

PT PHYSIQUE

THERMO 4

**Changement d'état du
corps pur**



$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \text{Zn}^{\text{na}}_{(\text{s})} \text{C}^{\text{na}}_{\text{g}} \pm \text{Zn}^{\text{na}}_{(\text{k})} \text{rot } E$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 & \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} &+ \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{rel}}^{\text{vap}}} \right) &= 0 & \text{in } \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} & \Delta_{\text{r}} G &= \frac{\partial \Delta_{\text{r}} G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \end{aligned}$$

- $(|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$

OBJECTIFS DU CHAPITRE

- À la fin de ce chapitre, vous devez être capable de :
 - nommer un changement d'état de corps pur ;
 - relier les enthalpies et entropies massiques de changement d'état à une température donnée ;
 - expliciter les critères d'équilibre et d'évolution d'un changement d'état à l'aide des potentiels chimiques ;
 - expliciter la règle des moments et l'appliquer aux divers diagrammes de fluides réels ;
 - tracer l'allure des divers diagrammes de fluides réels du programme.

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{z\alpha\beta\gamma} \frac{\partial}{\partial t} \text{Zn}^{z\beta\gamma} \text{C}^{z\beta\gamma} \sum_k b_k^z k^z \text{rot } E$$

$$\underline{H}(j\omega) = d \frac{\sum_k b_k^z k^z}{\sum_j K_j^z} \exp(j\omega)$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$$\oint \vec{S} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{rel}}^{\text{vap}}} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{vap}} = \frac{130,71 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}}{\sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}}$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

$$\Delta_{\text{r}} G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} - \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

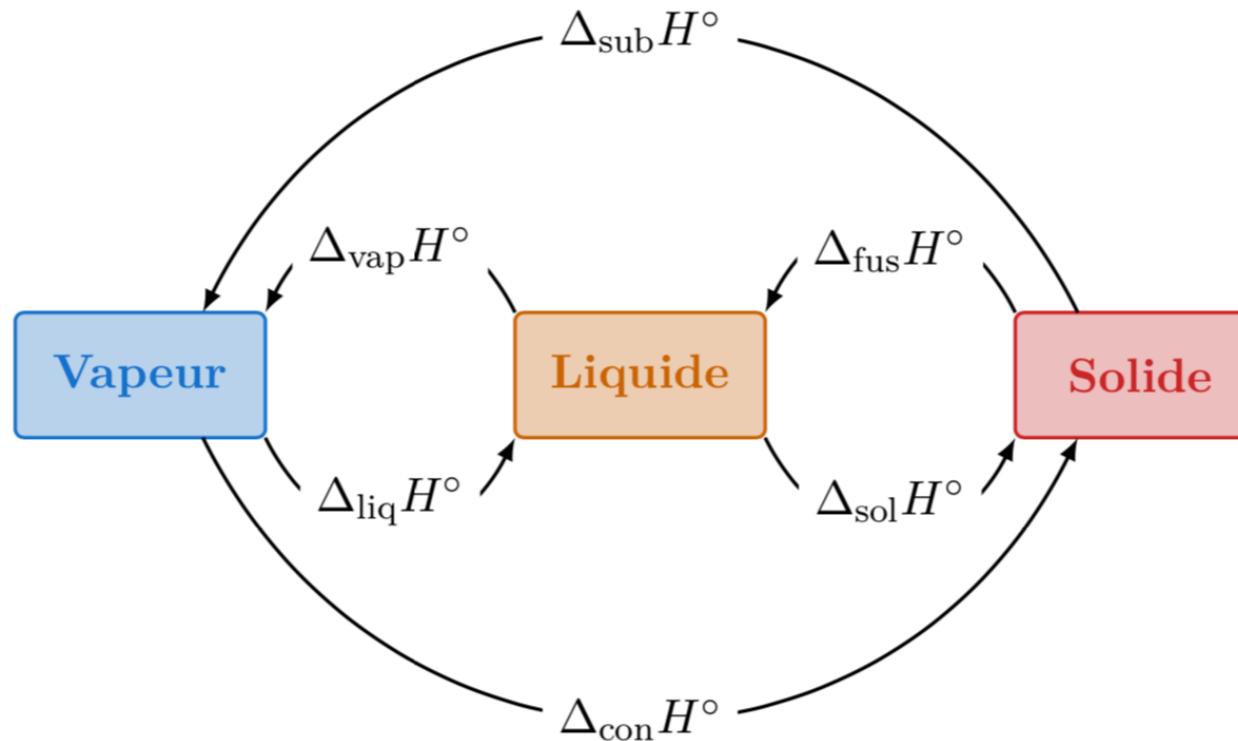
PHASE ET CHANGEMENT D'ÉTAT

Phase

On appelle *phase* un milieu dont les propriétés varient de façon continue dans l'espace. La résolution spatiale permettant de juger de cette continuité est celle de l'échelle mésoscopique.

Changement d'état

On appelle *transition de phase* ou *changement d'état* la transformation thermodynamique conduisant tout ou partie du système thermodynamique à évoluer d'une phase à l'autre.



$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{p} \text{C}^{\text{na}}_{\mathfrak{E}^{(g)}} \pm \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{\sum_k b_k^{\text{na}}} \text{rot } E =$$

$$\underline{H}(\mathbf{j}\omega) = d \frac{\sum_k b_k^{\text{na}}}{\sum_j K_j^{\Delta E}} \exp \frac{\mathbf{f}}{\partial \lambda}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$$\oint \vec{S} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}} H_{\text{ALI}}}{\varepsilon_0} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}} S} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{B}}^{\text{so}} (E_{\oplus}^{\text{so}})} \right) = 0$$

$$\Delta_r H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^\circ$$

$$\Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{G^{\text{so}} - G^{\text{no}}}{2\mu_0} \mathfrak{F}_r H^{\circ} \mu_0 \bar{\varepsilon}_0 \frac{P}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \gamma \omega$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

ENTHALPIE ET ENTROPIE DE CHANGEMENT D'ÉTAT

Enthalpie massique de changement d'état

Lors de la transition de phase $A_\alpha = A_\beta$ du corps pur A, réalisée à la température T , on appelle *enthalpie massique de changement d'état* la grandeur :

$$\Delta_{\alpha \rightarrow \beta} h(T) = h_\beta(T) - h_\alpha(T)$$

avec :

- h_β est l'enthalpie massique de la phase β seule ;
- h_α est l'enthalpie massique de la phase α pure.

