

MP06- Transition de Phase

May 7, 2019

Contents

1	Enthalpie de fusion de la glace	3
1.1	précautions	3
1.1.1	Hypothèses :	3
1.2	Préparation : mesure de la masse en eau du calorimètre.	4
1.3	Expérience : mesure de la chaleur latente de fusion de l'eau.	4
2	Chaleur latente de vaporisation de SF_6	5
2.1	Précautions	5
2.2	tracé des isothermes :	5
2.3	Nombre de moles de SF_6	6
2.4	Enthalpie de changement d'état :	6
2.4.1	Hypothèses :	7
3	Transition normal supraconducteur	7
3.1	Rappels théoriques.	8
3.2	Expérience : Mesure de la température critique du supraconducteur $YBa_2Cu_3O_7$ (formule théorique)	8
3.2.1	Incertitudes :	9
3.3	Comentaires des autres années :	10
3.3.1	Hypothèses:	10
4	Annexe :	11
4.1	Opalescence critique	11
4.2	Rappels de supraconductivité	11

- 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 et 2014 : Ce montage doit être quantitatif. Il faut pour cela avoir bien réfléchi aux conditions permettant d'atteindre l'équilibre thermodynamique. Dans ce domaine, les mesures « à la volée » sont souvent très imprécises. Une grande attention doit être

apportée à la rigueur des protocoles employés. 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.

- 2010 à 2012 : Ce montage peut et doit être quantitatif. Il faut pour cela avoir bien réfléchi aux conditions permettant d'atteindre l'équilibre thermodynamique. Dans ce domaine, les mesures « à la volée » sont souvent très imprécises. La chaleur latente peut provenir de mesures calorimétriques, pas seulement de la courbe $p(T)$.
- 2009 : Ce montage peut et doit être quantitatif. La notion de chaleur latente est trop souvent absente.
- 2008 : Ce montage doit faire l'objet de mesures. L'établissement des équilibres thermiques étant parfois long, il est nécessaire de bien gérer le temps et d'anticiper le démarrage des expériences. La durée des régimes transitoires doit être prise en compte dans les interprétations.
- 1999 : Le montage ne saurait se limiter à la détermination de quelques points du diagramme de phase d'un corps pur. Il est souhaitable de mesurer, par exemple, une chaleur latente. Lorsqu'il s'agit de la chaleur latente de vaporisation (enthalpie) L_v de l'azote liquide à la pression atmosphérique, le protocole souvent mis en oeuvre consiste à introduire une résistance chauffante dans le calorimètre Dewar ; la détermination de l'énergie électrique consommée pendant un certain temps et la mesure de la masse du liquide vaporisé permettent de trouver l'enthalpie cherchée, même si on se place, le plus souvent à tort, dans l'hypothèse très défavorable des grandeurs corrélées, la détermination classique de l'incertitude (portant sur les mesures de masse, de temps, de tension et d'intensité) ne permet pas en général de justifier l'écart important entre la valeur de L_v ainsi déterminée et la valeur tabulée : le mode opératoire introduit en effet des erreurs systématiques qui doivent être prises en compte pour aboutir à un résultat corrigé . [...]

Références :

- *Quaranta tome 2 pour l'expérience de Supra (mais pas nécessaire)*
- Fruchart Lidon p371 pour l'expérience avec le SF_6

Attendre que les équilibres thermiques se fassent.
Parler à chaque fois de l'ordre de la transition.

Introduction : Ordre de transition

On est très souvent confrontés à des transitions de phases. Qu'il s'agisse d'un bon chocolat chaud fumant ou une glace en été. Dans ce montage, on va s'intéresser à essayer de les quantifier.

Ehrenfest¹ distingue les transitions du 1^{er} ordre et celles du 2nd ordre :

¹a classification d'Ehrenfest a été abandonnée car elle ne prévoyait pas la possibilité de divergence. Par exemple, la transition ferromagnétique est caractérisée par une divergence de la capacité thermique (dérivée seconde de l'énergie libre)

- **1^{er} ordre** :² Les grandeurs thermodynamiques associées à des dérivées premières de potentiels thermodynamiques sont discontinues.

$$S = - \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P \quad V = \left(\frac{\partial G}{\partial P} \right)_T \quad H = \left(\frac{\partial G/T}{\partial 1/T} \right)_P \quad (1)$$

- **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).

$$\frac{C_P}{T} = \left(\frac{\partial^2 G}{\partial T^2} \right)_P = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P \quad \kappa_T V = \left(\frac{\partial^2 G}{\partial P^2} \right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (2)$$

où κ_T est la compressibilité isotherme.

