

MP06 – TRANSITION DE PHASE

7 février 2017

"On peut toujours critiquer les zombies mais eux au moins t'aiment pour ton cerveau pas pour ton physique!"

Antoine Essig & Louisiane Devaud

Commentaires du jury

2015, 2016 : Ce montage doit être quantitatif et il ne faut pas se limiter à une série d'expériences qualitatives mettant en évidence des transitions de phases dans différents systèmes. Il faut, lors des mesures, avoir bien réfléchi aux conditions permettant d'atteindre l'équilibre thermodynamique. Dans ce domaine, les mesure "à la volée" sont souvent très imprécises. Une grande attention doit être apportée à la rigueur des protocoles employés. Enfin, il faut rappeler aux candidats que le diazote n'est pas le seul liquide dont il est possible de mesurer la chaleur latente de vaporisation et que plonger un corps solide dans un liquide conduit à l'existence d'une force appelée poussée d'Archimède.

2013, 2014 : Ce montage doit être quantitatif... Dans les expériences de calorimétrie, il est important de tracer l'évolution temporelle de la quantité mesurée (température, masse) avant et après le phénomène étudié afin d'estimer les fuites thermiques.

Bibliographie

↗ Duffait, <i>Expériences de physique au CAPES</i> ,	→ Calorimétrie
↗ Quaranta, <i>Dico de physique expérimentale</i> ,	→ Effet Meissner, Résistivité supra, Calorimétrie
↗ BUP 741	→ Effet Meissner
↗ Notices	→ Supra, Isothermes du SF_6 , Calorimétrie
↗ Papon, <i>physique des transitions de phase</i>	→ Généralités

Expériences

- ☞ Mesure de l'enthalpie de fusion de la glace
- ☞ Isothermes du SF_6
- ☞ Observation de l'opalescence critique
- ☞ Mesure de la température critique de la transition métal-supra
- ☞ Effet Meissner

Table des matières

1 Transitions de phase du premier ordre	2
1.1 Mesure de l'enthalpie de fusion de la glace	2
1.2 Isothermes du SF_6	3
2 Transitions de phase du second ordre	4
2.1 Opalescence critique	4
2.2 Mesure de la température critique du $YBa_2Cu_3O_7$ (formule théorique)	5
2.3 Effet Meissner	5

Introduction

On a tous déjà fait l'expérience de l'eau qui boue, de la glace qui fond... Ces différentes formes du même éléments sont appelées phases et on distingue majoritairement trois phases différentes : la phase solide, la phase liquide et la phase gazeuse. Nous allons ici nous intéresser au passage d'une phase à une autre. C'est ce qu'on appelle une transition. Dans ce domaine il existe une classification thermodynamique couramment utilisée, la classification d'*Ehrenfest*¹.

Ehrenfest distingue les transitions du 1^{er} ordre et celles du 2nd ordre.

transitions du 1^{er} ordre :

Les grandeurs thermodynamiques associées à des dérivées premières de potentiels thermodynamiques sont discontinues.

Exemple : $S = -(\frac{\partial G}{\partial T})_P$, $V = (\frac{\partial G}{\partial P})_T$, $H = \frac{\partial(G/T)}{\partial(1/T)}$

transitions du 2nd ordre :

Les potentiels thermodynamique et leurs dérivées premières sont continues, les dérivées secondes divergent à la transition (si elles sont nulles alors la transition est d'ordre supérieur).

Exemple : $C_p/T = -(\frac{\partial^2 G}{\partial T^2})_P = (\frac{\partial S}{\partial T})_P$, $\kappa_p V = -(\frac{\partial^2 G}{\partial P^2})_T = -(\frac{\partial V}{\partial P})_T$, où κ_p est la compressibilité isotherme.

1 Transitions de phase du premier ordre

1.1 Mesure de l'enthalpie de fusion de la glace

On va commencer par mesurer la chaleur latente de fusion (ou enthalpie de fusion) de la glace. L'existence même de cette chaleur latente est la signature d'une transition de phase du premier ordre. Nous procéderons par la méthode des mélanges (on aurait également pu procéder avec une résistance).