Entropie massique de changement d'état

Lors de la transition de phase $A_\alpha = A_\beta$ du corps pur A, réalisée à la température T , on appelle *entropie massique de changement d'état* la grandeur :

$$\Delta_{\alpha \rightarrow \beta} s(T) = s_\beta(T) - s_\alpha(T)$$

avec :

- s_β est l'entropie massique de la phase β seule ;
- s_α est l'entropie massique de la phase α pure.

$$h]_e^{\nu} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{var}} \nabla \cdot \mathbf{Z} \mathbf{n}_{(s)}^{\text{var}} \mathbf{C} \mathbf{B}^{\text{var}} \pm \mathbf{Z} \mathbf{n}_k^{\text{var}} \mathbf{C} \mathbf{B}^{\text{var}} \text{rot } \mathbf{E} =$$

$$\tilde{H}(\mathbf{j}\omega) = d \frac{\sum_k b_k}{\sum_j K_j} \tilde{E} = \exp \frac{d}{\partial \lambda}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{B}}^{\text{var}} (B_{\text{2(g)}})} \right) = 0$$

$$\Delta_r G = \frac{\partial \Delta E}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{G_{T_{\text{2(g)}}} - G_{T_{\text{1}}} - \Delta_r H}{2\mu_0} \vec{J}_r H \mu_0 \bar{\varepsilon}_0 \vec{P}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

APPORT ÉNERGÉTIQUE ET ENTROPIQUE D'UN CHANGEMENT D'ÉTAT

Enthalpie massique de changement d'état & énergie thermique massique

Lors de la transition de phase $A_\alpha = A_\beta$ du corps pur A, réalisée à la température $T_{\alpha \rightarrow \beta}$, l'énergie par unité de masse q nécessaire pour réaliser le changement d'état de façon réversible est :

$$q = \frac{Q}{m} = \Delta_{\alpha \rightarrow \beta} h$$

Lien entre enthalpie et entropie massiques de changement d'état

Lors de la transition de phase $A_\alpha = A_\beta$ du corps pur A, réalisée à la température $T_{\alpha \rightarrow \beta}$, l'enthalpie et l'entropie massique de changement d'état sont de même signe et liés par la relation :

$$\Delta_{\alpha \rightarrow \beta} s = \frac{\Delta_{\alpha \rightarrow \beta} h}{T_{\alpha \rightarrow \beta}}$$

$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}}_{\text{Zn}} \pm \text{Zn}^{\text{na}} \text{rot } E =$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}}}}{\Delta_{\text{vap}}^S} = \frac{T_{\text{vap}}}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{j}{\lambda_0} \right) = \varphi_0^F \left(\frac{E \wedge \vec{B}}{\mu_0^S} \right) = 0$$

$$\Delta_r G = \frac{\partial \Delta G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \gamma \omega \left[\frac{1}{2} v^2 + g z + \right]$$

EXERCICE D'APPLICATION I

On donne ci-dessous le diagramme $(\log P, h)$ de l'eau, dans lequel on s'intéresse à la courbe isotherme qui est confondue avec l'isobare $P = 1$ bar dans la zone d'équilibre $\text{L} \rightleftharpoons \text{V}$.

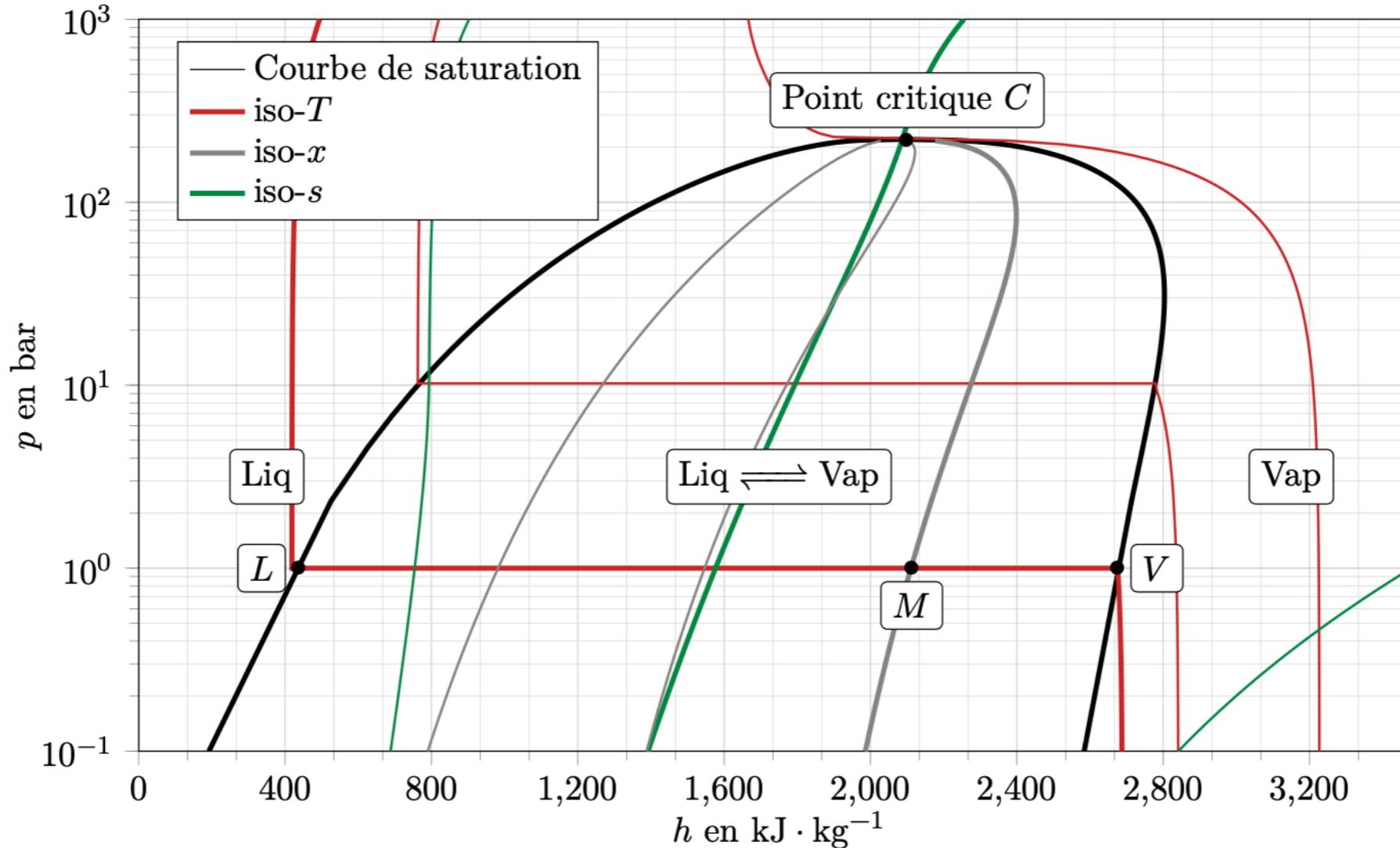


Fig. 4.1 – Diagramme des frigoristes de l'eau

- Quelle est la valeur de la température de cette courbe isotherme ?
- Déduire du diagramme la valeur de l'enthalpie massique de liquéfaction $\Delta_{\text{liq}} h$.
- En déduire la valeur de $\Delta_{\text{liq}} s$.

