

Transition de phase

Niveau : PC

Pré-requis :

-
-
-

Introduction

L'eau bout à 100°C donc avant elle est en phase liquide et après cette T elle est en phase gazeuse. Il y a donc une transition de phase de l'eau, un changement d'état. L'objectif de la leçon est de comprendre cela.

1. Diagramme et transition de phase

A. Définitions

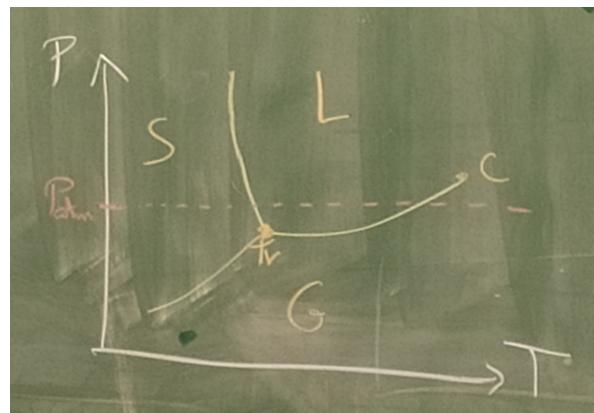
Phase : sous-système où toutes les grandeurs intensives sont continues

Ex: eau dans un verre d'eau

On utilise un diagramme de phase pour étudier les différentes phases.

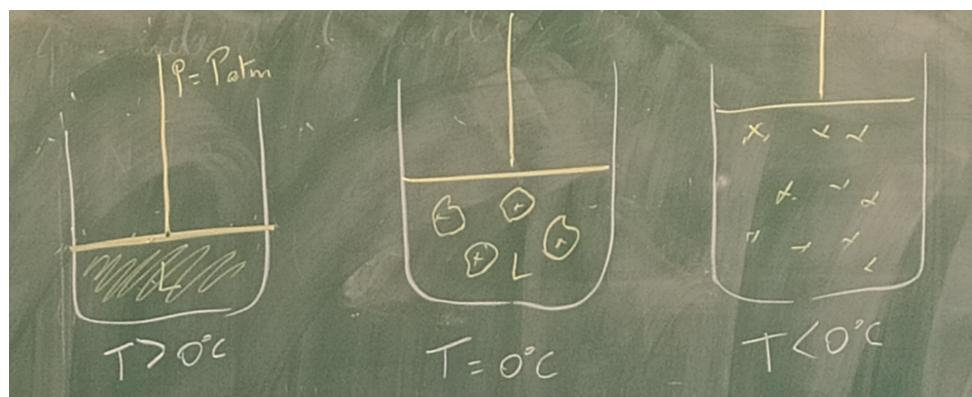
On fait un diagramme de phase (P,T) :

Il y a 3 lignes des transition entre les trois phases de l'eau et 2 points particuliers : le point triple et le point critique. En général toutes les lignes de transition ont une pente positive mais l'eau ici représente un contre-exemple avec la ligne de transition S-L.



Quand on se trouve dans des conditions où on est sur une ligne entre deux états, il y a coexistence de phase.

Exemple avec de l'eau dans un piston :



(Je me positionne à $P=\text{Patm}$ et je me ballade de $T>0^{\circ}\text{C}$ à $T<0^{\circ}\text{C}$. Quand on est sur la ligne de transition S-L à $T=0^{\circ}\text{C}$, il y a coexistence entre les 2 phases)

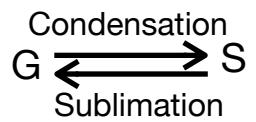
(Attention à augmenter le niveau du piston quand on passe à l'état solide car Volume eau solide > Volume liquide)

On déduit donc que quand on franchit une ligne de transition, il y a transition de phase.

B. Transition de phase par rapport au point triple et au point critique

$P < P_{Tr}$: une transition possible entre le gaz et le solide.

