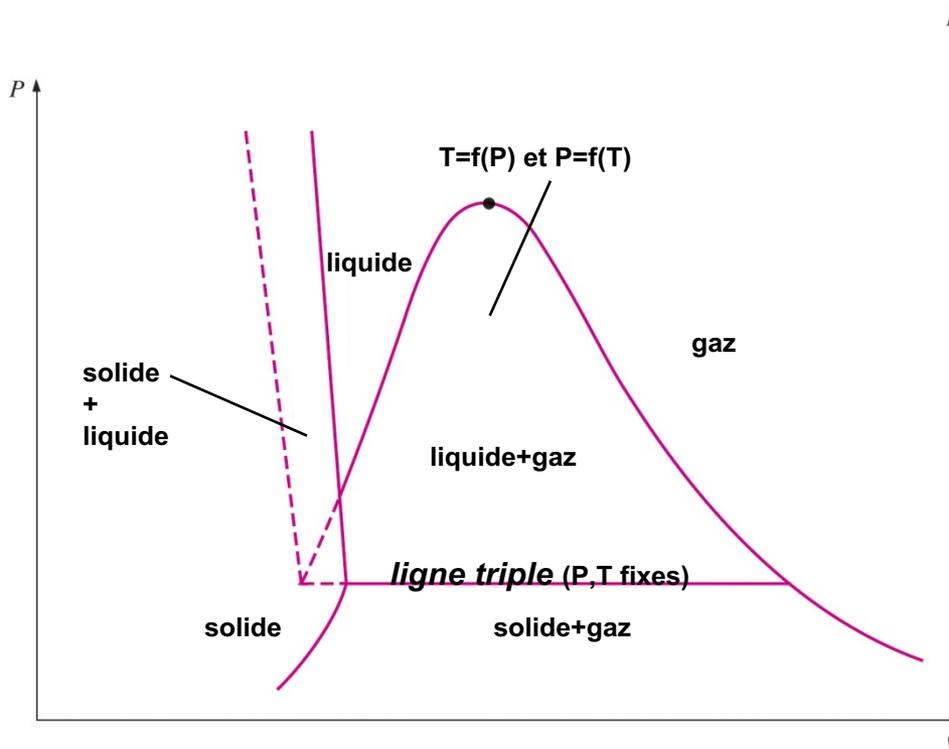
**Exemple :** Eau dans un cylindre/piston, pression changée lentement en enlevant des petites masses sur le piston, température gardée constante en laissant l'eau échanger de la chaleur avec l'environnement.



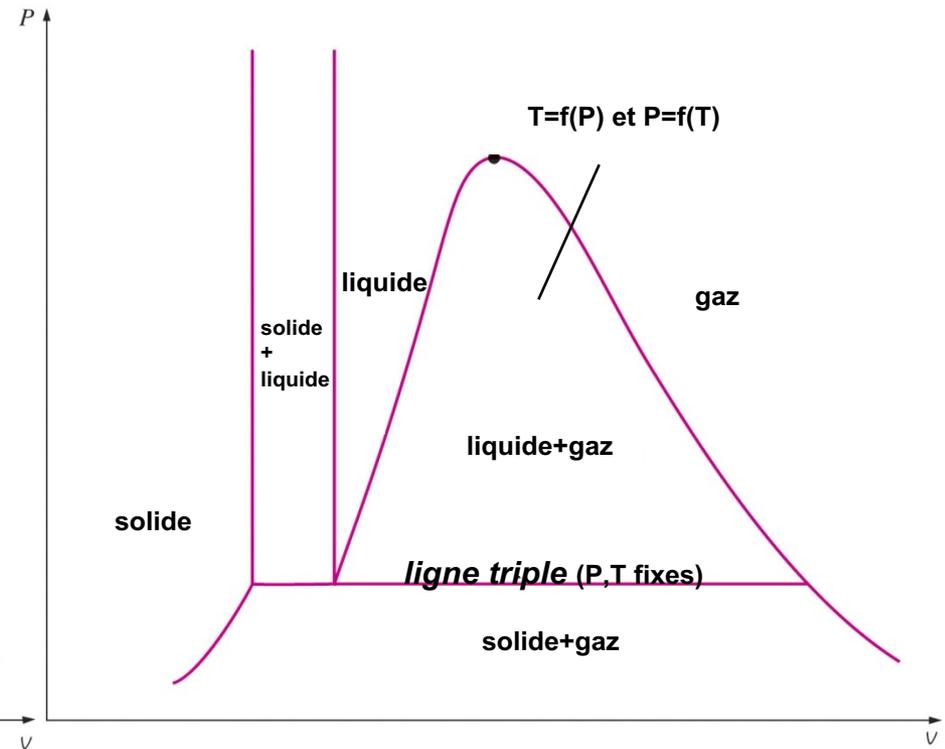
# DIAGRAMME P-v

**Pression de saturation ( $P_{sat}$ ):** pression à laquelle une substance pure change de phase, pour une certaine température.  
 $P_{sat} = f(T)$

Substance qui s'expand sur congélation



Substance qui se contracte sur congélation

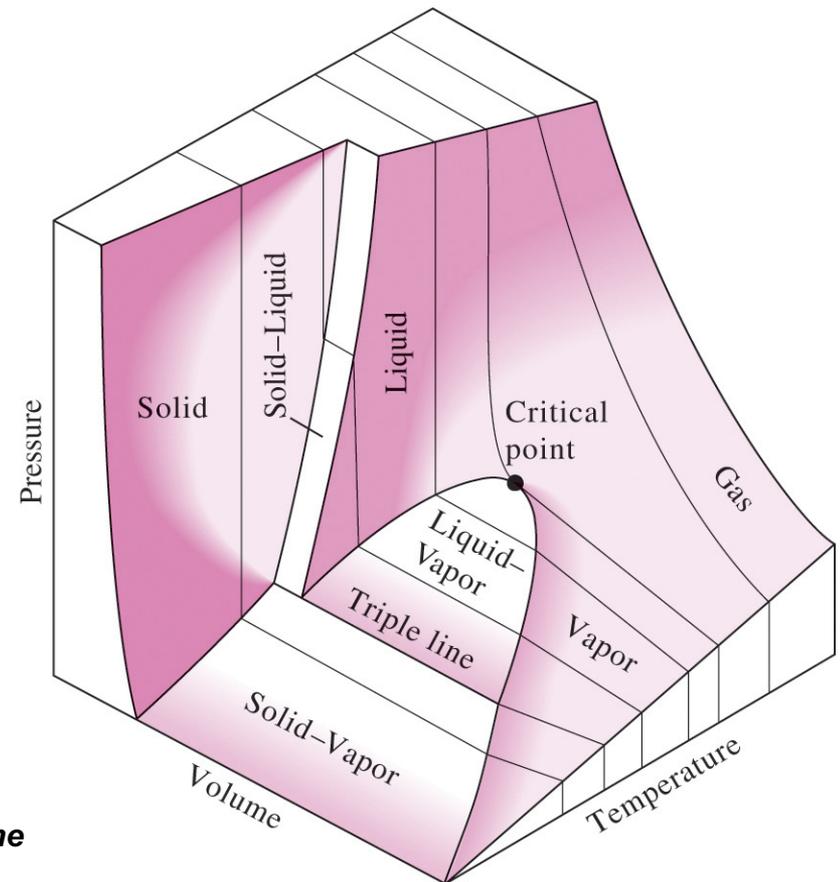
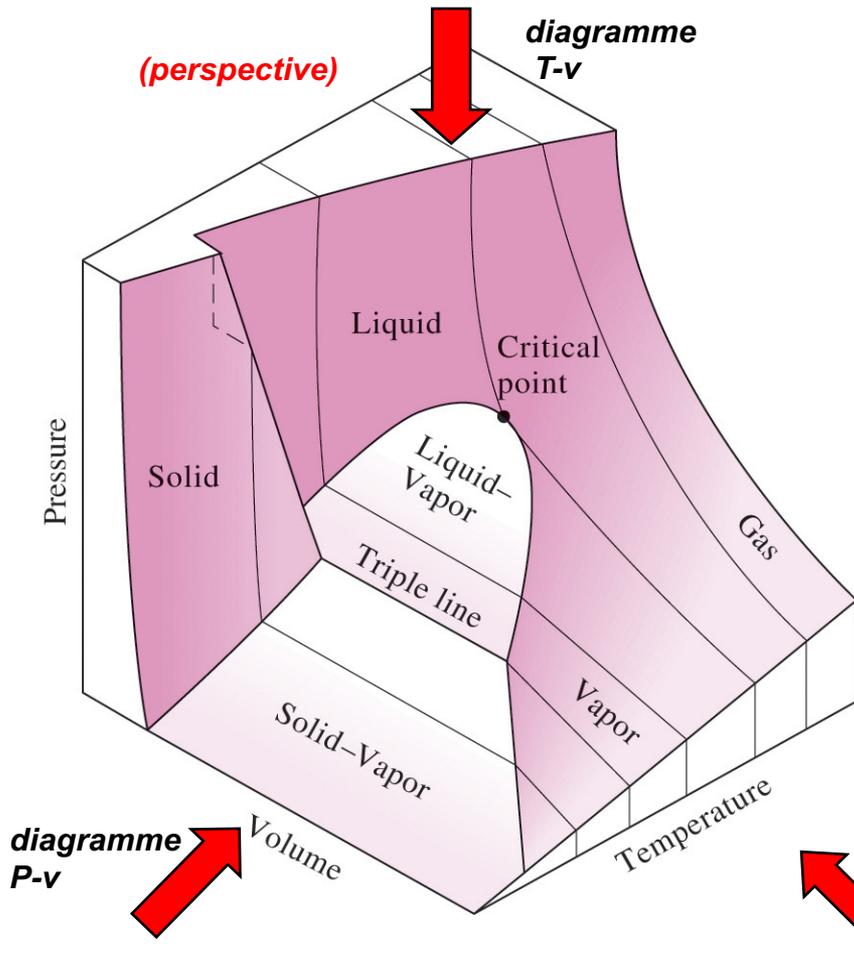