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{p} \text{C}^{\text{na}}_{\text{Zn}} \pm \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{k} \text{rot } E =$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^{\circ}} \right) = 0$$

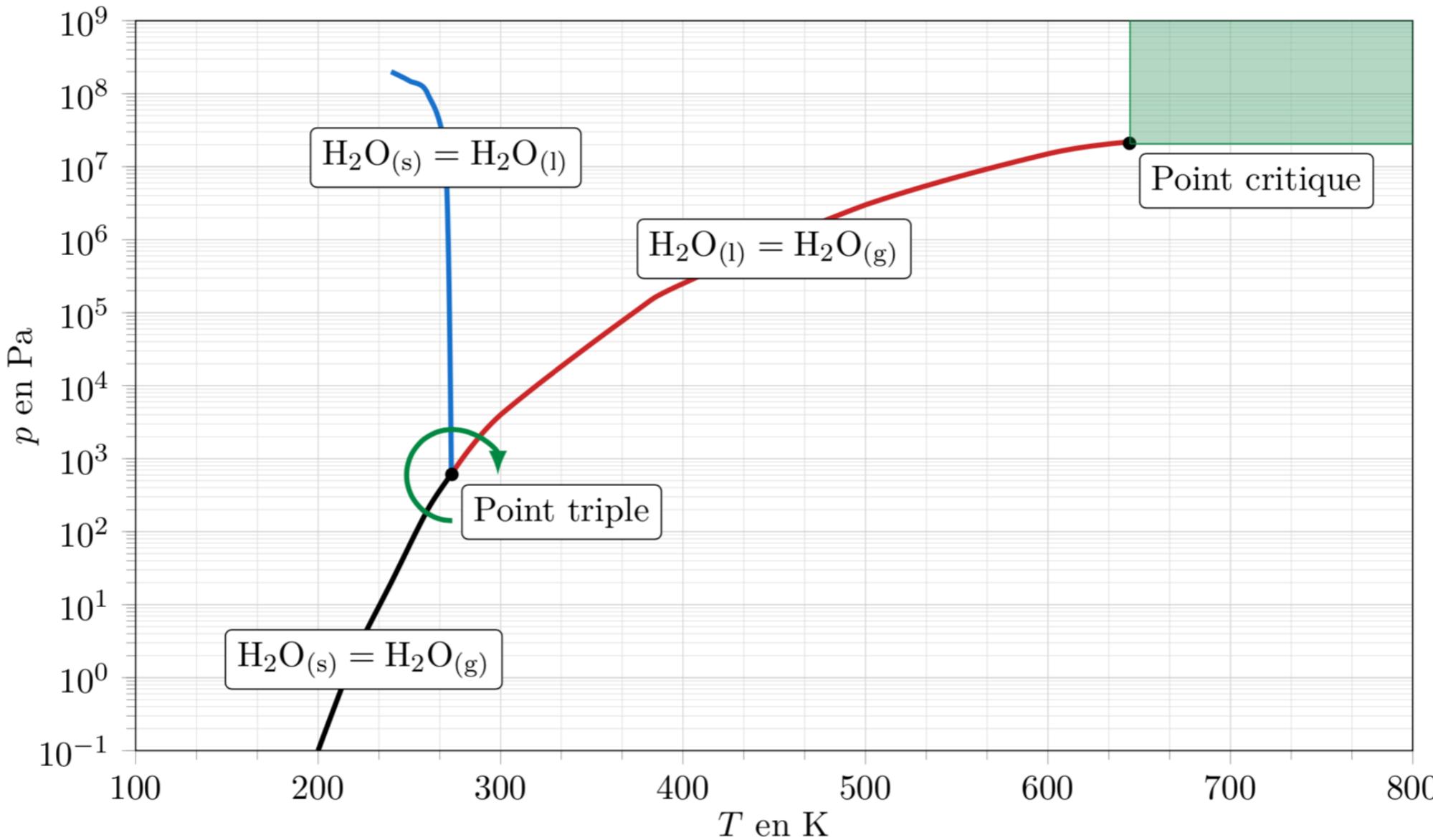
$$\Delta_{\text{vap}} = \frac{\Delta_{\text{vap}}}{T_{\text{vap}}}$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

$$\Delta_{\text{r}} G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial H}{\partial \mu_0} \Big|_{\varepsilon_0} \frac{\partial P}{\partial \omega} \Big|_{\frac{1}{2} v^2 + gz + \dots}$$

$$- (|\eta_{\text{Ox}}(i)| + |\eta_{\text{Red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

VARIANCE ET DIAGRAMME (P, T) DE L'EAU



$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \frac{\text{Cu}^{\text{na}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{Zn^{\text{na}}}{(s)^{\text{na}}} \cdot \frac{C_{\text{g}}^{\text{na}}}{\sum_k b_k^{\text{na}}} \cdot \frac{Zn^{\text{na}}}{k}}{\sum_j K_{\Delta E}^j \cdot \exp \left(\frac{-\Delta E^j}{kT} \right)}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}} S} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{B}}^{\text{vap}}} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{vap}} S = \frac{130,7 \cdot 10^{-3} \cdot \text{mol}^{-1}}{\Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}}$$

$$\Delta_{\text{vap}} S = \sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}$$

$$(\eta_{\text{ox}}(i) + \eta_{\text{red}}(i)) \mathcal{E} V_{ri}$$

CRITÈRE D'ÉQUILIBRE ET D'ÉVOLUTION D'UN CORPS PUR SOUS DEUX PHASES

Critère d'évolution d'un corps pur diphasé

Un système composé d'un corps pur A diphasé, hors équilibre, évolue jusqu'à la disparition totale de sa phase de potentiel chimique μ le plus élevé.

Critère d'équilibre d'un corps pur diphasé

Un système composé d'un corps pur A diphasé, est à l'équilibre, si et seulement si le potentiel chimique μ de chaque phase est de valeur identique.