$P > P_{Tr}$: deux transitions possibles (solide \leftrightarrow liquide et liquide \leftrightarrow gaz)

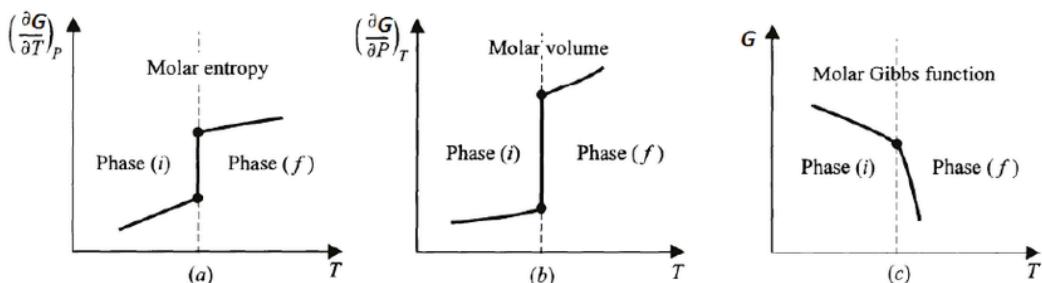


Autour du point critique, on peut avoir une transition de phase en mode continu entre liquide et gaz. On appelle cette phase fluide supercritique. On ne peut plus distinguer un gaz ou un liquide.

Ex : CO₂ superfluide pas toxique : extraire la nicotine du tabac ou la caféine du café.

C. Ordres de transition

1er Ordre	2ème Ordre
<p>L'entropie S et le volume V sont discontinus lors de la transition. Par contre ce n'est pas le cas pour l'enthalpie libre (énergie de Gibbs) G.</p> $dG = -SdT + VdP$ <p>donc les dérivées 1ère sont discontinues</p> $S = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P$ et $V = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T$ $G = H - TS = U + PV - TS$ donc $dG = (\delta Q - pdV) + d(PV) - d(TS)$ et $\delta Q = TdS$	<p>S et V sont continus par contre leurs dérivée ne le sont pas. Donc les dérivées 2nde de G sont discontinues (la capacité thermique, compressibilité isotherme, susceptibilité magnétique)</p> $C_p = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P = -T \left(\frac{\partial^2 G}{\partial T^2} \right)_P$ $\chi_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial P^2} \right)_T$ $\chi = \left(\frac{\partial M}{\partial H} \right)_{T,P} = -\left(\frac{\partial^2 G}{\partial H^2} \right)_{T,P}$
<p>Il y a un transfert d'énergie thermique. Le système soit reçoit soit fournit de l'E lors de la transition (chaleur latente non nulle)</p>	<p>Pas de transfert d'énergie thermique</p>
<p>Ex : Fusion ou vaporisation ou .. $T_{\text{vap azote}} = -196^\circ\text{C}$</p>	<p>Ex : Transition supercritique Transition ferromagnétisme-paramagnétisme $T_{\text{Curie Fer}} = 770^\circ\text{C}$</p>



Les transitions du premier ordre = saut dans les grandeurs physiques (S,V,M,..)

Les transitions du second ordre = tout est lisse au premier niveau, mais instabilité ou singularité au niveau suivant

Dans ces courbes, on remarque la discontinuité de S et V à la T de transition de phase. Lors de la transition de phase, on peut remarquer que T est une constante.

Experience Qualitative : Température de Curie du fer

Ferromagnétique est un matériau qui présente une aimantation permanente. Quand on le chauffe à une température donnée, il devient paramagnétique.

La valeur tabulée est $T_{Curie} = 770^\circ\text{C}$

L'incertitude de la mesure contient le temps de réponse du thermocouple (5°C d'incertitude) et incertitude du thermocouple (0.1% de la valeur affichée + 0.4°C)

Dire aussi que la différence avec la valeur tabulée vient du fait que l'aimant a une propre aimantation et a une masse

2. Transitions du premier ordre

A. Chaleur latente

Enthalpie libre (énergie de Gibbs) : $G = H - TS$

G ne varie pas de manière discontinue donc entre la phase 1 et 2 (à T,P données) :

$$G_1(T_0, P_0) = G_2(T_0, P_0) \Rightarrow \Delta G = 0$$

$$\text{Alors } \Delta H - T\Delta S = 0 \Rightarrow \Delta H = T\Delta S$$

$$\text{Or pour une transformation réversible } \Delta S = Q/T$$

Donc $\Delta H = T\Delta S = Q = L$ où L est appelée chaleur latente.

On peut remarquer que $L_{vap} = -L_{liq}$. C'est aussi le cas pour chaque duo de changement d'état.