# C) DIAGRAMME P-v-T

Diagrammes T-v et P-v assemblés en 3-D donnent le diagramme P-v-T

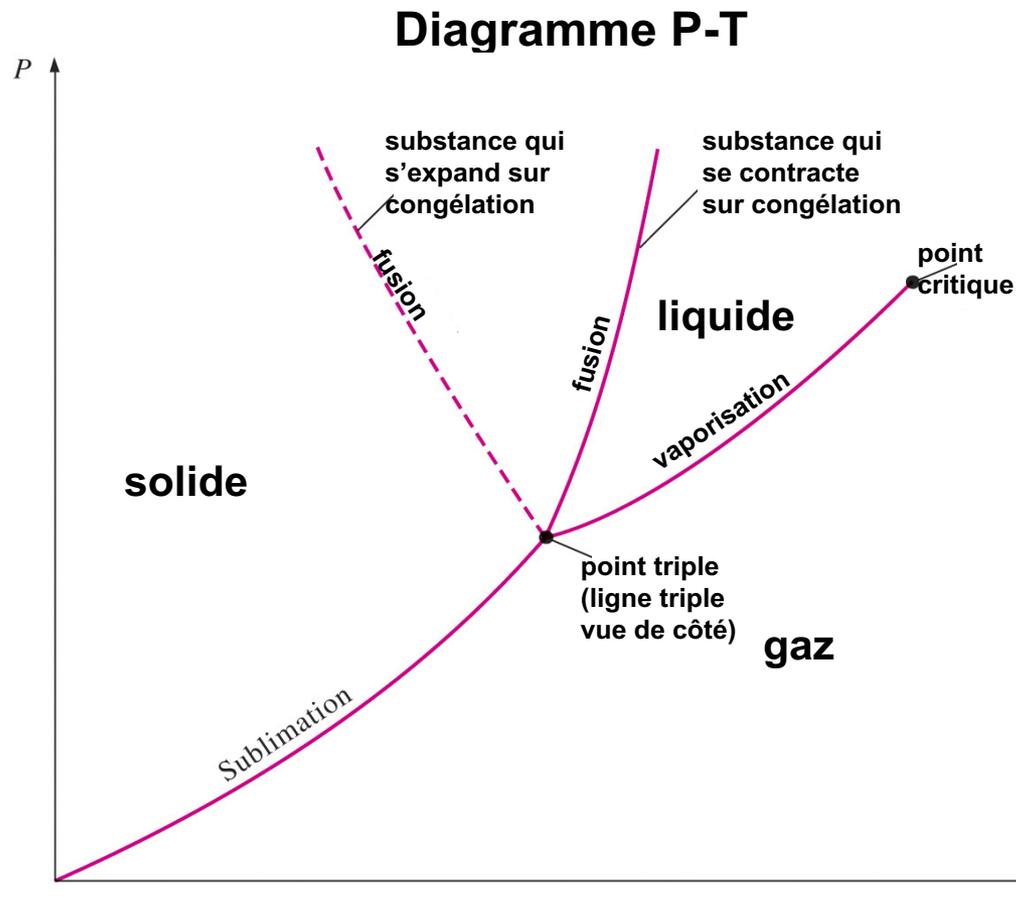
Substance qui s'expand sur congélation

Substance qui se contracte sur congélation



# D) DIAGRAMME P-T

*Diagramme de phase: Diagramme P-v-T vu de côté.*

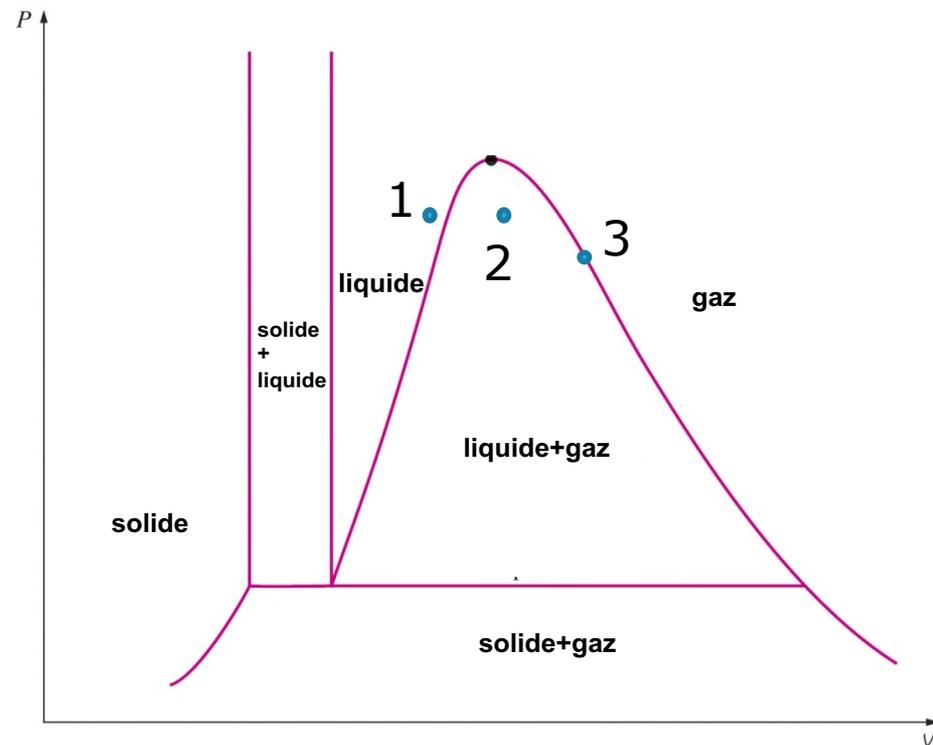


# QUESTION CONCEPTUELLE

## DIAGRAMMES P-V

Lequel des états décrits dans le diagramme P-v a la température la plus élevée ?

- A) 1
- B) 2
- C) 3



# OÙ ON EN EST

- I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique
- II) Notions de base et définitions
- III) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes fermés)
- IV) *Propriétés des corps purs, simples et compressibles***

- *Postulat d'état*
- *Relations P-v-T*
- ***Propriétés thermodynamiques***
- ***Gaz Parfait***

heures 10,11



- V) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)
- VI) 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique
- VII) Entropie
- VIII) Cycles thermodynamiques communs
- IX) Mélanges non réactifs



# 3) PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES

- a) Propriétés intensives de base: P, T, v et  $\rho$ : déjà vues  
 b)

**Enthalpie (h)**: Une propriété dérivée pour des raisons pratiques, utile dans plusieurs problèmes thermodynamiques, surtout les systèmes ouverts.

$$H = U + PV \quad (\text{forme extensive}) \quad (\text{notez que } \mathbf{U} \text{ et } \mathbf{PV} \text{ ont la même unité})$$

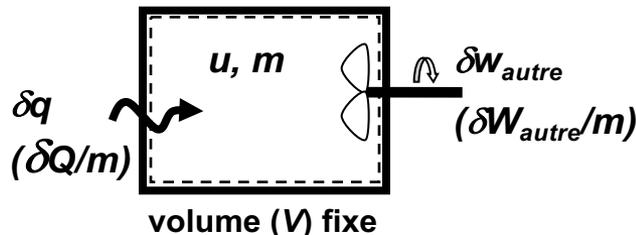
$$h = u + Pv \quad (\text{forme intensive})$$

c)

**Chaleurs spécifiques ( $c_p$ ,  $c_v$ )**: Énergie requise pour augmenter la température d'une unité de masse d'une substance de un degré. C'est donc une mesure de la capacité de stockage d'énergie d'une substance.