1 Enthalpie de fusion de la glace

Il s'agit d'une transition du premier ordre.

1.1 précautions

C'est bien de suivre l'évolution temporelle de la température dans le calorimètre, afin de pouvoir justifier l'obtention de l'équilibre thermodynamique lorsque la température cesse d'évoluer, et aussi d'évaluer les pertes thermiques. Cela n'empêche pas d'utiliser un autre thermocouple, plus précis, pour la mesure des températures avant et après insertion de la glace. Sur ce point, la glace a été précédemment mise dans l'eau pour être à 0°C , c'est en effet très important car les glaçons sortis du congélateur sont à -20°C , et leur réchauffement n'est pas pris en compte dans la formule utilisée. Il est encore plus rigoureux de sécher les glaçons (sur un papier absorbant) avant de les insérer dans le calorimètre (si non l'eau liquide alors introduite avec les glaçons fait partie de la masse mesurée mais ne libère pas l'enthalpie de fusion).

Dans toute cette partie :

- **Les suivi temporels sont réalisés grâce à un Boitier thermomètre type K P70.20 (mesure en temps réel sur Latis pro)**
- **Les mesures précises de températures font appel à un thermocouple de type K P102.12L relié à un boîtier P102.31**

1.1.1 Hypothèses :

- calorimètre purement adiabatique (en vrai quasi-adiabatique) donc échanges thermiques internes.
- P uniforme (P varie de 1% entre la surface du liquide et le fond du récipient voir sa hauteur et faire un calcul de statique des fluide)

²Désormais les transitions du premier ordre sont celles qui impliquent une enthalpie de transition de phase (ou enthalpie de changement d'état, encore parfois appelée chaleur latente) d'après *Quarenta dictionnaire de la physique*.

- la mesure de masse totale (mettre une balance sous le Dewar) du système au cours du temps nous indique si on peut négliger les pertes par évaporation (elles peuvent être négligées dans un Dewar (contrairement à un bécher). **On peut vérifier cette hypothèse en préparation ou devant le Jury. Pour cela mettre le Dewar sur une balance et noter les masses initiales et finales. Si il n'y a pas d'évaporation, elles sont égales.**

1.2 Préparation : mesure de la masse en eau du calorimètre.



mesure de la masse en eau du calorimètre :

Remplir le vase Dewar P103.47 avec une masse d'eau m_1 d'environ 300 g mesurée précisément. Relever la température T_1 de l'eau avec un thermocouple de type K P102.12L relié à un boîtier P102.31. Faire chauffer de l'eau dans une bouilloire P101.28, puis en verser une masse m_2 d'environ 300 g mesurée précisément dans un bécher. Relever sa température T_2 puis l'introduire elle aussi dans le calorimètre et fermer ce dernier. Suivre l'évolution de la température avec un thermocouple sur Latys-pro. Une fois que celle-ci est stabilisée, la relever. On la note T_f .

Le premier principe sur le système calorimètre+eau froide+eau chaude permet d'obtenir la capacité thermique du calorimètre plus précisément à un équivalent en masse d'eau μ de capacité équivalente (on suppose la transformation adiabatique isobare) :

$$c_e (\mu + m_1)(T_f - T_1) + c_e m_2 (T_f - T_2) = 0 \quad (3)$$

Donc :

$$\mu = \frac{m_2 (T_2 - T_f) - m_1 (T_f - T_1)}{(T_f - T_1)} \quad (4)$$

On attend un résultat de l'ordre de la dizaine de grammes.

sécher le calorimètre.

1.3 Expérience : mesure de la chaleur latente de fusion de l'eau.

Connaissant la masse en eau du calorimètre, on peut déterminer L_{fus} :



mesure de la chaleur latente de fusion de l'eau :

Dans un cristallisoir, faire tremper une grande quantité de glaçons dans de l'eau. Suivre la température de l'eau avec un thermocouple P102.12L relié à un boîtier P102.31. Quand la température se stabilise, attendre encore un peu pour être sûr que les glaçons sont à $T_g = 0^\circ C$.