Cela vient du fait que $L_{vap} = T(S_{fin} - S_{ini}) = T(S_{gaz} - S_{liq})$ et que $S_{gaz} > S_{liq}$ car un gaz est plus désordonné qu'un liquide, on a que $L_{vap} > 0$. Pour la liquéfaction c'est l'opposé.

Experience : Mesure de la chaleur latente de la vaporisation de l'azote.

$$P = -\frac{dm}{dt} \times L_{vap} \text{ où } P \text{ est la puissance fournie à l'azote liquide}$$

Or la puissance fournie vaut $P = UI + P_f$ avec P_f la puissance de fuite qu'on ne contrôle pas. Pour s'en affranchir, on mesure l'évolution de la masse temporellement pour différentes puissances électriques fournies.

En supposant que P_f est la même pour une T donnée et là on est à même T car "vaporisation" donc on soustrait 2 fonctions affines de P et on a P_f qui disparaît.

Résultats :

$$A_1 = -2.8 \times 10^{-1} \text{ g/s} \quad A_2 = -9.1 \times 10^{-2} \text{ g/s}$$

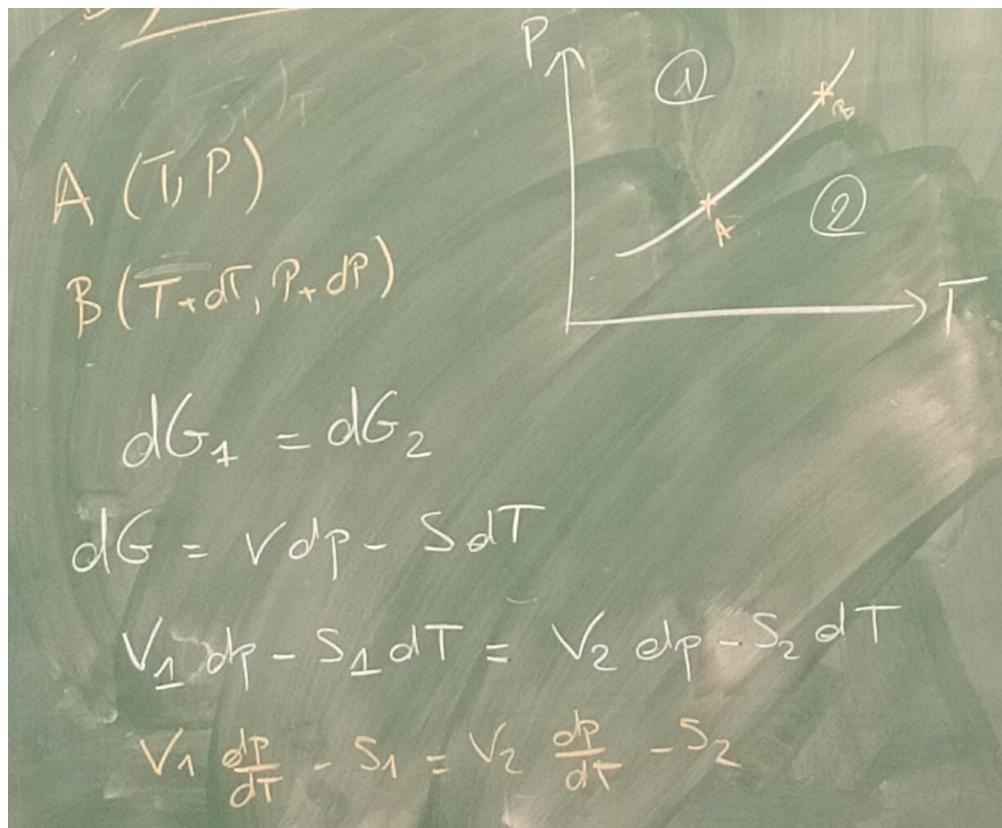
$$P_1 = 5.306 \text{ W} \quad P_2 = 16.81 \text{ W}$$

La chaleur latente s'obtient avec $L_v = \frac{P_1 - P_2}{A_2 - A_1} = 198.06 \text{ kJ/kg}$

La valeur tabulée $L_{tab} = 199.2 \text{ kJ/kg}$ [Calculer incertitude-type et Zscore par Python](#)

B. Relation de Clapeyron

On suppose 2 points A et B sur une ligne de transition entre deux phases 1 et 2.