- Deux types de chaleurs spécifiques (peuvent toutes deux être exprimées sous forme massique et molaire)

i) Chaleur spécifique à volume constant (isochore) ( $c_v$ )



$$\Delta e_{\text{sys}} = e_{\text{in}} - e_{\text{out}}$$

$$\Delta u + \Delta e_c + \Delta e_p = \underbrace{\delta q + \delta w_{\text{autre}}}_{\text{énergie transférée au système}}$$

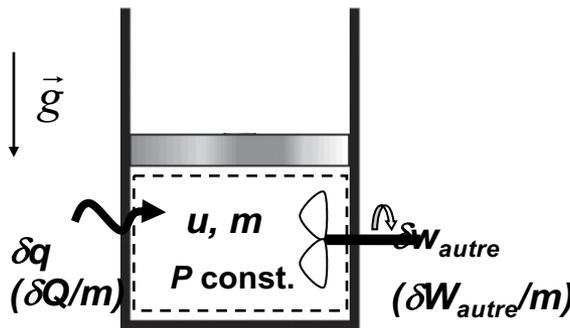


# PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES – CHALEURS SPÉCIFIQUES

$$c_v = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\overbrace{\delta q + \delta w_{\text{autre}}}^{\text{énergie fournie}}}{\Delta T} \Big|_{V_{\text{const.}}} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\overbrace{\Delta u}^{\text{stockage d'énergie}}}{\Delta T} \Big|_{V_{\text{const.}}} \equiv \frac{\partial u}{\partial T} \Big|_V$$

$$\boxed{c_v = \frac{\partial u}{\partial T} \Big|_V} = \text{changement d'énergie interne avec } T \text{ en gardant le volume constant}$$

ii) Chaleur spécifique à pression constante (isobare) ( $c_p$ )



$$\Delta e_{\text{sys}} = e_{\text{in}} - e_{\text{out}}$$

$$\Delta u + \Delta \vec{e}_c + \Delta \vec{e}_p = \delta q + \delta w_{\text{autre}} - P \Delta v$$

$$\underbrace{\delta q + \delta w_{\text{autre}}}_{\text{énergie transférée au système}} = \Delta u + P \Delta v = \Delta(u + Pv) \equiv \Delta h$$

$$c_p = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\delta q + \delta w_{\text{autre}}}{\Delta T} \Big|_{P_{\text{const.}}} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta T} \Big|_{P_{\text{const.}}} \equiv \frac{\partial h}{\partial T} \Big|_P$$

$$\boxed{c_p = \frac{\partial h}{\partial T} \Big|_P} = \text{changement d'enthalpie avec } T \text{ en gardant la pression constante}$$



# PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES – CHALEURS SPÉCIFIQUES

## Notes:

- $c_v$  et  $c_p$  sont exprimées en terme d'autres propriétés ( $h, u, T, v, P$ ). Par conséquent,  $c_v$  et  $c_p$  sont elles mêmes des propriétés, c'est-à-dire dépendantes de l'état et indépendantes de l'évolution)
- Unités de  $c_v$  et  $c_p$  est [kJ/kg\*K] ou [kJ/kmol\*K]
- $c_p > c_v$  car une partie de l'énergie fournie va au travail de frontière  $P\Delta v$
- Pour une substance incompressible (bonne approximation pour les liquides et solides), le volume spécifique ( $v$ ) reste constant ( $\Delta v = 0$ ) et  $u$  est fonction de  $T$  seulement, donc:

$$P\Delta v = 0 \rightarrow c_v = c_p = c = \frac{du}{dT}$$



# QUESTION CONCEPTUELLE

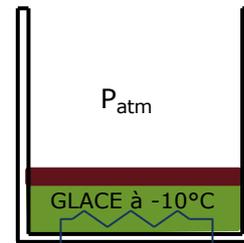
## CHANGEMENT DE PHASE

Soit 0,5 kg de glace à la température de  $-10^{\circ}\text{C}$ . On désire porter cette glace à l'état de mélange saturé avec un titre de 10%.

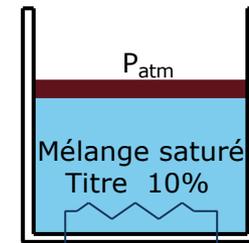
Les changements de phase se font à pression constante. Déterminer en kWh, l'énergie à fournir pour réaliser cette opération.

- A. 500.3 kWh
- B. 1295 kWh
- C. 0.387 kWh
- D. 0.139 kWh

|                            |             |
|----------------------------|-------------|
| $c_{\text{glace}}$         | 2.1 kJ/kg*K |
| $c_{\text{liquide}}$       | 4.2 kJ/kg*K |
| $\Delta h_{\text{fusion}}$ | 334 kJ/kg   |
| $\Delta h_{\text{vap.}}$   | 2256 kJ/kg  |



Etat①: Glace à  $-10^{\circ}\text{C}$



Etat②: Eau mélange saturé 10% (masse)

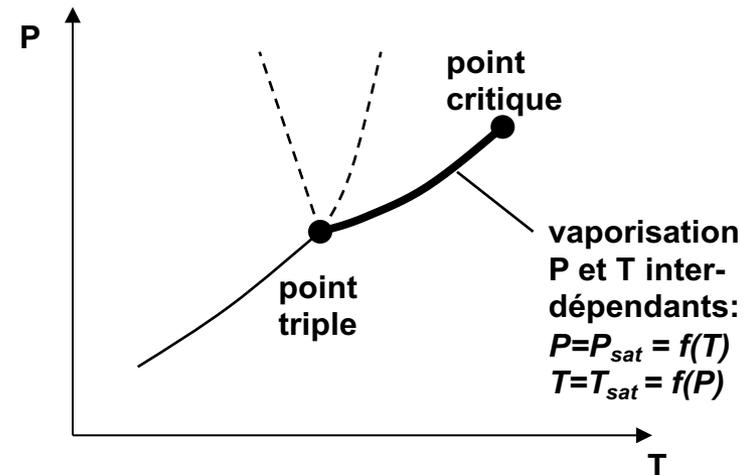
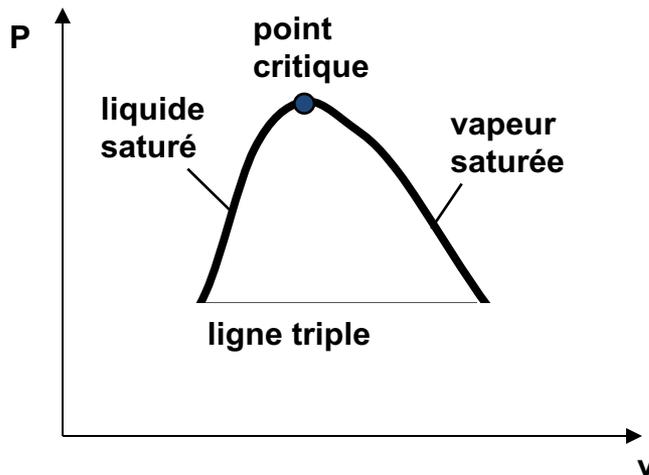


# PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES

## d) Tables des propriétés

Dans la majeure partie des cas, la relation entre les propriétés thermodynamiques est complexe et ne peut être exprimée par des équations simples (telle que  $PV=NRT$ ). Donc, les propriétés sont mesurées et mises sous forme de tables. Voici comment on utilise les tables pour trouver les propriétés associées à un état particulier.