Pendant ce temps, verser une quantité d'eau m_l (à température ambiante) d'environ 300 g **mesurée précisément** dans le calorimètre et relever la température T_l . Sur Latys-pro (**Boîtier thermomètre type K P70.20 (mesure en temps réel sur Latis pro)**), placer un capteur de température. Lorsqu'elle est constante, on se trouve bien à l'équilibre thermique. Noter la valeur de cette température.

Récupérer dans le cristallisoir environ quatre gros glaçons, les sécher sur un papier absorbant et mesurer leur masse m_g .

Les introduire dans le calorimètre, fermer celui-ci et suivre l'évolution de la température, jusqu'à ce qu'elle se stabilise à T_f .

On a alors :

$$c_e (\mu + m_1)(T_f - T_1) + m_g L_{fus} + c_e m_g (T_f - T_g) = 0 \quad (5)$$

Donc : Donc :

$$L_{fus} = -\frac{c_e m_g (T_f - T_g) + c_e (\mu + m_1)(T_f - T_l)}{m_g} = c_e \left(T_g - T_f + \frac{m_1 + \mu}{m_g} (T_f - T_l) \right) \quad (6)$$

On doit comparer à : $L_{fus}^{tab} = 334 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

En pratique, le calorimètre n'est pas parfaitement calorifugé. On attend donc une valeur expérimentale inférieure à la valeur tabulée.

Expliquer l'allure temporelle de la courbe $T(t)$ obtenue sur Latys-pro : on espère un plateau de fusion puis une pente décroissante (refroidissement).

2 Chaleur latente de vaporisation de SF_6

On s'intéresse à une autre transition du premier ordre. La transition liquide-gaz de l'*hexafluorure de soufre*. Pour cela, on utilise le dispositif P0.13. Le mercure assure l'échantéité de la chambre et permet d'en faire varier le volume.

L'appareil permet de mesurer la pression, la température et le volume d'une quantité de SF_6 emprisonnée dans une colonne. On peut alors accéder à plusieurs quantités thermodynamiques d'intérêt, notamment la chaleur latente de vaporisation à différentes températures.

L'hexafluorure de soufre SF_6 présente un point critique facilement accessible expérimentalement : $T_c = 45.57^\circ\text{C}$ et $P_c = 37.55 \text{ bar}$ ³. Il est également chimiquement inerte.

La mesure du volume V de l'échantillon se fait grâce aux graduations sur la colonne. La mesure de la pression se fait grâce au manomètre. On change le volume avec le volant. Pour régler la température, il faut utiliser le bain thermostaté P0.86.

La colonne met un temps conséquent à être thermalisée par l'eau, par souci de temps on doit alors limiter le nombre de températures que l'on veut explorer. On propose d'en étudier 4.

On commence par les températures les plus froides. Régler le thermostat sur 23°C . En attendant la thermalisation, commencer par **placer un thermomètre à alcool en haut de colonne afin de mesurer la température de la colonne** (qui n'est pas forcément celle de la consigne du thermostat à cause de pertes le long du tuyau). On travaillera en diminuant le volume. Se placer par conséquent avec le volant à $3,5 \text{ mL}$.

2.1 Précautions

2.2 tracé des isothermes :

 **tracé des isothermes (on fait seulement quelques points sur l'une d'elles pendant le passage) :**

Une fois que la température de la colonne n'évolue plus, on commence les mesures. Noter la température (proche de la température de consigne du thermostat à 23°C), puis relever la pression et le volume. À l'aide du volant, diminuer un peu le volume. Attendre l'équilibre

³D'autres justifications quant au choix du gaz sont discutées dans [BUP 589].

(qui peut mettre du temps à s'établir, surtout en présence d'une interface liquide/gaz). Relever alors à nouveau la pression et le volume et tracer ainsi point par point une isotherme dans le diagramme de Clapeyron (P, V). On peut raisonnablement faire 15 points, jusqu'à $V = 0,3$ ou $0,2 \text{ mL}$. Redescendre ensuite à $V = 3,5 \text{ mL}$ et changer la température de consigne pour $T = 25^\circ\text{C}$. **Faire de la même manière les isothermes à $T = 25^\circ\text{C}$, $T = 27^\circ\text{C}$** ^a

^aDans l'absolu, seulement deux isothermes suffisent pour obtenir L_{vap} . On pourrait qualitativement tracer celle à $T = 45^\circ\text{C}$ pour montrer que passé le point critique =, il n'y a pas de plateau.