Mesure de l'enthalpie de fusion de la glace

⚡ Duffait, Quaranta, Notice Dewar

⌚ 10 minutes

Matériel

- Vase Dewar P103.41 + notice pour masse en eau théorique
- Thermomètre P102.31 (deux mesures en même temps possibles)
- Boitier thermomètre type K P70.20 (mesure en temps réel sur Latis pro)
- Balance
- Chronomètre

On commence par mesurer la masse en eau du calorimètre (en préparation) en faisant attention à la modélisation des pertes.

Pour déterminer la chaleur latente de fusion de la glace on place une masse connue de glace dans un calorimètre posé sur une balance, on ajoute alors une masse d'eau de température connue et on enregistre la température en fonction du temps. La masse d'eau ajoutée se lit sur la balance.

Détermination de la masse en eau du calorimètre

On a mesuré lors de l'expérience :

$$-m_{froid} = (327, 20 \pm 0, 01)g$$

$$-m_{chaud} = (326, 34 \pm 0, 01)g$$

$$-T_{chaud} = (97 \pm 0, 1)^\circ C$$

1. On rencontre parfois la classification de Landau qui se fonde sur la notion de paramètre d'ordre et de symétrie.

De la courbe expérimentale on tire :

$$-T_i = (18 \pm 1)^\circ C$$

$$-T_f = (48,5 \pm 1,5)^\circ C$$

Un bilan enthalpique donne :

$$\mu = -m_{chaud} \frac{T_f - T_{chaud}}{T_f - T_i}, \quad (1)$$

qui donne dans notre cas $\mu = (49 \pm 8)g$ avec la formule de propagation des incertitudes (on ne garde que les incertitudes sur T_{chaud} , T_f et T_i qui sont majoritaires).

Mesure de l'enthalpie de fusion de la glace

On a mesuré lors de l'expérience :

$$-m_{eau} = (\dots \pm \dots)g$$

$$-m_{glace} = (\dots \pm \dots)g$$

$$-T_{glace} = (\dots \pm \dots)^\circ C$$

Le graphe nous renseigne sur T_{eau} et T_f et nous permet d'évaluer les pertes du calorimètre.

Un bilan enthalpique donne :

$$(\mu + m_{eau})c_{eau}(T_f - T_{eau}) + m_{glace}Lm_{fus} + m_{glace}c_{eau}(T_f - T_{glace}) = 0 \quad (2)$$

Ce qui donne :

$$Lm_{fus} = -\frac{(\mu + m_{eau})c_{eau}(T_f - T_{eau})}{m_{glace}} - c_{eau}(T_f - T_{glace}) \quad (3)$$

$$AN : Lm_{fus} = (\dots \pm \dots)J.g^{-1}$$

avec la formule de propagation des incertitudes (on garde les incertitudes sur T_f et T_i qui sont majoritaires) :

On compare alors à la valeur théorique : $(Lm_{fus})_{th} = 334J.g^{-1}$ à $25^\circ C$.

↓ Maintenant que l'on a déterminé une enthalpie de fusion, on va s'intéresser à un autre changement d'état : la transition liquide gaz. On va s'attacher à déterminer la chaleur latente de vaporisation du SF_6 .

1.2 Isothermes du SF_6

Isothermes du SF_6 , tracé du diagramme de Clapeyron

🔗 Notice

⊖ 10 minutes

Matériel

- Appareil pour étude du point critique P0.13

On trace des isothermes en préparation et on en trace une devant le jury. On peut ne pas les tracer toutes entièrement mais au moins une pour extrapoler le nombre de moles. Il faut bien attendre entre chaque point que la thermalisation ait lieu.

La chaleur latente de vaporisation L_{vap} est donnée par la formule de Clapeyron :

$$L_{vap} = \left(\frac{T \Delta V}{n} \frac{dP}{dT} \right)_{P_{sat}}, \quad (4)$$

où P est la pression, T , la température, n le nombre de moles de gaz et ΔV la variation de volume au cours du changement d'état. L'indice *sat* correspond à *saturante*.

On commence par déterminer le nombre de moles de SF_6 contenu dans le dispositif d'étude. Pour cela on va tracer, sur l'isotherme complète, PV en fonction de $1/V$. On a alors décrit le gaz avec le développement du Viriel et l'ordonnée à l'origine donne accès à nRT .