### i) liquides et vapeurs saturés



# LIQUIDES ET VAPEURS SATURÉS

Pour une valeur de  $T$  donnée, les tables donnent  $P_{\text{sat}}$  et les autres propriétés.  
 Pour une valeur de  $P$  donnée, les tables donnent  $T_{\text{sat}}$  et les autres propriétés  
 ex.: C & B, tables A-4 et A-5 pour  $\text{H}_2\text{O}$

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table (Continued)

| Temp.,<br>$T$ °C | Sat. press.,<br>$P_{\text{sat}}$ kPa | Specific volume,<br>$\text{m}^3/\text{kg}$ |                      | Internal energy,<br>kJ/kg |                    |                      | Enthalpy,<br>kJ/kg    |                    |                      | Entropy,<br>kJ/kg · K |                    |                      |
|------------------|--------------------------------------|--|----------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|
|                  |                                      | Sat. liquid,<br>$v_f$                      | Sat. vapor,<br>$v_g$ | Sat. liquid,<br>$u_f$     | Evap.,<br>$u_{fg}$ | Sat. vapor,<br>$u_g$ | Sat. liquid,<br>$h_f$ | Evap.,<br>$h_{fg}$ | Sat. vapor,<br>$h_g$ | Sat. liquid,<br>$s_f$ | Evap.,<br>$s_{fg}$ | Sat. vapor,<br>$s_g$ |
| 205              | 1724.3                               | 0.001164                                   | 0.11508              | 872.86                    | 1723.5             | 2596.4               | 874.87                | 1920.0             | 2794.8               | 2.3776                | 4.0154             | 6.3930               |

Exemples de propriétés données dans les tables:

- $v_f$  et  $v_g$ : volume spécifique du liquide saturé et de la vapeur saturée, respectivement.
- $u_f$  et  $u_g$ : énergie interne spécifique du liquide saturé et de la vapeur saturée, respectivement.
- $h_f$  et  $h_g$ : enthalpie spécifique du liquide saturé et de la vapeur saturée, respectivement.
- $s_f$  et  $s_g$ : entropie spécifique du liquide saturé et de la vapeur saturée, respectivement.
- $u_{fg}$ ,  $h_{fg}$  et  $s_{fg}$

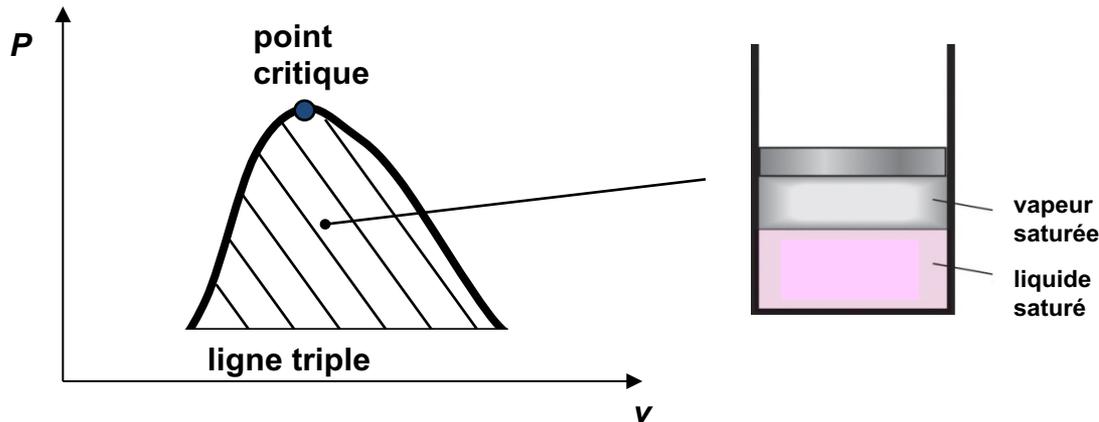
$$\text{où } (\text{propriété})_{fg} = (\text{propriété})_g (\text{vapeur saturée}) - (\text{propriété})_f (\text{liquide saturé})$$

- $h_{fg}$  ('énergie de vaporisation'): énergie requise pour vaporiser une masse unitaire de liquide saturé à une certaine  $P$  ou  $T$



# LIQUIDES ET VAPEURS SATURÉS

## ii) mélanges liquide/vapeur saturés



Pour obtenir une propriété extensive  $Y$  (par exemple  $V$ ,  $U$ ,  $H$  ou  $S$ ) d'un mélange composé de deux phases, on somme la propriété  $Y$  des deux phases et on divise par la masse totale du mélange pour obtenir la propriété intensive  $y$  ( $Y/m$ ) du mélange.

**Par exemple:** volume spécifique du mélange ( $Y=V$ )

$$\begin{array}{c}
 \text{liquide saturé} \\
 \downarrow \\
 V_{total} = V_f + V_g \\
 \uparrow \\
 \text{vapeur saturée}
 \end{array}$$

$$m_{totale} v_{total} = m_f v_f + m_g v_g \rightarrow m_{totale} = m_f + m_g$$

$$v_{totale} = \frac{m_f}{m_{totale}} v_f + \frac{m_g}{m_{totale}} v_g = \left(1 - \frac{m_g}{m_{totale}}\right) v_f + \frac{m_g}{m_{totale}} v_g$$



# LIQUIDES ET VAPEURS SATURÉS

Nous avons besoin d'une nouvelle propriété qui donne la proportion des composantes du mélange. Définissons une telle propriété dénommée 'titre' (dénotée  $x$ ):

$$x = \frac{m_g}{m_{totale}} = \frac{m_g}{m_f + m_g} \rightarrow \begin{array}{l} x=0 : \text{liquide saturé} \\ 0 < x < 1 : \text{mélange saturé} \\ x=1 : \text{vapeur saturée} \end{array}$$

- Le volume spécifique du mélange peut être exprimé:  $v = (1 - x)v_f + xv_g$
- Pour une **propriété intensive  $y$**  (ex.:  $v, u, h, s$ ) (forme réduite d'une propriété extensive  $Y$ ):

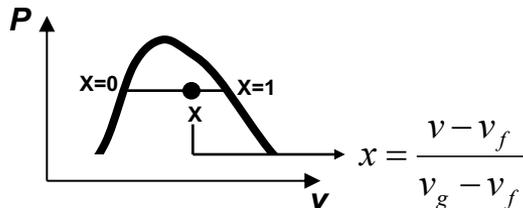
$$y = (1 - x)y_f + xy_g$$

$$y = y_f + xy_{fg}$$

où

$$y_{fg} \equiv y_g - y_f$$

- Alternativement, connaissant  $y$  on peut trouver  $x$ :



$$x = \frac{y - y_f}{y_g - y_f}$$



# LIQUIDES ET VAPEURS SATURÉS

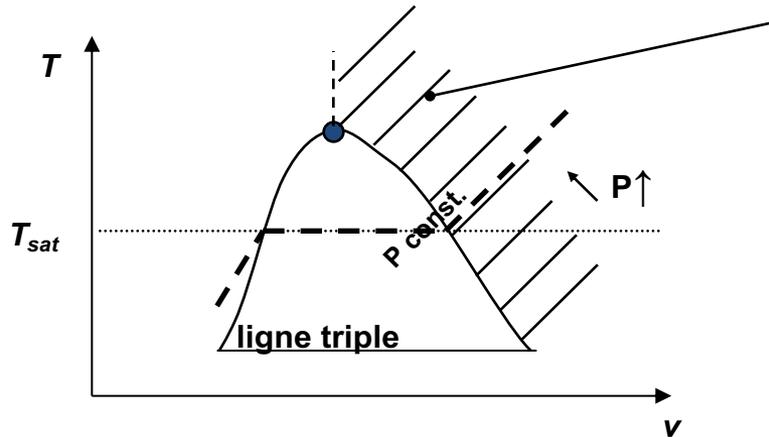
## Notes:

- $0 < x < 1$ , donc  $y_f < y < y_g$
- Les valeurs de  $y_f$  et  $y_g$  viennent des tables de liquide/vapeur saturé
- Selon le postulat d'état, dans ce cas on aurait besoin de deux propriétés indépendantes pour décrire un état:
  - Liquide comprimé ou vapeur surchauffée : **P et T** (indépendantes)
  - Mélange saturé: **P ou T** (inter-dépendantes) **et x**.



# PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES

## iii) vapeur surchauffée



région de vapeur surchauffée

- $P$  &  $T$  indépendantes
- $P < P_{sat}$  pour une  $T$  donnée
- $T > T_{sat}$  pour une  $P$  donnée
- $v > v_g$  pour une  $P$  ou  $T$  donnée
- $u > u_g$  pour une  $P$  ou  $T$  donnée
- $h > h_g$  pour une  $P$  ou  $T$  donnée
- $s > s_g$  pour une  $P$  ou  $T$  donnée

Pour les propriétés qui sont à la fois dépendantes de  $P$  et de  $T$  ( $y = f(P, T)$ ), une interpolation 2-D est parfois nécessaire dans les tables pour  $v$ ,  $u$ ,  $h$ ,  $s$  versus  $P$  et  $T$ .