Cet équilibre est alors possible quelles que soient les proportions des deux phases.

$$h|_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \text{Zn}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \text{C}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \text{Zn}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \text{rot } E$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 \\ \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} + \vec{j} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right) &= 0 \\ \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} + \vec{j} \cdot \vec{E} + \varphi_0^F (E_{\oplus}^{\circ})^2 \frac{\mu_0^{\circ}}{B_{\oplus}^{\circ}} &= 0 \\ \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} + \vec{j} \cdot \vec{E} + \varphi_0^F (E_{\oplus}^{\circ})^2 \frac{\mu_0^{\circ}}{B_{\oplus}^{\circ}} &= 0 \\ \Delta_{\text{vap}} S &= \frac{\Delta_{\text{vap}} H}{T_{\text{vap}}} \\ \lambda_0 \vec{j} &= \gamma \vec{E} \\ \Delta_{\text{r}} G &= \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial \xi}{\partial \mu_0} \frac{\partial \mu_0}{\partial \varepsilon_0} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial \omega} \Big|_{P,T} \\ -(|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} &= \end{aligned}$$

EXERCICE D'APPLICATION 2

On donne les enthalpies libres massiques du carbone graphite g_{gra} et du carbone diamant g_{dia} en fonction de la température et de la pression :

$$\begin{aligned} g_{\text{gar}} &= 32,8 \times 10^6 - 474,5T + 440,5 \times 10^{-6}(P - P^\circ) \\ g_{\text{dia}} &= 32,9 \times 10^6 - 203,2T + 284,7 \times 10^{-6}(P - P^\circ) \end{aligned}$$

où $P^\circ = 1,00 \text{ bar}$.

- Quelle est l'unité du coefficient devant T ? Même question pour le coefficient devant $(P - P^\circ)$?
- Quelle est la variété thermodynamique la plus stable à la pression de $P = P^\circ$ et à la température $T_0 = 298 \text{ K}$? Qu'en concluez-vous?
- Déterminer et tracer la courbe d'équilibre $p = f(T)$ des phases diamant et graphite.
- Identifier les domaines de stabilité du diamant et du graphite.
- La synthèse du diamant est réalisée en portant un mélange de graphite et d'un métal à $T = 1500^\circ\text{C}$. Quelle pression faut-il atteindre pour effectuer cette synthèse?