Sur les isothermes à $T = 23^\circ\text{C}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $T = 27^\circ\text{C}$, on distingue trois régimes : le gaz compressible (la pente $(\frac{\partial P}{\partial V})_T = V\chi_T^{-1}$ est petite), la coexistence liquide/gaz sur le plateau, puis la phase liquide très peu compressible.

Attention ! : Le plateau attendu à la coexistence n'est pas vraiment un plateau en pratique. On peut apporter l'argument suivant : la présence du plateau provient du fait que **pour un corps pur en équilibre sous deux phases, la variance vaut 1**, donc à T fixée, la pression ne doit pas changer lorsqu'on fait varier le volume. Par conséquent, **une pollution de l'échantillon, en rompant l'hypothèse de corps pur, pourrait expliquer la petite pente observée.**

2.3 Nombre de moles de SF_6

Pour déterminer la chaleur latente, il est nécessaire de connaître la quantité de matière n de SF_6 dans la colonne. Pour cela, on prend les données de l'isotherme à $T = 25^\circ\text{C}$ (par exemple) et on trace $PV/RT = f(1/V)$.

Le développement du Viriel à l'ordre 1 en n/V donne qu'on obtient une droite d'ordonnée à l'origine n . On attend $n = 1,74 \cdot 10^{-3} \text{ mmol}$.

On rappelle le développement du Viriel (ou on suppose un gaz de sphères dures) :

$$PV = nRT \left(1 + B_2(T) \frac{n}{V} + B_3(T) \left(\frac{n}{V} \right)^2 + \dots \right) \quad (7)$$

Donc pour $n/V \rightarrow 0$, on a bien $PV = nRT$.

2.4 Enthalpie de changement d'état :

Connaissant n , on peut obtenir la chaleur latente de vaporisation $L(T)$ de SF_6 .

La relation de Clapeyron, valable pour les transitions de phase du premier ordre, donne pour la courbe $P_{sat}(T)$ de coexistence :

$$\frac{dP_{sat}}{dT} = \frac{L(T) \times n}{T(V_g(T) - V_l(T))} \quad (8)$$

où $V_g(T)$ le volume pour lequel on observe la première goutte de liquide, tandis que $V_l(T)$ est le volume pour lequel la dernière bulle de gaz disparaît. P_{sat} et T sont respectivement la pression et la température de changement d'état. La dérivée (à 25°C) est approximée par le rapport des différences finies⁴ :

⁴pour que cette approximation soit valable, il faut que $P_{sat}(T)$ varie assez linéairement sur l'intervalle de température $23 - 27^\circ\text{C}$

$$\left. \frac{dP_{sat}}{dT} \right|_{T=25^{\circ}C} = \frac{P_{sat}(27^{\circ}C) - P_{sat}(23^{\circ}C)}{T(27^{\circ}C) - T(23^{\circ}C)} \quad (9)$$

Écrit comme ça, c'est bizarre mais $T(23^{\circ}C)$ désigne la température mesurée avec le thermomètre à alcool en haut de colonne lorsque la commande du bain thermostaté est à $23^{\circ}C$.

Pour la mesure de P_{sat} , comme nos plateaux sont pentus, il faudra prendre la moyenne des deux valeurs extrêmes du plateau.

Donc⁵ :

$$L_{vap}(25^{\circ}C) = T(25^{\circ}C) \times \frac{(V_g(25^{\circ}C) - V_l(25^{\circ}C))}{n} \frac{(P_{sat}(27^{\circ}C) - P_{sat}(23^{\circ}C))}{(T(27^{\circ}C) - T(23^{\circ}C))} \quad (11)$$

On peut comparer à la valeur tabulée : $L_{vap}(25^{\circ}C)^{Tab} = 8,99 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

2.4.1 Hypothèses :

- pour Clapeyron :
 - corps pur (l'hypothèse la moins justifiée puisque les plateaux sont pentus)
 - transition d'ordre 1
- Approximer la dérivée par le rapport des différences finies.