On trouve $\frac{dP}{dT} = \frac{S_2 - S_1}{V_2 - V_1} = \frac{\Delta S}{\Delta V} \times \frac{T}{T} = \frac{L}{T\Delta V}$ (Relation de Clapeyron)

Cela permet d'expliquer les pentes positives de la majorité des corps car $\Delta S > 0$ et $\Delta V > 0$.

Permet aussi d'expliquer la pente négative pour la transition liquide/solide de l'eau car on a $\Delta S > 0$ mais $\Delta V < 0$.

Conclusion

Fluide de Van Der Walls -> on peut l'utiliser pour ancrer la leçon au niveau PC. On peut calculer l'équation d'une isotherme. Permet de mettre en valeur l'instabilité et le phénomène de surfusion.

Questions

Dans la définition de la phase, est-ce que c'est la même chose "grandeur homogène et continu" ?

Ce n'est pas la même chose. Homogène : invariant dans l'espace. Continu : Pas d'évolution brutale d'une grandeur.

Est-ce qu'on peut parler de phase quand on n'est pas complètement homogène ?

Oui mais il faut qu'elle soit continue. Dans le verre d'eau, la pression n'est pas homogène (car dépend de l'altitude) mais c'est 1 phase.

Pourquoi G est toujours continu que ça soit 1er ou 2nd ordre ?

on ne peut pas avoir deux valeurs différentes de G pour un même T et P, sinon on violerait la condition d'équilibre thermodynamique.

G est une fct d'état donc dépend seulement de l'état (et pas du chemin pour y arriver). C'est aussi le cas pour S U .. mais à l'équilibre, le système se trouve dans l'état qui minimise le potentiel thermodynamique (ici G).

Dans une transition de phase (1er ou 2nd ordre), on passe d'un état A à un état B à même T et même P. Pour que le système soit indifférent à passer de A à B, donc G doit être continu à la transition.

G(T) : il est continu à la transition, mais sa pente (donc S) **change brutalement** →

$$\text{discontinuité de } S \text{ (car } S = - \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P \text{)}$$

Pour déterminer la phase dans laquelle se trouve un corps pur, il nous suffit deux grandeurs intensives. Pourquoi deux suffisent ? Et quand on a plus qu'un corps pur ? Est-ce qu'on a un moyen de savoir combien de grandeurs intensives on a besoin pour connaître le système.

Pour comprendre pourquoi 2 grandeurs intensives suffisent, il faut passer par la règle des phases de Gibbs, qui relie les variables intensives à la variance (le nombre de degrés de liberté du système).

$$V = C - P + 2$$

V = variance (nombre de paramètres intensifs indépendants qu'on peut choisir librement)

C = nombre de composés chimiques distincts

P = nombre de phases en équilibre.

Pour un corps pur, C=1 donc $V = 3 - P$. Si c'est une seule phase présente donc V=2 et

On peut choisir librement 2 grandeurs intensives (par exemple la pression et la température) pour déterminer l'état du système.

S'il y a 2 phases en équilibre (liquide+gaz par exemple), V=1 donc 1 seul ddL alors si on fixe la pression, la température est imposée (Ex: lors de l'ébullition à pression donnée, l'eau bout à une température bien précise).

S'il y a 3 phases donc aucun degré de liberté : la température et la pression sont toutes les deux fixées. Il n'y a qu'un seul point dans le diagramme de phase où les trois phases coexistent (point Triple)

Quelle est la différence entre évaporation, ébullition et vaporisation ?

Vaporisation : terme générale de transition de phase.

Ébullition : type de vaporisation où on chauffe le système.

Évaporation : type de vaporisation où la convection permet la vaporisation en diminuant la pression partielle du liquide (comme eau de mer)

Qui a fait la classification des transitions de phases sur la discontinuité des dérivés ?

Paul Ehrenfest en 1933

Pour l'incertitude du constructeur du multimètre, il s'agit de quel type ?

Type B

Pourquoi l'équilibre thermodynamique est à T, P, μ égaux ? Pk on utilise G ?

$dG = VdP - SdT + \mu dN$ et il faut que G soit minimum. On utilise G car la transformation est isobare et isotherme.

S'il y a une pente nulle dans le diagramme (P,T) , qu'est-ce que cela veut dire sur l'entropie Solide-Liquide ?