ÉQUILIBRE LIQUIDE — VAPEUR : DIAGRAMME DE CLAPEYRON

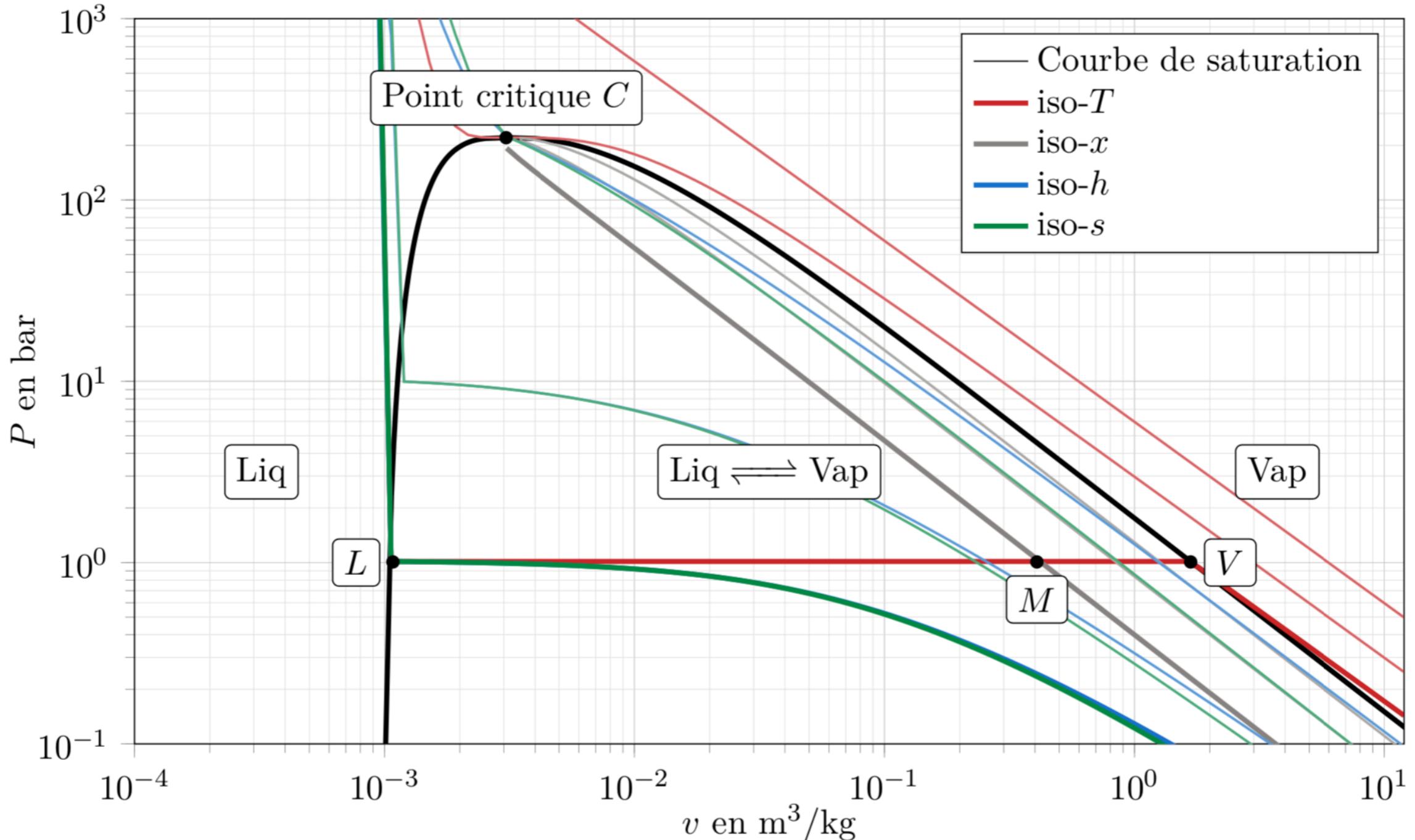


Diagramme de Clapeyron de l'eau

$$\begin{aligned} h\Big|_{e^{\frac{na}{\lambda_0}(\sin i - \sin t)}} &= \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \text{Cu}^{x_{\text{th}}} \mp \text{Zn}_{(\overline{s})}^{\mp} \text{Cn}_{(\overline{0})}^{\pm} \pm \text{Zn}_{\overline{b}}^{x_{\overline{r}}} \cdot \text{rot } E = \\ &\stackrel{p \in \tilde{H}(\text{j}\omega)}{=} d \sum_{\substack{\sum k \\ \sum \underline{k}}} \frac{\text{K}^{\Delta E} \rightarrow}{\text{F}^{\mu} \text{F}^{\omega}} \exp \left(\frac{i}{\hbar} \frac{\partial}{\partial t} \right) \\ \text{div } \vec{\cancel{E}} &= \oint \oint_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{\text{int}} H_{\text{ALI}}}{\varepsilon_0} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}} s} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \text{Ex}_{\text{g}} \\ \frac{\partial}{\partial t} \frac{\vec{E}}{\mu_0^{\omega} \text{F}^{\omega}} \cdot \vec{\cancel{E}} &+ \text{div} \left(\vec{E} \wedge \vec{B} \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \frac{\vec{E}}{\mu_0^{\omega} \text{F}^{\omega}} \cdot \vec{\cancel{E}} &= - \varphi_0^F \left(\text{Ex}_{\text{g}} - \text{Ex}_{\text{c}} \right) \\ \lambda_0 &= \frac{\text{Ex}_{\text{r}}}{\text{Ex}_{\text{g}}} \cdot \frac{\text{Ex}_{\text{g}}}{\text{Ex}_{\text{c}}} = \frac{\text{Ex}_{\text{r}}}{\text{Ex}_{\text{c}}} \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} \\ \Delta_{\text{r}} G &= \frac{1}{\delta} \frac{\partial \vec{G}}{\partial \xi} \vec{B} \frac{\vec{G}}{2\mu_0^2} \vec{\cancel{E}} H^{\circ} \mu_0 \overline{\varepsilon} \frac{\vec{P}}{\vec{\varepsilon}} \\ = (\lvert \eta_{\text{ox}}(i) \rvert &+ \lvert \eta_{\text{red}}^i(i) \rvert) \mathcal{F}_{Vri} \left[\frac{1}{2} v^2 + g z + \right. \end{aligned}$$

ÉQUILIBRE LIQUIDE — VAPEUR : DIAGRAMME DE CLAPEYRON

Allure des modèles limites

On retiendra les relations suivantes :

- Courbes isothermes :
 - Gaz parfait : $Pv = \frac{RT}{M} \Rightarrow \log P = -\log V + \text{cste}$, soit une droite de pente -1 ;
 - Liquide incompressible $v = \text{cste} \Rightarrow \log v = \text{cste}$, soit une droite verticale ;
 - Mélange liquide-vapeur : isotherme et isobare se confondent.
 - Courbes isenthalpes :
 - Gaz parfait : $dh = c_PdT$ et une isenthalpe est également une isotherme ;
 - Liquide incompressible $dh = cdT$ et une isenthalpe est également une isotherme.

- La règle des moments s'écrit :

$$x_{(g)} = \frac{v_M - v_L}{v_G - v_L}$$

ÉQUILIBRE LIQUIDE — VAPEUR : DIAGRAMME ENTROPIQUE

$$\tilde{h}_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \text{Cu}^{\text{na}} \cdot \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{p} \cdot \text{Cn}^{\text{na}} \cdot \sum_k b_k^{\text{na}} \cdot \text{rot } E = \tilde{H}(j\omega) = d \sum_j \underline{K} \underline{\Delta} \underline{E} = \exp \frac{f}{\partial \lambda}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{1}{\lambda_0} \left(\vec{S} M^{\text{vap}} \right)^{\circ} = \varphi^F \left(E_{\oplus}^{\circ} - \mu_{E_{\oplus}}^{\circ} \right)^{\text{vap}} = 0 \quad 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \quad \Delta_r H^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ}$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad \Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{\partial G}{\partial \mu} \Big|_{P,T} = \frac{\partial G}{\partial T} \Big|_{P,\mu} = \frac{\partial H}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{\partial H}{\partial \mu} \Big|_{T,P} = \frac{\partial F}{\partial \xi} \Big|_{T,P} = \frac{\partial F}{\partial \mu} \Big|_{P,T} = \frac{\partial \mathcal{A}}{\partial \xi} \Big|_{T,P} = \frac{\partial \mathcal{A}}{\partial \mu} \Big|_{P,T}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} i$$