Exemple: C & B, tables A-6 pour  $H_2O$

TABLE A-6

Superheated water

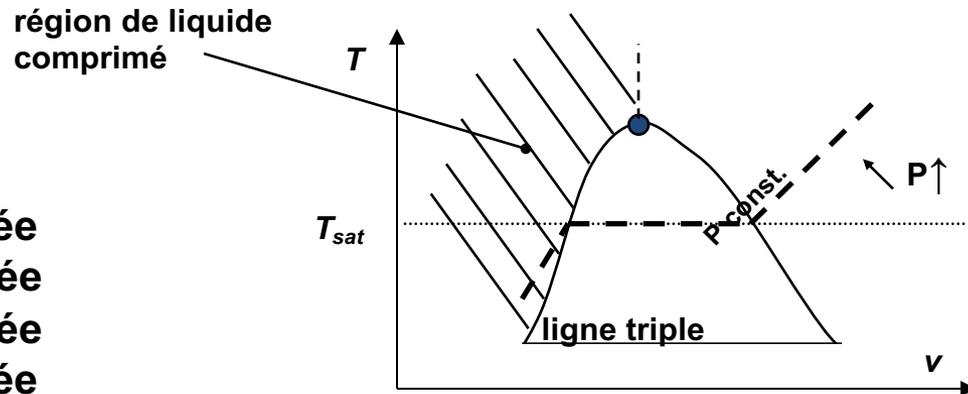
| $T$<br>°C                          | $v$<br>m <sup>3</sup> /kg | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/kg · K | $v$<br>m <sup>3</sup> /kg        | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/kg · K |  |
|------------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|------------------|----------------------------------|--------------|--------------|------------------|--|
| $P = 0.01 \text{ MPa (45.81°C)}^*$ |                           |              |              |                  | $P = 0.05 \text{ MPa (81.32°C)}$ |              |              |                  |  |
| Sat. <sup>†</sup>                  | 14.670                    | 2437.2       | 2583.9       | 8.1488           | 3.2403                           | 2483.2       | 2645.2       | 7.5931           |  |
| 50                                 | 14.867                    | 2443.3       | 2592.0       | 8.1741           |                                  |              |              |                  |  |
| 100                                | 17.196                    | 2515.5       | 2687.5       | 8.4489           | 3.4187                           | 2511.5       | 2682.4       | 7.6953           |  |
| 150                                | 19.513                    | 2587.9       | 2783.0       | 8.6893           | 3.8897                           | 2585.7       | 2780.2       | 7.9413           |  |
| 200                                | 21.826                    | 2661.4       | 2879.6       | 8.9049           | 4.3562                           | 2660.0       | 2877.8       | 8.1592           |  |
| 250                                | 24.136                    | 2736.1       | 2977.5       | 9.1015           | 4.8206                           | 2735.1       | 2976.2       | 8.3568           |  |
| 300                                | 26.446                    | 2812.3       | 3076.7       | 9.2827           | 5.2841                           | 2811.6       | 3075.8       | 8.5387           |  |
| 400                                | 31.063                    | 2969.3       | 3280.0       | 9.6094           | 6.2094                           | 2968.9       | 3279.3       | 8.8659           |  |



# PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES

## iv) liquide comprimé

- **P & T indépendantes**
- **$P > P_{\text{sat}}$  pour une T donnée**
- **$T < T_{\text{sat}}$  pour une P donnée**
- **$v < v_f$  pour une P ou T donnée**
- **$u < u_f$  pour une P ou T donnée**
- **$h < h_f$  pour une P ou T donnée**
- **$s < s_f$  pour une P ou T donnée**



Pour les propriétés qui sont à la fois dépendantes de **P** et de **T** ( $y = f(P, T)$ ), une interpolation 2-D est parfois nécessaire dans les tables pour  $v$ ,  $u$ ,  $h$ ,  $s$  versus  $P$  et  $T$ .  
(Table semblable à celle pour la vapeur surchauffée.)

Exemple: C & B, tables A-7 pour  $\text{H}_2\text{O}$



# PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES

## Notes pour les liquides comprimés:

- Les données pour les liquides comprimés sont rares, surtout à basses pressions.
- Comme les propriétés des liquides comprimés sont relativement insensibles à la pression, on peut faire l'approximation:

$$y(P, T) \approx y_f(T)$$

- Pour l'enthalpie ( $y=h$ ), on ne peut utiliser l'approximation précédente car  $h=u+Pv$ . Alternativement, on peut approximer  $h$  avec:

$$h(P, T) \approx h_f(T) + v_f(T) * (P - P_{sat}(T))$$

## **Note pour les propriétés thermodynamiques en général:**

- $u$ ,  $h$ ,  $s$  sont des propriétés dont la valeur est donnée par rapport à une référence (seules les différences  $\Delta u$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta s$  sont significatives).
- Cette référence peut changer d'une table à l'autre. Il faut donc faire attention si on utilise des tables de sources différentes.



# QUESTION CONCEPTUELLE

## CHANGEMENT DE PHASE

Quelle est la phase de l'eau à une pression de 500 kPa si elle a une enthalpie de 640.090 kJ/kg?

- A. Liquide comprimé
- B. Mélange saturé
- C. Liquide saturé
- D. Vapeur surchauffée

**TABLE A-5**

| $P$ kPa | $T_{\text{sat}}$ °C | $v_f$    | $v_g$   | $u_f$  | $u_{fg}$ | $u_g$  | $h_f$  | $h_{fg}$ | $h_g$  | $s_f$  | $s_{fg}$ | $s_g$  |
|---------|---------------------|----------|---------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|
| 450     | 147.90              | 0.001088 | 0.41392 | 622.65 | 1934.5   | 2557.1 | 623.14 | 2120.3   | 2743.4 | 1.8205 | 5.0356   | 6.8561 |
| 500     | 151.83              | 0.001093 | 0.37483 | 639.54 | 1921.2   | 2560.7 | 640.09 | 2108.0   | 2748.1 | 1.8604 | 4.9603   | 6.8207 |
| 550     | 155.46              | 0.001097 | 0.34261 | 655.16 | 1908.8   | 2563.9 | 655.77 | 2096.6   | 2752.4 | 1.8970 | 4.8916   | 6.7886 |

**TABLE A-6**

Superheated water

| $T$<br>°C                         | $v$<br>m <sup>3</sup> /kg | $u$<br>kJ/kg | $h$<br>kJ/kg | $s$<br>kJ/kg · K |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|------------------|
| $P = 0.50 \text{ MPa (151.83°C)}$ |                           |              |              |                  |
| 400                               | 0.61731                   | 2963.7       | 3272.4       | 7.7956           |
| 500                               | 0.71095                   | 3129.0       | 3484.5       | 8.0893           |



# QUESTION CONCEPTUELLE

## CHANGEMENT DE PHASE

Un autocuiseur de capacité 19,23 L contient 0,5 kg d'eau à l'état de mélange saturé à la pression de 5 bar. Déterminer le titre du mélange.