3 Transition normal supraconducteur

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

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.

La transition métal/supraconducteur a plusieurs effets notables, dont l'effet Meissner proposé plus loin. On propose ici d'étudier un autre effet : l'annulation de la résistance électrique.

C'est une transition du second ordre en l'absence de champ magnétique. Une propriété notable est en effet la discontinuité de C_p à la transition.

⁵On peut même si manque de extrapoler les valeurs à $25^{\circ}C$ à partir de celle à $23^{\circ}C$ et $27^{\circ}C$ comme la moyenne arithmétique. On a alors :

$$L_{vap}(25^{\circ}C) = \frac{T(27^{\circ}C) - T(23^{\circ}C)}{2} \times \frac{(V_g(27^{\circ}C) - V_l(27^{\circ}C)) + (V_g(23^{\circ}C) - V_l(23^{\circ}C))}{2n} \frac{dP_{sat}}{dT} \quad (10)$$

La pente reste le rapport de différences finies donné plus haut.

3.1 Rappels théoriques.

Macroscopiquement, on observe :

- effet Meisner (expulsion du champ magnétique (diamagnétisme parfait
- discontinuité de la capacité calorifique
- conductivité DC nulle. (attention, en AC, il y a une faible conductivité.

En présence d'un potentiel attractif arbitrairement faible, on montre que l'existence de paires de Cooper est plus favorable que de garder des électrons libres. Ce sont ces paires de Cooper qui sont les porteurs de charge en supra. Dans les supraconducteurs BCS, c'est l'interaction électron-phonon qui est la source de ce potentiel attractif.

3.2 Expérience : Mesure de la température critique du supraconducteur $YBa_2Cu_3O_7$ (formule théorique)

Matériels utilisés :

- Supraconducteur : le blanc p102.17 Ce module a été monté par Julien Salort (à l'origine pour le concours d'entrée des ENS) donc n'hésitez pas à le contacter pour plus de précision dessus.
- Nanovoltmètre : Keithley 2182A nanovoltmeter (P52.2) Ce nanovoltmètre mesure la tension au borne du thermocouple. De plus il possède une sortie (qui amplifie le signal par 100) permettant l'acquisition au PC via LatisPro.
- Amplificateur : 4005 High speed power amplifier (P47.6) Amplifie x100 la résistance du supra. Sortie vers carte acquisition. (Seule la voie B fonctionnait au moment du montage et qu'il faut faire attention à la mise à zéro. L'idéal serait d'avoir deux Keithley !!
- Générateur de courant : Laboratory DC Power Supply (P53.15) Alimente le supra à $i < 2 A$ fixes (d'après Julien Salort le supra doit tenir le coup jusqu'à 2 A) Il faut un fort courant pour que la transition ne soit pas trop bruitée.

Suivre la notice :

On utilise un module sur lequel est monté un thermocouple de type K et un fil en matériau supra $YBa_2Cu_3O_7$. Pour mesurer la résistance du supra, on l'alimente en intensité et on mesure la ddp de ce dernier via un montage 4 fils. On amplifie cette tension U par 100 puis on l'envoie sur Latys-pro. La loi d'Ohm relie la résistance du supra à U :

$$U = R \times i \quad (12)$$

Pour la mesure de température, le thermocouple K a un seul brin et il nous faut comparer sa tension à une référence. Pour cela on prend un bain eau-glace dont on vérifiera qu'il est bien à $0^\circ C$. Il suffit de mesurer sa ddp avec le milivoltmètre Keithley puis brancher la sortie du milivoltmètre à brancher sur Latys-pro. On doit alors utiliser l'étalonnage fourni (notice) ou