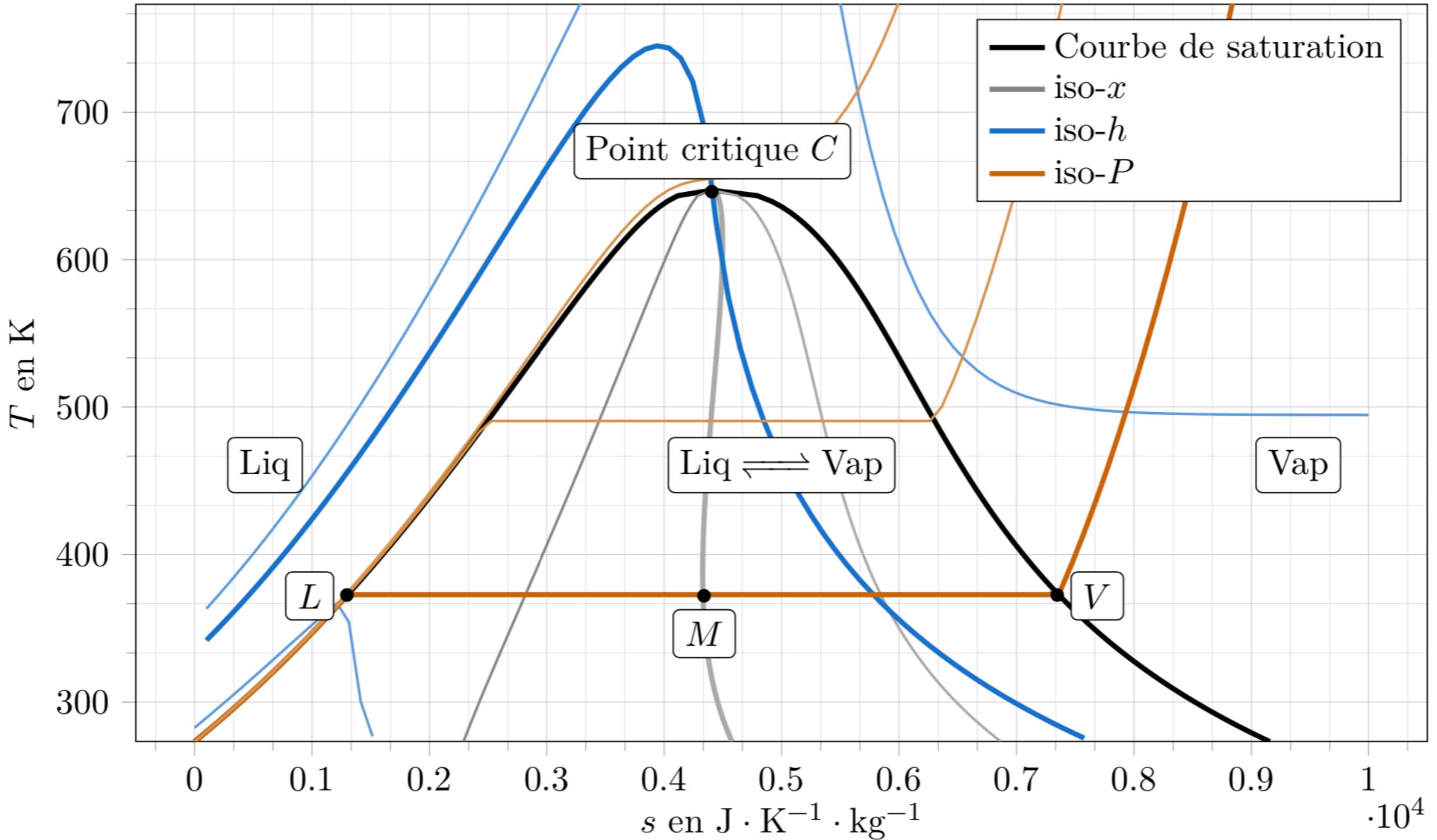


Diagramme entropique de l'eau

$$\begin{aligned}
h_e^{\text{na}} &= \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \text{Cu}^{\text{na}} \cdot \frac{Z}{p} \cdot \frac{Z}{\bar{n}_{(s)}} \cdot \frac{C_{\text{H}}}{\varepsilon_0} \cdot \frac{Z}{b_k} \cdot \frac{Z}{k} \cdot \text{rot } E = \\
&= H(j\omega) = d \sum_j \frac{K}{\Delta E} \exp \left(\frac{j\omega}{\tau_j} \right) \\
\text{div } \vec{j} &= 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\
\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{Q}{j} &= \varphi_0^F (S M)^{\circ} = \varphi_0^F (E_{\oplus}^{\circ} - \mu_{B_{\oplus}}^{\circ}) (B_{2(g)})^{\circ} = 0 \\
\vec{j} &= \gamma \vec{E} \quad \Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{G_{T_{\text{amb}}}}{2\mu_0} \vec{J}_r H^{\circ} \mu_0 \varepsilon_0 \vec{P} \\
&= (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}
\end{aligned}$$

ÉQUILIBRE LIQUIDE — VAPEUR : DIAGRAMME ENTROPIQUE

Allure des modèles limites

On retiendra les relations suivantes :

- Courbes isobares :
 - Gaz parfait : $dh = Tds \Rightarrow T \propto e^{\frac{s}{c_p}}$, soit l'allure d'une exponentielle croissante ;
 - Liquide incompressible : $dh = Tds \Rightarrow T \propto e^{\frac{s}{c}}$, soit l'allure d'une exponentielle croissante ;
 - Mélange liquide-vapeur : les courbes isothermes et isobares se confondent.
- Courbes isenthalpes :
 - Gaz parfait : $dh = c_PdT$ et une isenthalpe est également une isotherme horizontale ;

- La règle des moments s'écrit :

$$x_{(g)} = \frac{s_M - s_L}{s_G - s_L}$$

ÉQUILIBRE LIQUIDE — VAPEUR : DIAGRAMME DE MOLLIER

$$\begin{aligned}
 h_e^{\text{na}} &= \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \text{Cu}^{\text{aux}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \sum_{k=1}^{n_k} \frac{Z_k n_k}{b_k} \cdot \text{rot } E = \\
 H(\omega) &= d \sum_j \frac{K_j}{\Delta E_j} \exp \left(\frac{i \omega}{\Delta E_j} \right) \\
 \operatorname{div} \vec{j} &= \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\
 \frac{1}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} &= \varphi_0^F \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0^{\text{vap}}} \right) = 0 \\
 \Delta_r G &= \frac{\partial \Delta_r G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \xrightarrow{\xi=0} \Delta_r H_i^{\circ} \\
 -(|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} &
 \end{aligned}$$