Entropie Solide-Liquide quasi-nulle

Supposons un récipient fermé, avec mélange liquide et gaz. Quand on chauffe, qu'est-ce qui se passe ? Comment arriver au point critique ?

Pour arriver au point critique, il faut choisir le bon "n" de molécules dès le départ. Si on a moins de n, on aura une phase complètement gazeuse à la fin.

Comment stocker du hydrogène par exemple dans une bouteille de liquide ?

Il faut que T ambiante soit plus petite que T critique sinon on aura pas une coexistence des 2 phases. Donc la bouteille doit bien isoler le liquide. Si T ambiante augmente, on doit être sûr que la matière ne se transforme pas en 100% liquide pour ne pas exploser la bouteille donc il faut choisir un "n" de matière petit.

Hors ordre 1 et 2 ? Si on passe par le point C, c'est quelle transition ?

Transition topologique. Ordre 2.

Dewar ? La température est importante ?

2 bouteilles 1 dans l'autre avec un vide (presque) entre eux. Donc pas de conduction ni convection. Les parois sont réflechissantes pour empêcher le transfert par rayonnement. C'est adiabatique (à part pour la partie en haut qui est ouverte).

Non T pas importante, on suppose juste qu'elle est homogène partout durant l'ébullition.

Autre élément que l'eau avec une pente négative ?

Le Bismuth

Un fluide dans la région supercritique, quand il baisse et revient au point C ?

Il diffuse de la lumière. C'est le phénomène d'opalescence critique

Une exception du diagramme ?

Celui de l'isotope 3 Helium ${}^3\text{He}$. Pas de point Triple (S en haut, L en milieu, G en bas)

Questions sur la Manip

Q: Qu'est-ce que c'est l'ordre de transition ?

R: Les transitions du 1^{er} ordre sont celles qui ne possèdent pas de paramètre d'ordre ou qui possèdent un paramètre d'ordre discontinu à la transition de phase. Elles admettent une énergie latente de transition et permettent la coexistence des phases.
Les autres transitions sont du second ordre, elles possèdent un paramètre d'ordre continu à la transition de phase. Elles ne font pas intervenir d'énergie latente de transition et ne permettent pas la coexistence des phases. La dérivée seconde par rapport à une des variables thermo de F est discontinue.

Une autre manière de le dire est qu'il existe une enthalpie de changement d'état pour les transitions du 1^{er} ordre.

Autre solution : Une quantité macroscopique varie continûment (1^{er} ordre) ou de façon discontinue (2nd ordre). Catégorisation de Landau (paramètre d'ordre), caractérisation d'Ehrenfest (continuité des dérivées).

Q: Existe d'autres ordres que 1 et 2 ?

R: Oui les Transitions topologiques.

Q: Qu'est-ce qu'une phase?

R: Une phase est un sous-système dont les grandeurs intensives sont homogènes.

Q: Y a-t-il toujours transition de phase lors du passage d'une phase à une autre ?

R: Non : au-delà du point critique, on a passage continu de liquide à gazeux.

Q: Comment marche le thermocouple ? Où mesure-t-on la température ?

R: Effet Seebeck. A la soudure

Q: Comment fonctionne une thermopile ?

R: C'est une session de thermocouples en série électriquement et en parallèle thermiquement. Les surfaces des thermocouples mesurent les mêmes différences de température. Les tensions sont sommées (car les dipôles sont en série) et donnent alors une "grande" différence de potentiel (de l'ordre du mV quand même).

Q: Quel est l'intérêt d'utiliser l'enthalpie ?

R: Dans l'expérience, on travaille à Pression constante, d'où l'utilisation de H.

Q: Pour l'experience avec eau, comment tu expliques la différence entre l'enthalpie de vaporisation (L_v) mesurée et celle tabulée ? Pour « quelle eau » est-elle tabulée ?

R: C'est une valeur tabulée pour de l'eau pure. Effectivement, l'expérience a été réalisée avec de l'eau du robinet, qui est donc minéralisée, on s'attend alors à déterminer une chaleur latente de vaporisation plus élevée.

Q: Comment tu as déterminé les incertitudes sur L_v mesurée ?

R: J'ai des incertitudes sur la tension, l'intensité, et de la pente de la droite déterminée par QtPlot modélisant la masse en fonction du temps.

Comme $L_v = -U \cdot I / (dm/dt)$, on propage les incertitudes.