- A.  $x = 0.1$
- B.  $x = 0.5$
- C.  $x = 100$
- D.  $x = 0$

TABLE A-5

Saturated water—Pressure table

| Press.,<br>P kPa | Sat.<br>temp.,<br>$T_{sat}$ °C | Specific volume,<br>m <sup>3</sup> /kg |                         | Internal energy,<br>kJ/kg |                    |                         | Enthalpy,<br>kJ/kg       |                    |                         | Entropy,<br>kJ/kg · K    |                    |                         |
|------------------|--------------------------------|--|-------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|
|                  |                                | Sat.<br>liquid,<br>$v_f$               | Sat.<br>vapor,<br>$v_g$ | Sat.<br>liquid,<br>$u_f$  | Evap.,<br>$u_{fg}$ | Sat.<br>vapor,<br>$u_g$ | Sat.<br>liquid,<br>$h_f$ | Evap.,<br>$h_{fg}$ | Sat.<br>vapor,<br>$h_g$ | Sat.<br>liquid,<br>$s_f$ | Evap.,<br>$s_{fg}$ | Sat.<br>vapor,<br>$s_g$ |
| 1.0              | 6.97                           | 0.001000                               | 129.19                  | 29.302                    | 2355.2             | 2384.5                  | 29.303                   | 2484.4             | 2513.7                  | 0.1059                   | 8.8690             | 8.9749                  |
| 1.5              | 13.02                          | 0.001001                               | 87.964                  | 54.686                    | 2338.1             | 2392.8                  | 54.688                   | 2470.1             | 2524.7                  | 0.1956                   | 8.6314             | 8.8270                  |
| 2.0              | 17.50                          | 0.001001                               | 66.990                  | 73.431                    | 2325.5             | 2398.9                  | 73.433                   | 2459.5             | 2532.9                  | 0.2606                   | 8.4621             | 8.7227                  |
| 2.5              | 21.08                          | 0.001002                               | 54.242                  | 88.422                    | 2315.4             | 2403.8                  | 88.424                   | 2451.0             | 2539.4                  | 0.3118                   | 8.3302             | 8.6421                  |
| 3.0              | 24.08                          | 0.001003                               | 45.654                  | 100.98                    | 2306.9             | 2407.9                  | 100.98                   | 2443.9             | 2544.8                  | 0.3543                   | 8.2222             | 8.5765                  |
| 4.0              | 28.96                          | 0.001004                               | 34.791                  | 121.39                    | 2293.1             | 2414.5                  | 121.39                   | 2432.3             | 2553.7                  | 0.4224                   | 8.0510             | 8.4734                  |
| 5.0              | 32.87                          | 0.001005                               | 28.185                  | 137.75                    | 2282.1             | 2419.8                  | 137.75                   | 2423.0             | 2560.7                  | 0.4762                   | 7.9176             | 8.3938                  |
| 7.5              | 40.29                          | 0.001008                               | 19.233                  | 168.74                    | 2261.1             | 2429.8                  | 168.75                   | 2405.3             | 2574.0                  | 0.5763                   | 7.6738             | 8.2501                  |
| 10               | 45.81                          | 0.001010                               | 14.670                  | 191.79                    | 2245.4             | 2437.2                  | 191.81                   | 2392.1             | 2583.9                  | 0.6492                   | 7.4996             | 8.1488                  |
| 15               | 53.97                          | 0.001014                               | 10.020                  | 225.93                    | 2222.1             | 2448.0                  | 225.94                   | 2372.3             | 2598.3                  | 0.7549                   | 7.2522             | 8.0071                  |
| 300              | 133.52                         | 0.001073                               | 0.60582                 | 561.11                    | 1982.1             | 2543.2                  | 561.43                   | 2163.5             | 2724.9                  | 1.6717                   | 5.3200             | 6.9917                  |
| 325              | 136.27                         | 0.001076                               | 0.56199                 | 572.84                    | 1973.1             | 2545.9                  | 573.19                   | 2155.4             | 2728.6                  | 1.7005                   | 5.2645             | 6.9650                  |
| 350              | 138.86                         | 0.001079                               | 0.52422                 | 583.89                    | 1964.6             | 2548.5                  | 584.26                   | 2147.7             | 2732.0                  | 1.7274                   | 5.2128             | 6.9402                  |
| 375              | 141.30                         | 0.001081                               | 0.49133                 | 594.32                    | 1956.6             | 2550.9                  | 594.73                   | 2140.4             | 2735.1                  | 1.7526                   | 5.1645             | 6.9171                  |
| 400              | 143.61                         | 0.001084                               | 0.46242                 | 604.22                    | 1948.9             | 2553.1                  | 604.66                   | 2133.4             | 2738.1                  | 1.7765                   | 5.1191             | 6.8955                  |
| 450              | 147.90                         | 0.001088                               | 0.41392                 | 622.65                    | 1934.5             | 2557.1                  | 623.14                   | 2120.3             | 2743.4                  | 1.8205                   | 5.0356             | 6.8561                  |
| 500              | 151.83                         | 0.001093                               | 0.37483                 | 639.54                    | 1921.2             | 2560.7                  | 640.09                   | 2108.0             | 2748.1                  | 1.8604                   | 4.9603             | 6.8207                  |
| 550              | 155.46                         | 0.001097                               | 0.34261                 | 655.16                    | 1908.8             | 2563.9                  | 655.77                   | 2096.6             | 2752.4                  | 1.8970                   | 4.8916             | 6.7886                  |
| 600              | 158.83                         | 0.001101                               | 0.31560                 | 669.72                    | 1897.1             | 2566.8                  | 670.38                   | 2085.8             | 2756.2                  | 1.9308                   | 4.8285             | 6.7593                  |
| 650              | 161.98                         | 0.001104                               | 0.29260                 | 683.37                    | 1886.1             | 2569.4                  | 684.08                   | 2075.5             | 2759.6                  | 1.9623                   | 4.7699             | 6.7322                  |
| 700              | 164.95                         | 0.001108                               | 0.27278                 | 696.23                    | 1875.6             | 2571.8                  | 697.00                   | 2065.8             | 2762.8                  | 1.9918                   | 4.7153             | 6.7071                  |
| 750              | 167.75                         | 0.001111                               | 0.25552                 | 708.40                    | 1865.6             | 2574.0                  | 709.24                   | 2056.4             | 2765.7                  | 2.0195                   | 4.6642             | 6.6837                  |



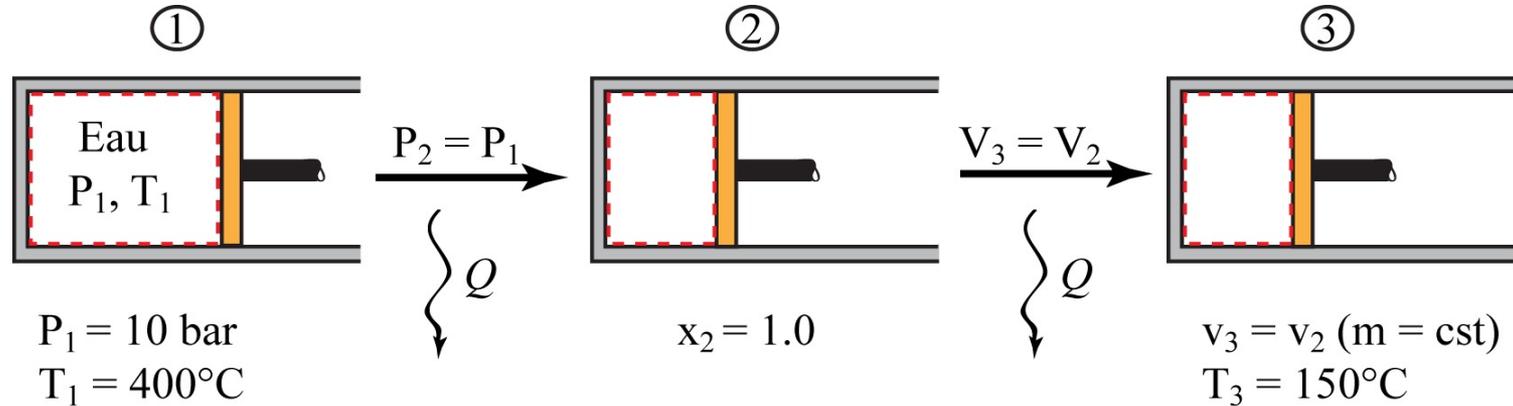
# EXEMPLE #5 – PHASE ET PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES

Trouver la phase et les propriétés pour de l'eau aux conditions suivantes:

- A.  $P = 300 \text{ kPa}$ ,  $x = 0.4$ . **Trouver  $T$ ,  $u$  et phase.**
- B.  $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $u = 1800 \text{ kJ/kg}$ . **Trouver  $P$ ,  $x$  et phase.**
- C.  $P = 4000 \text{ kPa}$ ,  $u = 3040 \text{ kJ/kg}$ . **Trouver  $T$ ,  $x$  et phase.**
- D.  $T = 125^\circ\text{C}$ ,  $P = 750 \text{ kPa}$ . **Trouver  $v$ ,  $x$  et phase.**
- E.  $P = 1000 \text{ kPa}$ ,  $x = 1.0$ . **Trouver  $T$ ,  $h$  et phase.**



# EXEMPLE #6 – EAU DANS UN CYLINDRE ET PISTON

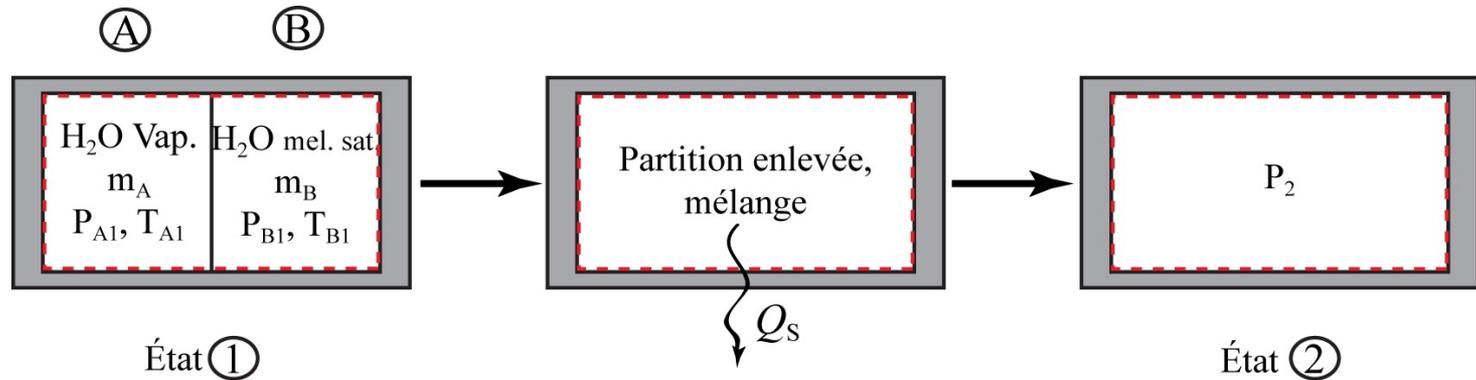


## Questions:

- Montrez l'évolution thermodynamique du contenu du cylindre sur les diagrammes T-v et P-v.
- Trouvez le travail spécifique net du système entre les états 1 et 3,  $w_{13}$  [kJ/kg].
- Trouvez le transfert de chaleur spécifique net du système entre les états 1 et 3,  $q_{13}$  [kJ/kg].