On trouve $nRT = (38,5 \pm 0,9)Bar.ml$

Soit comme $T = (293 \pm 0,2)K$,

$$n = (1,58 \pm 0,04)10^{-3}mol,$$

avec la formule des incertitudes :

$$\delta(n) = n\sqrt{\left(\frac{\delta(nRT)}{nRT}\right)^2 + \left(\frac{\delta(T)}{T}\right)^2} \tag{5}$$

On va, grâce aux isothermes tracées déterminer $\left(\frac{dP}{dT}\right)_{P_{sat}}$, on prend alors les valeurs de P_{sat} pour $T = 20^\circ C$ et $30^\circ C$ et on détermine $\left(\frac{dP}{dT}\right)_{P_{sat}}$ pour la température qui nous intéresse (ici $T = 25^\circ C$).
 Pour $20^\circ C$: $P_{sat} = \dots \pm 0,25 \pm 0,25$ erreur de lecture et erreur sur P. Soit $(P_{sat})_{20} = (\dots \pm 0,5)Bar$
 Pour $30^\circ C$: $P_{sat} = \dots \pm 0,2 \pm 0,25$ erreur de lecture et erreur sur P. Soit $(P_{sat})_{30} = (\dots \pm 0,5)Bar$

$$\text{On en déduit : } \left(\frac{dP}{dT}\right)_{P_{sat}} = (\dots \pm 0,10)Bar.\text{ }^\circ C^{-1}$$

On mesure par ailleurs ΔV à cette température. (ou a défaut on fait une moyenne entre deux températures proches).
 Pour $25^\circ C$: $\Delta V = (\dots \pm \dots)ml$ erreur de lecture et erreur sur V (0,025ml négligeable).

On a alors $L_{vap} = \left(\frac{T\Delta V}{n} \frac{dP}{dT}\right)_{P_{sat}} = \dots J.mol^{-1}$, soit

$$L_{vap} = (\dots \pm \dots)J.g^{-1}$$

(masse molaire de $146,06g.mol^{-1}$)
 avec la formule de propagation des incertitudes :

$$\delta(L_{vap}) = L_{vap}\sqrt{\left(\frac{\delta(T)}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta V)}{\Delta V}\right)^2 + \left(\frac{\delta(n)}{n}\right)^2 + \left(\frac{\delta\left(\frac{dP}{dT}\right)}{\frac{dP}{dT}}\right)^2} \tag{6}$$

On compare alors la valeur mesurée et son incertitude à la valeur théorique : $(L_{vap})_{th} = 162,2J.g^{-1}$

2 Transitions de phase du second ordre

2.1 Opalescence critique

Observation de l'opalescence critique du SF6

🔗 Notice

⌚ 5 minutes

Matériel

- Appareil pour étude du point critique P0.13
- Éventuellement caméra ou lentille pour projeter

On se place à une température supérieure à celle du point critique ($45,5^\circ C$) et on pose un béccher d'eau glacée sur le dessus de la lucarne tout en observant observe grâce le fluide. On peut projeter l'image sur un écran pour rendre cela plus visuel. À la température critique on ne fait plus la distinction entre la phase liquide et la phase gazeuse et le tout s'assombrit.

Quand on s'approche de la température critique par valeur supérieure, le fluide qui est sous une seule phase se trouble et diffuse fortement la lumière. Une interface entre la phase liquide et la phase gazeuse apparaît ensuite. On explique ce comportement en considérant que, lorsqu'on s'approche du point critique, les caractéristiques des deux phase (densité, masse molaire..) se rejoignent. Il apparaît des fluctuations de densité corrélées à des fluctuations d'indice d'où la diffusion.

↓ *On a vu avec cette expérience que l'on pouvait passer de transitions de phases pour lesquelles les grandeurs étaient discontinues à des transitions pour lesquelles les grandeurs sont continues (ici c'est le cas à T_c et P_c). Ce sont des transitions de phase du second ordre. Nous allons continuer à les explorer.*

2.2 Mesure de la température critique du $YBa_2Cu_3O_7$ (formule théorique)

Quand on étudie la résistance des métaux, il est admis que cette dernière vient des irrégularités du réseau (lacune, atome supplémentaire...) ainsi que de ses vibrations. Une des sources de désordre est donc l'agitation thermique. La résistance dans un métal vient de la vibration des atomes : si on refroidit un métal ce dernier conduira mieux. K.Onnes (Prix Nobel) a donc refroidi des métaux pour étudier leur résistance à basse température. Il a découvert en 1911 que pour certains métaux (historiquement le mercure) la résistance s'annulait exactement en deçà d'une température critique T_c . C'est l'état supraconducteur.