Q: C'est quoi un vase Dewar ?

R: On peut le voir comme deux bouteilles imbriquées l'une dans l'autre, avec un espace entre ces deux bouteilles dans lequel règne un quasi-vide, ce qui empêche les pertes thermiques par conduction et convection. Les parois du vase sont aussi enduites d'une couche métallique réfléchissante qui empêche aussi les transferts radiatifs.

Autre solution : Adiabatique, de faible masse en eau. Pas d'échanges thermiques eau – extérieur. Le Dewar est creux, métallique : pas de diffusion, convection, pas de rayonnement. Quelques pertes par le dessus ouvert.

Q: Comment est la courbe entre solide et liquide dans le diagramme P,T de l'eau ?

R: Pente négative

Q: Transition liquide-vapeur : y a-t-il toujours transition de phase ? Quel ordre ?

R: Non, en fonction de si on passe au-delà du point critique ou non.

Sur la courbe, la transition est d'ordre 1, sauf au point critique où elle est d'ordre 2.

Q: Si on passe par le point critique , quel ordre ?

R: 2nd ordre

Q: Qu'est-ce qu'une chaleur latente ?

R: Energie à apporter à 1 mole/1kg de matière pour passer de liquide à vapeur, pour casser les liaisons.

Q: Quelles hypothèses ?

R: Aucune perte. On le vérifie : la masse d'eau varie peu avec le temps pour $T < T_{eb}$. La température varie lentement sur le temps d'acquisition des mesures.

Q: Comment évaluer les pertes ?

R: A $T < T_{eb}$ on regarde la variation de température en fonction du temps à chauffage nul. En supposant les pertes constantes et indépendantes de T on peut les inclure.

Q: La température est-elle importante pour cette manip'?

R: Non, elle ne nous intéresse pas. Il suffit de supposer qu'à l'ébullition la température est homogène dans l'eau, ce qui est vrai après un petit temps d'attente après l'ébullition.

Modèle de Landau

Dans les années 1930, Lev Landau a proposé une théorie phénoménologique des transitions de phase.

Il veut comprendre comment un système change d'état (de phase), sans chaleur latente.
Ex : un aimant qui perd son aimantation quand on le chauffe.

Objectif = Décrire les transitions de phase continues (du 2nd ordre) en introduisant :

- un paramètre d'ordre (ex : le paramètre aimantation pour un ferromagnétique)
- un développement du potentiel thermodynamique (souvent l'énergie libre de Gibbs ou de Helmholtz) autour de ce paramètre,
- une analyse des changements de symétrie au cours de la transition.

1. Paramètre d'ordre

Il part d'une grandeur spéciale qu'il appelle le paramètre d'ordre. C'est une quantité qui mesure si le système est dans une phase ou une autre.

- Grandeur macroscopique qui caractérise l'état du système.
- Zéro dans la phase symétrique (haute température),
- Non nul dans la phase brisée (basse température).

Exemples :

- Ferromagnétisme : $\phi = M$ (aimantation)
- Superfluidité : ϕ est lié à la fonction d'onde macroscopique
- Transition liquide-cristal : $\phi = \text{degré d'ordre orienté}$.

2. Développement de l'énergie libre

Il se dit : Je vais écrire l'énergie du système comme une fonction du paramètre d'ordre. Il utilise un développement en puissances de ϕ comme quand on fait une approximation proche de zéro. Pas de terme en ϕ car on suppose que F est symétrique - comme un bol, ça descend pareil des deux côtés.

Landau suppose que l'énergie libre $F(\phi, T)$ est analytique près de la transition et invariante par symétrie, donc :

$$F(\phi, T) = F_0(T) + a(T) \phi^2 + b(T) \phi^4 + \dots$$

(sans terme linéaire si F est symétrique en $\phi \rightarrow -\phi$)

$a(T)$ change de signe à la température critique T_c

$b(T) > 0$ pour assurer la stabilité (minimum de F).

3. Analyse de la transition

Il suppose que $a = \alpha(T - T_c)$

- Pour $T > T_c$: $a(T) > 0$ donc le minimum de F est pour $\phi = 0 \rightarrow$ Phase symétrique pas d'aimantation à haute température
- Pour $T < T_c$: $a(T) < 0$, minimum est quelque part autour de $\phi \neq 0 \rightarrow$ Brisure spontanée de symétrie
le système s'aimante spontanément à basse température.