# EXEMPLE #7 – ÉQUILIBRE MÉLANGE EAU ET VAPEUR D'EAU



## État 1

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| $m_A = 2 \text{ kg}$      | $m_B = 3 \text{ kg}$      |
| $P_{A1} = 1 \text{ MPa}$  | $x_{B1} = 0.5$            |
| $T_{A1} = 300 \text{ °C}$ | $T_{B1} = 150 \text{ °C}$ |

## État 2

$$P_2 = 300 \text{ kPa}$$

### Questions:

- $T_2, x_2?$
- $Q_s?$

**Source:** CB&L, problème 4.31 (4.36 dans CB&L, 1ère éd., 4-42 dans C&B, 6ème éd.)



# 4) GAZ PARFAITS

## a) Équations d'état

- L'équation relie P,v & T (ou d'autres propriétés) pour une substance.
- Plusieurs équations d'état existent, du simple au complexe, pour différentes substances et valides dans différentes régions de la surface P-v-T.
- En l'absence d'équation d'état, on utilise les tables comme dans la section précédente.

L'équation d'état la plus simple est l'équation de gaz parfait:

$$\boxed{PV=NR_uT} \quad \text{où } N : \text{nombre de moles du gaz}$$
$$R_u : \text{constante universelle de gaz (8.31447 KJ/kmol}\cdot\text{K)}$$

- Un gaz parfait est un gaz imaginaire qui obéit cette relation. Cependant, à basse pression et haute température (donc basse densité) beaucoup de gaz familiers à basse masse molaire (air, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, He, Ar, ...) peuvent être approximés par un gaz parfait.
- Pour les gaz plus lourds ou dans des régions de P et T où la densité est haute, on devrait utiliser les tables.
- Exemples pour lesquels on ne peut pas utiliser l'équation des gaz parfaits:
  - Réfrigérant (molécule lourde)
  - Vapeur d'eau à haute P dans une centrale thermique (haute densité)



# ÉQUATION D'ÉTAT

Autres formes de l'équation de gaz parfait:

$$PV = NM \frac{R_u}{M} T \quad \text{où } M = \text{masse molaire du gaz}$$

$$\boxed{PV = mRT} \quad \text{où } m = NM = \text{masse du gaz}$$

$$R \equiv \frac{R_u}{M} = \text{constante du gaz (différente pour chaque gaz)}$$

$$\boxed{Pv = RT} \quad \text{où } v = \frac{V}{m} = \text{volume spécifique}$$

$$\boxed{P = \rho RT} \quad \text{où } \rho = \frac{1}{v} = \text{densité}$$

b)  $u$ ,  $h$ ,  $c_v$  et  $c_p$  pour un gaz parfait

i) Énergie interne ( $u$ ): pour un gaz parfait, on peut démontrer analytiquement et expérimentalement que l'énergie interne est seulement fonction de la température

$$\boxed{u = u(T)}$$



# $u, h, c_v$ ET $c_p$ POUR UN GAZ PARFAIT

ii) Enthalpie ( $h$ ):  $h = u + Pv \rightarrow Pv = RT$

$$h = u + RT \rightarrow u = u(T)$$

$$h = h(T)$$

iii) Chaleurs massiques ( $c_v, c_p$ )

$$c_v \equiv \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v \stackrel{u=u(T)}{=} \frac{du}{dT} = c_v(T)$$

$$c_p \equiv \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p \stackrel{h=h(T)}{=} \frac{dh}{dT} = c_p(T)$$

donc, pour un changement d'état:  $du = c_v dT \rightarrow \Delta u = u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT$

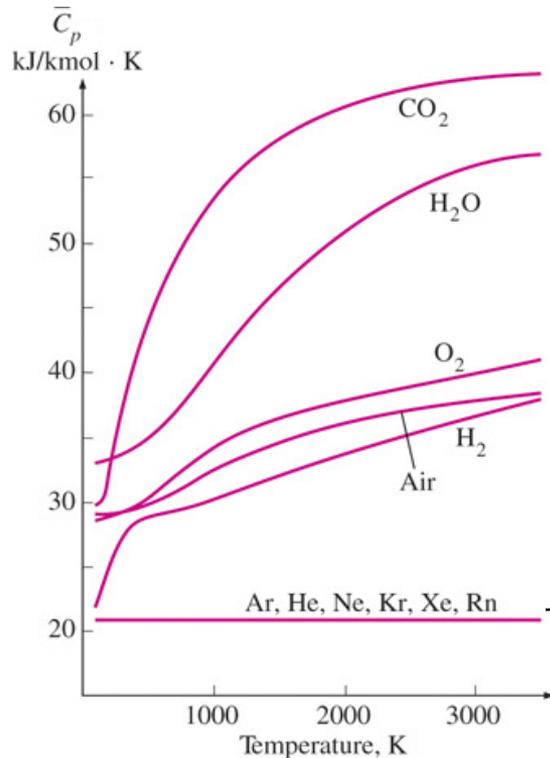
$$dh = c_p dT \rightarrow \Delta h = h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT$$

Notez que ces deux relations s'appliquent pour *toute évolution de gaz parfait*, pas juste pour celles à  $v$  ou  $P$  constante.



# $u$ , $h$ , $c_v$ ET $c_p$ POUR UN GAZ PARFAIT

- Pour intégrer et obtenir  $\Delta u$  et  $\Delta h$ , il faut en principe connaître les fonctions  $c_v(T)$  et  $c_p(T)$ .
- Pour les gaz sous des conditions (P basse, T haute) qui permettent de les approximer par un gaz parfait, voici la variation de  $c_p$  avec  $T$  :



Note: on verra plus loin que  $c_v = c_p - R$

→ gaz monoatomiques



# $u, h, c_v$ ET $c_p$ POUR UN GAZ PARFAIT

Pour une évolution d'un gaz parfait, on peut trouver  $\Delta u$  et  $\Delta h$ , par trois méthodes:

- (1) Utiliser les tables de gaz parfait pour chaque gaz où  $u$  &  $h$  sont obtenues en intégrant, avec les fonctions exactes de  $c_v(T)$  et  $c_p(T)$ :

$$u(T) = \int_{T_{ref}}^T c_v(T) dT$$

$$h(T) = \int_{T_{ref}}^T c_p(T) dT$$

Note:  $T_{ref}$  est la température à un état de référence arbitrairement choisi

Ceci est la méthode la plus exacte.

exemple: C & B table A-19 pour  $O_2$  comme gaz parfait

diviser par masse molaire pour obtenir  $u$  et  $h$

état de référence →

**TABLE A-19**  
Ideal-gas properties of oxygen,  $O_2$

| $T$<br>K | $\bar{h}$<br>kJ/kmol | $\bar{u}$<br>kJ/kmol | $\bar{s}^\circ$<br>kJ/kmol · K |
|----------|----------------------|----------------------|--------------------------------|
| 0        | 0                    | 0                    | 0                              |
| 220      | 6,404                | 4,575                | 196.171                        |
| 230      | 6,694                | 4,782                | 197.461                        |
| 240      | 6,984                | 4,989                | 198.696                        |
| 250      | 7,275                | 5,197                | 199.885                        |
| 260      | 7,566                | 5,405                | 201.027                        |
| 270      | 7,858                | 5,613                | 202.128                        |
| 280      | 8,150                | 5,822                | 203.191                        |
| 290      | 8,443                | 6,032                | 204.218                        |
| 298      | 8,682                | 6,203                | 205.033                        |
| 300      | 8,736                | 6,242                | 205.213                        |



# $u, h, c_v$ ET $c_p$ POUR UN GAZ PARFAIT

(2) Utiliser les relations données pour  $c_v(T)$  et  $c_p(T)$  et intégrer (souvent numériquement avec un ordinateur). Ces relations peuvent être données sous forme de:

- tables: par exemple C & B, table A-2b

TABLE A-2

Ideal-gas specific heats of various common gases  
(b) At various temperatures

| Temperature,<br>K | $c_p$      | $c_v$ | $k$   |
|-------------------|------------|-------|-------|
|                   | kJ/kg · K  |       |       |
|                   | <i>Air</i> |       |       |
| 250               | 1.003      | 0.716 | 1.401 |
| 300               | 1.005      | 0.718 | 1.400 |
| 350               | 1.008      | 0.721 | 1.398 |
| 400               | 1.013      | 0.726 | 1.395 |
| 450               | 1.020      | 0.733 | 1.391 |