Nous allons mesurer la température critique de la transition de phase métal-supra pour le $YBa_2Cu_3O_7$ ².

Température critique de la transition métal-supra pour le $YBa_2Cu_3O_7$

➤ BUP, Quaranta

⊖ 10 minutes

Matériel

- Supra + thermocouple P102.36 (notice pour correspondance tension/température)
- Azote liquide, bac de polystyrène, potence et pinces, ordi avec Latis Pro
- Ampli $\times 2$ (P41.23 et P48.11)
- Alim P53.6

On mesure grâce à la plaquette P102.36 conjointement la température et la résistance du supraconducteur. Pour cela placer la plaquette dans le bac de polystyrène contenant un petit fond d'azote liquide. L'azote va s'évaporer et la plaquette va lentement se réchauffer. Attention la partie délicate de la manipulation et d'être sûr de bien mesurer la bonne température (celle du supra). On trace sur Latis Pro la résistance en fonction de la température (*cf.* notice pour correspondances) et on observe un saut brutal à une température donnée^a. La température correspondante est la température critique recherchée.

^a. Il peut rester à basse température une résistance due aux jonctions.

On présente un graphe de manipulation :

Questionnement sur les sources possibles d'erreur :

- problèmes de thermalisation
- évaluation de T_c sur Latis Pro
- non homogénéité de la température au sein du supra

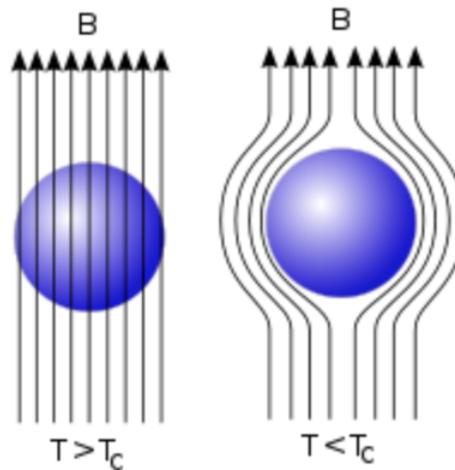
On obtient : $T_c = \dots \pm \dots K$

2.3 Effet Meissner

Une autre manifestation de la supraconductivité est l'effet Meissner. Cet effet montre qu'un supraconducteur est un diamagnétique parfait, il expulse donc les lignes de champ magnétique. On observe alors une transition "normal-diamagnétique parfait".

Cet effet est distinct de celui d'annulation de la résistance. Aucun n'est conséquence de l'autre.

². En l'absence de champ magnétique cette transition est du second ordre.



Meissner.png

FIGURE 1 – En dessous de sa température critique le métal est supraconducteur, il se comporte comme un diamagnétique parfait et expulse les lignes de champs.

Effet Meissner

➤ BUP, Quaranta

⊖ 5 minutes

Matériel

- Supraconducteur (les mettre à l'étuve avant pour évaporer l'humidité absorbée (ils sont poreux) et ne pas les endommager)
- Azote liquide
- Aimant

On commence par refroidir le supraconducteur puis on approche l'aimant. On observe que ce dernier est repoussé ^a.

^a. Si on refroidit l'aimant avec le supraconducteur on peut observer (en fonction de la nature du supra) un encrage, ce n'est pas de l'effet Meissner pur.

Conclusion

Dans se montage nous avons observé différents types de transitions de phase et, grâce aux lois physique et à des mesures, nous sommes remontés à des caractéristiques de ces transitions (enthalpie de changement d'état, température critique..). Mais si ces grandeurs expriment une condition de stabilité, il est parfois possible d'observer un matériau dans une phase qui ne correspond pas à l'état thermodynamiquement attendu. On parle alors d'état métastable (surfusion...).

Commentaires