À une température critique T_c , le signe de $a(T)$ change \rightarrow c'est la transition de phase.

Métaphore visuelle : Imagine une balle dans un bol :

- Avant la transition ($T > T_c$) : le bol a une seule vallée au milieu → la balle reste au centre
- Après la transition ($T < T_c$) : le bol se déforme, il a deux creux → la balle roule dans un des deux. C'est une brisure spontanée de symétrie : le système choisit un côté, sans qu'on l'ait poussé.

Mais cette transition est faite continûment, le paramètre d'ordre change progressivement avec $T-T_c$ jusqu'à passer à une valeur nulle ou autre ... pas de saut

On cherche maintenant **le minimum** de la fonction d'énergie F

là où le système veut naturellement se placer (la balle dans le bol !).

Cela donne une transition continue, où le paramètre d'ordre croît comme :

$$\frac{dF}{d\phi} = 2a\phi + 4b\phi^3 = 0 \quad \rightarrow \quad \phi(2a + 4b\phi^2) = 0$$

Donc soit $\phi = 0$ (c'est le minimum si $a>0$). Si $a<0$: $\phi(T) = \pm \sqrt{\frac{-a(T)}{2b(T)}}$

Alors $\phi(T) \propto \sqrt{-a(T)} \propto \sqrt{T_c - T}$

Plus on s'éloigne de la température critique vers le bas, plus le paramètre d'ordre (ex : l'aimantation) augmente progressivement.

Titre : Transitions de phase**Présentée par :** Romain Taureau**Rapport écrit par :** Anne-Cécile Buellet**Correcteur :****Date :** 05/12/23

Bibliographie

Titre	Auteurs	Éditeur
Dictionnaire de physique thermodynamique	taillet	deboeck
Thermodynamique, fondements et applications	Diu	
Thermodynamique	perez	dunod
	Hulin	dunod

Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon : Licence

Pré-requis : Potentiels thermodynamiques

1^{er} et 2nd principes de la thermodynamique

Variables d'état

I/Approche qualitative

1) Définitions

Définitions d'une phase et d'une transition de phase

2) Exemple

Exemple de l'eau : variation de la masse volumique, de l'indice optique,... selon la phase

Exemple de la transition ferro-paramagnétique : perte de l'aimantation lorsqu'on élève la température (structure cristalline inchangée)

Exemple de la transition supra conducteur : perte de la résistance d'un métal (structure cristalline inchangée)

II/Considérations théoriques

1) Représentation

Utilisation de l'enthalpie libre ($\Delta G < 0$) et du diagramme (P,T)

2) Règle des phases de Gibbs

$v=n-f+2$, permet de prédire le nombre de degré de liberté pour un nombre de phase et un nombre d'espèce chimique

3) Transition liquide/vapeur

Compression d'un gaz par piston : apparition de la pression de vapeur saturante correspondant à un plateau lors du changement d'état

Chauffage d'une phase liquide : Démonstration de la formule de Clapeyron, notion de chaleur latente et ordres de grandeur.

III/ Classification et expérience

1) Ehrenfest (historique)

Ordres 1 (discontinuité de dG/dX) et 2 (discontinuité de d^2G/dX^2) : présente un problème notamment lorsqu'on considère une transition ferromagnétiques/paramagnétique

2) Landau (moderne)

Ordres 1 (transition possédant une chaleur latente) et 2 (transition continue). Pd'ordre m dépendant des transitions de phase et dont la variation est discontinue pour un ordre 1 et continue pour un ordre 2.

Expérience : Transition de phase ferro/paramagnétique d'un barreau de fer chauffé : mesure de la température de curie du fer.

Explication de l'écart entre la valeur trouvée et la valeur théorique par la présence d'impureté dans le barreau de fer utilisé.

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

Q : Est-ce que les solides sont toujours ordonnés ? Comment on les différencie d'un liquide ? Pourquoi le verre est solide et non liquide ?

Il existe les solides amorphes. Le verre possède un même degré d'ordre qu'un liquide mais il ne s'écoule pas sur une durée raisonnable. D'autre part, il résiste à une contrainte.

Q : Différence de densité entre la vapeur et un liquide ? Le rapport ?

Eau liquide 1kg/L, pour la vapeur aux conditions normales de pression et de température la densité est 1000 fois plus faible.