- polynomes: par exemple C & B, table A-2c

TABLE A-2

Ideal-gas specific heats of various common gases (Concluded)

(c) As a function of temperature

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

( $T$  in K,  $c_p$  in kJ/kmol · K)

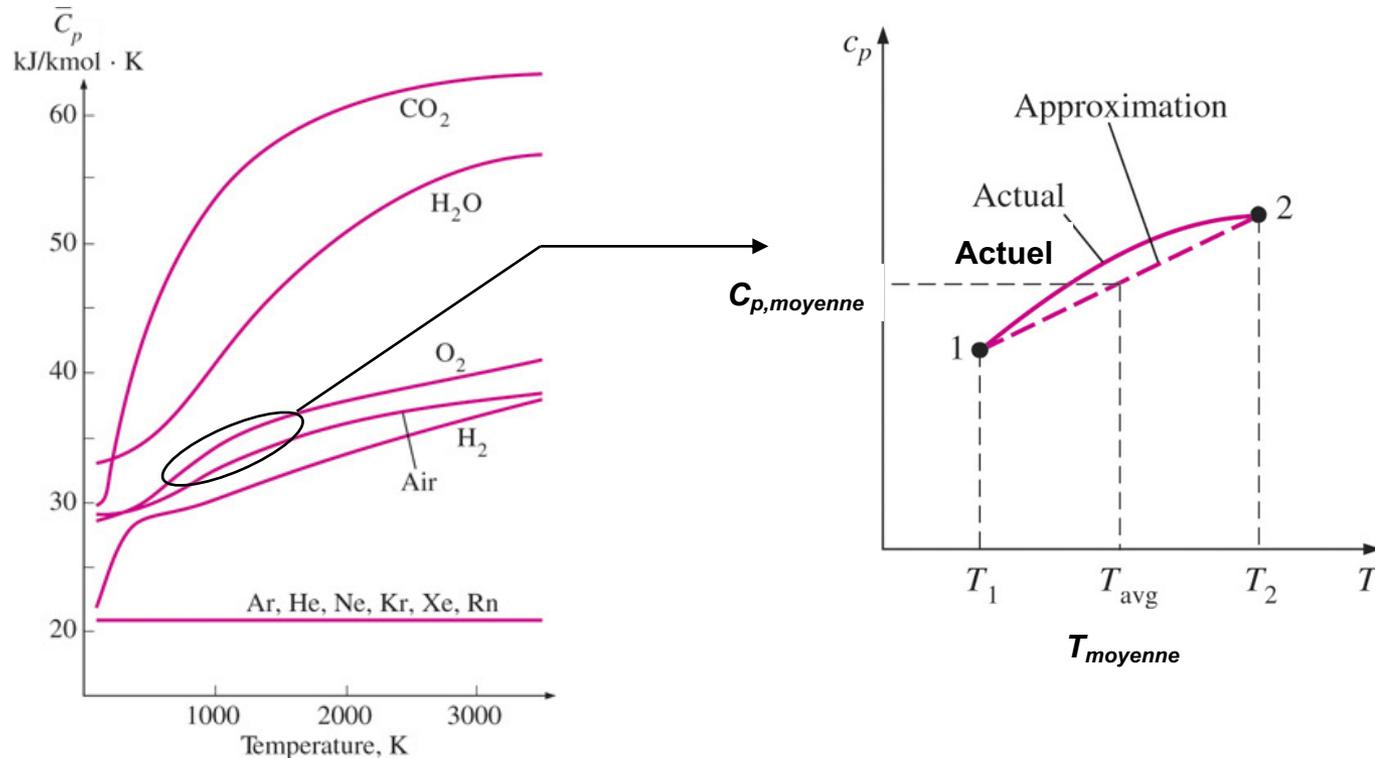
diviser par masse molaire  
pour obtenir  $c_p$   
et  $c_v = c_p - R$

| Substance | Formula        | $a$   | $b$                      | $c$                      | $d$                     | Temperature<br>range, K | % error |      |
|-----------|----------------|-------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|---------|------|
|           |                |       |                          |                          |                         |                         | Max.    | Avg. |
| Nitrogen  | N <sub>2</sub> | 28.90 | $-0.1571 \times 10^{-2}$ | $0.8081 \times 10^{-5}$  | $-2.873 \times 10^{-9}$ | 273-1800                | 0.59    | 0.34 |
| Oxygen    | O <sub>2</sub> | 25.48 | $1.520 \times 10^{-2}$   | $-0.7155 \times 10^{-5}$ | $1.312 \times 10^{-9}$  | 273-1800                | 1.19    | 0.28 |
| Air       | —              | 28.11 | $0.1967 \times 10^{-2}$  | $0.4802 \times 10^{-5}$  | $-1.966 \times 10^{-9}$ | 273-1800                | 0.72    | 0.33 |



# $u, h, c_v$ ET $c_p$ POUR UN GAZ PARFAIT

(3) Approximer  $c_v(T)$  ou  $c_p(T)$  par une valeur constante (préférentiellement la moyenne des valeurs évalués à la température initiale et finale) et intégrer:



$$c_{p,moyenne} = \frac{c_p(T_1) + c_p(T_2)}{2} \rightarrow \Delta h \approx c_{p,moyenne} (T_2 - T_1)$$

$$c_{v,moyenne} = \frac{c_v(T_1) + c_v(T_2)}{2} \rightarrow \Delta u \approx c_{v,moyenne} (T_2 - T_1)$$



# $u, h, c_v$ ET $c_p$ POUR UN GAZ PARFAIT

iv) Relation entre  $R, c_v, c_p$ :

pour un gaz parfait:  $h(T) = u(T) + RT$

$$\frac{dh}{dT} = \frac{du}{dT} + R$$

$$c_p = c_v + R$$

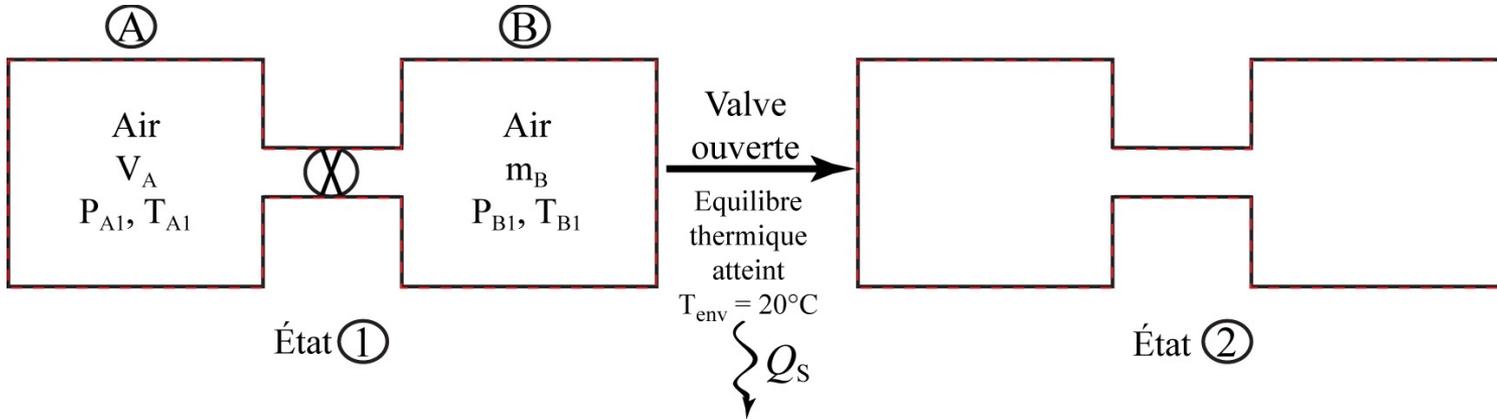
une autre propriété:

$$k \equiv \frac{c_p}{c_v}$$

*'rapport des chaleurs massiques'*



# EXEMPLE #8 – RÉSERVOIR D'AIR SOUS PRESSION



| État 1                               |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $V_A = 1 \text{ m}^3$                | $m_B = 5 \text{ kg}$                 |
| $P_{A1} = 500 \text{ kPa}$           | $P_{B1} = 200 \text{ kPa}$           |
| $T_{A1} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ | $T_{B1} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ |

## Questions:

- $V_B?$
- $P_2?$
- $Q_S?$



Source: CB&L problème 3.63 (3.68 dans CB&L, 1ère éd., 3-80 dans C&B, 6ème éd.)