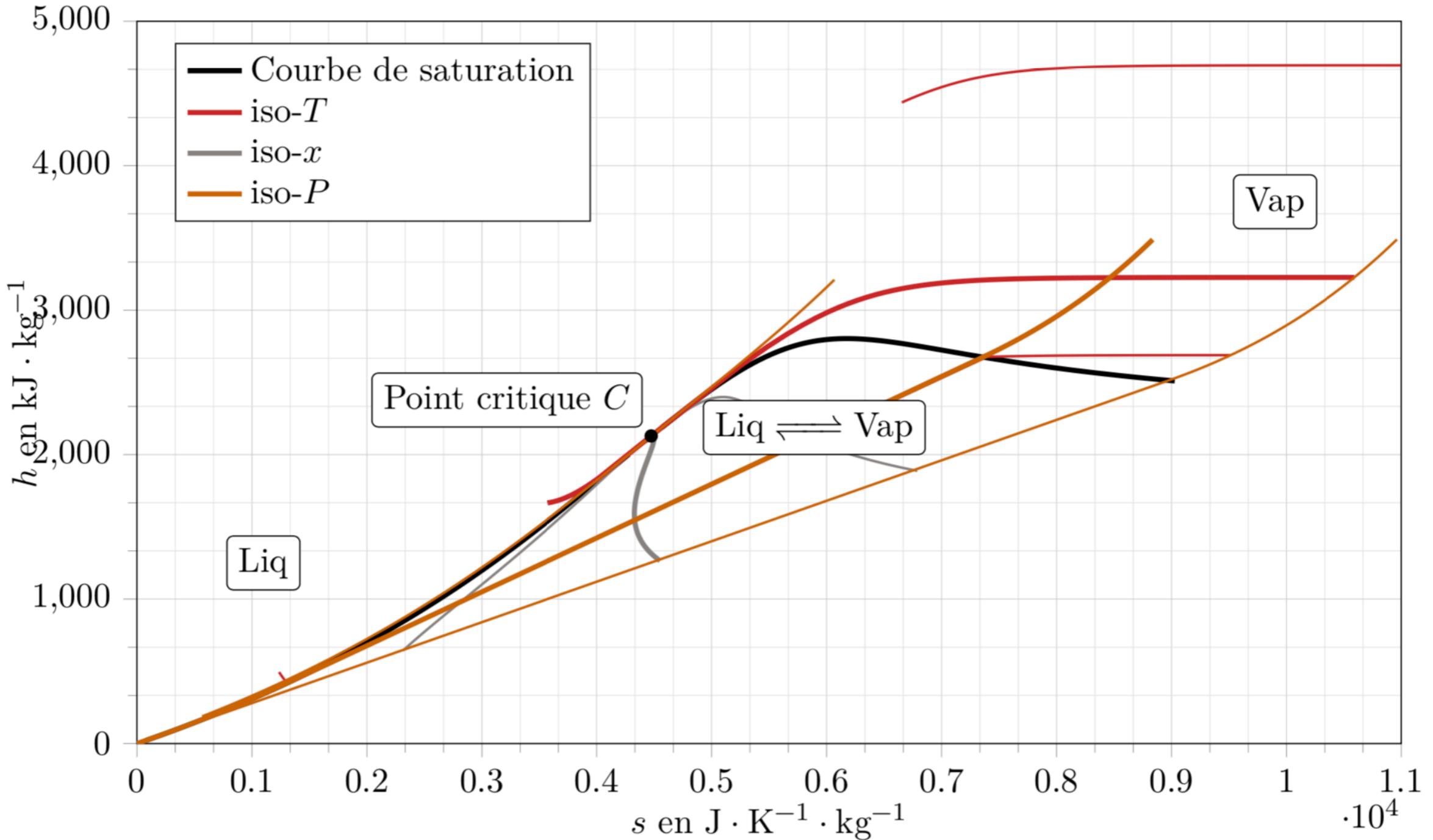


Diagramme de Mollier de l'eau

$$\begin{aligned} h\big|_{e^{\frac{na}{\lambda_0}(\sin i - \sin t)}} &= \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \text{Cu}^{x_{\text{th}}} \mp \text{Zr}_{(\bar{s})}^{\mp \alpha} \text{Cf}_{(0)}^{\pm} \pm \text{Zn}_{\sum_k b_k^{\pm}}^{z_{\text{th}}} \cdot \text{rot } E = \\ &\stackrel{p}{=} \tilde{H}(\text{j}\omega) = d \underbrace{\sum_j \frac{b_j^{\pm}}{k_{\Delta E}^j}}_{\sum_j} \exp \left(\text{j} \omega \frac{\mu_0}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \right) \end{aligned}$$

ÉQUILIBRE LIQUIDE — VAPEUR : DIAGRAMME DE MOLLIER

Allure des modèles limites

On retiendra les relations suivantes :

- Courbes isobares :
 - Gaz parfait : $dh = Tds \Rightarrow T = T_0 e^{\frac{s-s_0}{c_p}} \Rightarrow h(s) = cT_0 \left(e^{\frac{s-s_0}{c_p}} - 1 \right) + h_0$, soit l'allure d'une exponentielle croissante.
 - Courbes isothermes :
 - Gaz parfait : $dh = c_PdT$ et une isotherme est également une isenthalpe horizontale.

ÉQUILIBRE LIQUIDE — VAPEUR : DIAGRAMME DES FRIGORISTES

$$\begin{aligned} h_e^{\text{na}} &= \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \text{Cu}^{\text{aux}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \sum_{p \in \text{C}_e^{\text{aux}}} \frac{Z_n z_k^+}{b_k^0} \cdot \text{rot } E = \\ H(j\omega) &= d \sum_j \frac{K_{\Delta E}}{\Delta E} = \exp \left(\frac{j\omega}{\tau} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^H} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{1}{\lambda_0} \vec{Q} \cdot \vec{j} &= \varphi_0^F (E_{\oplus}^{\circ}) \cdot \mu_{B_{\oplus}}^{\circ} = 0 \quad 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \quad \Delta_r H^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ} \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} \quad \Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{\partial G}{\partial \mu} \Big|_{P,T} = \frac{\partial G}{\partial \mu_0} \Big|_{\varepsilon_0, T} = \frac{1}{2} v^2 + g z + \\ & - (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} \end{aligned}$$