Q : Comment trouver la densité d'un liquide ? D'une phase condensée ?

A l'aide du tableau périodique, on peut déterminer la densité en supposant que tous les atomes sont en contact : $N_{\text{nucleon}} \times M_{\text{nucleon}} / R_{\text{bohr}}^3 \sim 1000 \text{ kg/m}^3$.

Q : Pourquoi transition abrupte de la résistance vers la supraconductivité du second ordre ?

Le paramètre d'ordre n'est pas la résistance.

Q : D'où vient la chute brutale de la résistance alors que les paires se condensent de façon continue ?

Même avec très peu de condensat, les paires se déplacent sans effort, elles conduisent le courant parfaitement, il n'y a donc pas de résistance.

Q : Autre manifestation de la supra ?

Propriété de diamagnétisme parfait : effet de lévitation effet Meissner ?

Q : Pourquoi la courbe de transition P,T est-elle horizontale pour l'hélium ?

Processus isentropique. L'entropie de l'hélium solide est la même que l'hélium liquide. On ne gagne pas en entropie même si on créer de l'ordre.

Q : Pourquoi ne pas démontrer la règle des phases ?

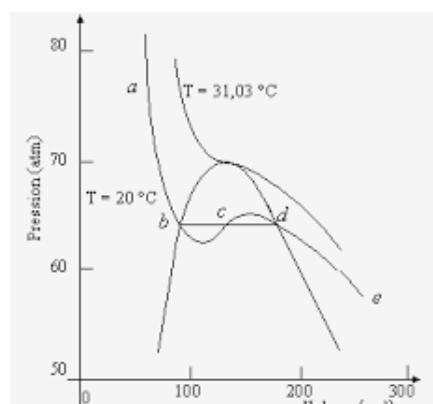
Choix pédagogique. Préféré expliquer la signification de la formule plutôt que de la démontrer.

Q : Pour un gaz de Van der Waals, à quoi ressemble la courbe PV de changement d'état ?

Q : Quelle est la partie instable ? Pourquoi ?

Zone où la pression et le volume diminuent simultanément, pas observable.

États métastables, observables.



Q : Comment déterminer l'ordre de grandeur de la capacité calorifique de l'eau ?

Capacité calorifique molaire $\sim 3 R$, avec R la constante des gaz parfaits. On peut remonter à la capacité calorifique en connaissant la masse molaire.

Q : Qu'est-ce que représente la chaleur latente ?

Ça quantifie la quantité d'énergie à apporter pour briser les liaisons entre les molécules/atomes du corps dense.

Q : Différence entre les deux classifications ?

Elles ne sont pas très différentes mais la classification de Landau prend en compte les symétries du système et est plus rigoureuse mathématiquement. La définition de l'ordre 1 est exactement la même pour les deux types de classifications.

Q : Quelle est la pente de l'aimantation en fonction de la température lors de la transition ?

La pente devient infinie.

Q : Pourquoi il n'y a pas de transition de phase lors du passage liquide-gaz en passant au-delà du point critique ? Comment faire une transition vapeur-liquide continue ?

La transition devient une transition du second ordre, continue, suivant la frontière liquide/vapeur.

Q : Est-ce que le chauffage d'une enceinte liquide/gaz donne forcément accès au point critique ?

Non, ça dépend de la quantité de matière introduite dans l'enceinte. On peut quitter la frontière liquide/vapeur avant d'atteindre le point critique.

Commentaires lors de la correction de la leçon

(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. L'enseignant relit, et rectifie si besoin)

Peu de calculs pour un niveau licence, niveau prépa peut-être plus approprié ou développer plus de calculs, faire des démonstrations.

Profiter de l'utilisation de slide pour illustrer.

Faire des petites manipulations qualitatives pour illustrer le plateau de température lors du changement d'état solide/liquide ou liquide/vapeur.

Exemple de calcul : décrire l'énergie libre dans le cadre de la théorie de Landau.

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

- 1) Présentation du modèle de van der Waals et utilisation pour illustrer les états instables et métastables de la transition liquide-vapeur.
- 2) Montrer sur un exemple comment les arguments de symétrie permettent de justifier l'expression de l'énergie libre dans l'approximation du champ moyen. Discuter dans ce cadre la différence entre transition du premier ordre et transition du second ordre.