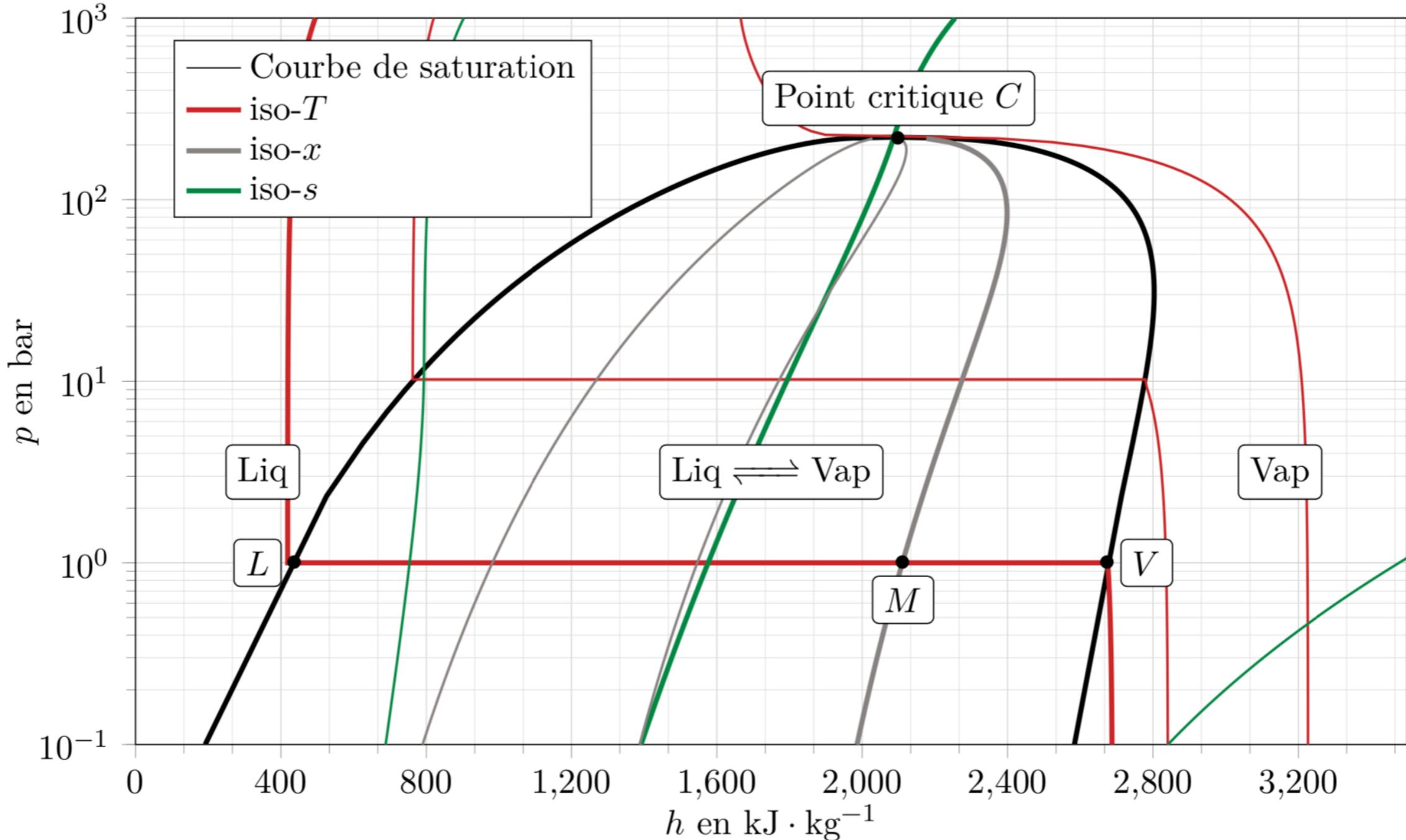


Diagramme des frigoristes de l'eau

$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}}_{\text{g}} \pm \text{Zn}^{\text{na}} \text{rot } E =$$

$$\tilde{H}(j\omega) = d \frac{\sum_k b_k^{\text{na}}}{\sum_j K_j^{\text{na}}} \exp \frac{j\omega}{\tau}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$$\oint \vec{S} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^{\text{na}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^{\text{na}}} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{vap}}^{\text{na}} = \frac{130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}}{\sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}}$$

$$\Delta_{\text{vap}}^{\text{na}} = \frac{130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}}{\sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}}$$

$$(\eta_{\text{ox}}(i) + \eta_{\text{red}}(i)) \mathcal{E} V_{ri}$$

ÉQUILIBRE LIQUIDE — VAPEUR : DIAGRAMME DE CLAPEYRON

Allure des modèles limites

On retiendra les relations suivantes :

- Courbes isothermes :
 - Gaz parfait : $dh = c_p dT$ et une isotherme est une isenthalpe, soit une droite verticale ;
 - Liquide incompressible : $dh = cdT$ et une isotherme est une isenthalpe, soit une droite verticale ;
 - Mélange liquide vapeur : les courbes isothermes se confondent avec les isobares.

- La règle des moments s'écrit :

$$x_{(g)} = \frac{h_M - h_L}{h_G - h_L}$$

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \frac{Zn^{\text{na}}}{\sum_k b_k^{\text{na}}} \frac{\partial \theta^{\text{na}}}{\partial t} \text{rot } E =$$

$$\vec{H}(\mathbf{j}\omega) = d \frac{\sum_k b_k^{\text{na}}}{\sum_j K_j^{\text{na}}} \exp \left(\frac{\mathbf{j}\omega}{\tau} \right)$$

EXERCICE D'APPLICATION 3

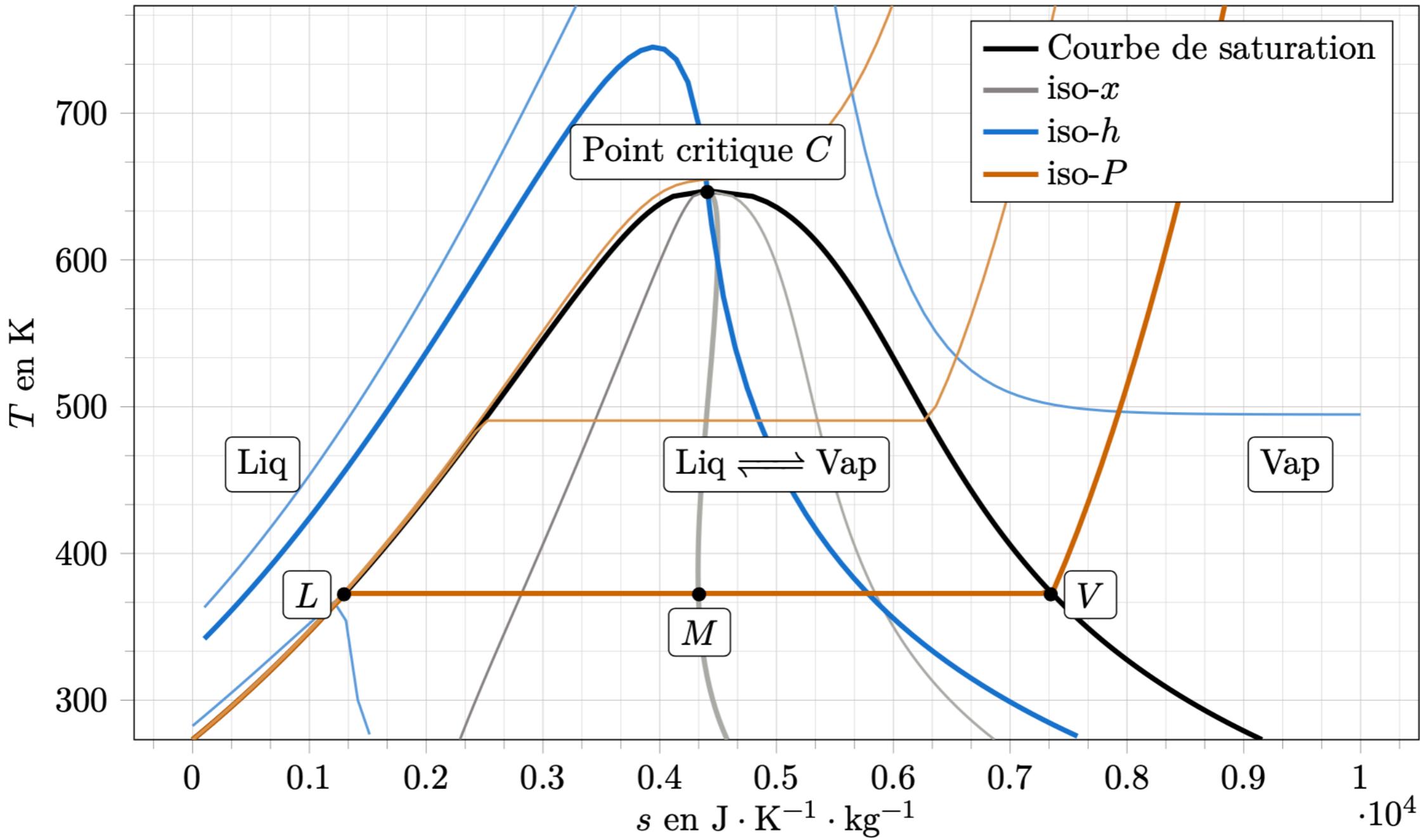


Fig. 4.3 – Diagramme entropique de l'eau

- Pour chacun des diagrammes fournis, déterminer la fraction massique en vapeur du point noté M.