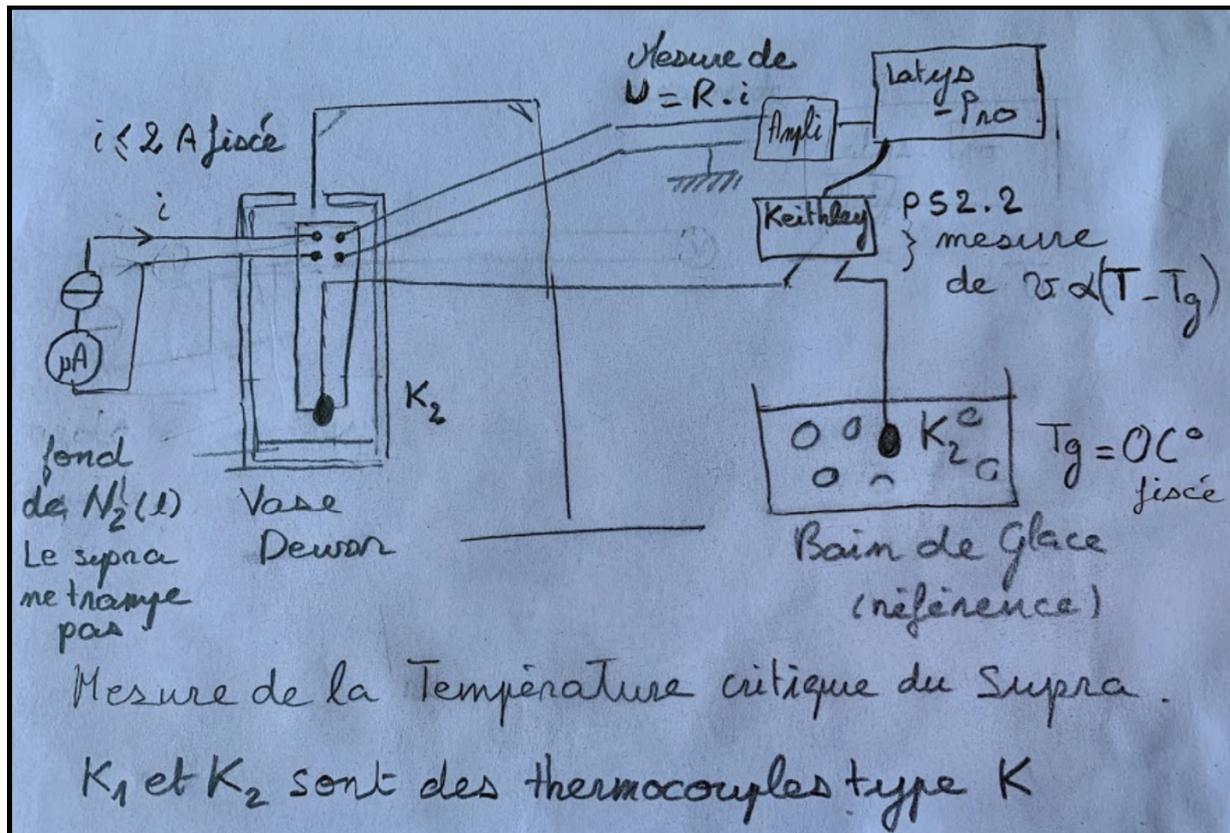


Figure 1: Montage à réaliser

réalisé en préparation⁶ pour remonter à T .

On acquiert directement sur l'ordinateur la température et la résistance comme on le décrit par la suite. Noter qu'il faut sortir le module suffisamment loin de l'azote liquide pour qu'il se réchauffe mais aussi suffisamment près de l'azote pour voir correctement la transition (vers 85 K en théorie). Noter que Jérémie Ferrand et Paco Maurer (montage 2012/2013) proposent de faire la manip avec deux Dewar : un pour refroidir le supra, l'autre pour effectuer la mesure.

Plonger bien le supra dans l'azote liquide jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'ébullition. Le relever alors au dessus de la surface du liquide pour le laisser refroidir. Acquérir avec Latis-pro les deux tensions sus-mentionnées.

Acquisition : LatisPro Un petit lissage des données s'avère bienvenue...

On choisit de faire un certain nombre de fois la manip dont une fois devant le jury. On fait donc des incertitudes de type A. On attend : $T_c^{tab} = 85K$.

3.2.1 Incertitudes :

On peut raisonnablement supposer que l'incertitude sur ce résultat est principalement liée à la mesure de température. On a ici utilisé un thermocouple de type T, or sa précision est très mauvaise à basse température. D'après le Asch, la précision des thermocouple de type

⁶On attend une relation linéaire. Prendre comme points : les deux K dans le bain eau glace et un dans l'azote liquide et l'autre dans la glace pour extrapoler la loi

T est de 2% pour la gamme de -100°C jusqu'à 50°C . Or ici on travaille à -180°C peut ainsi raisonnablement penser que la précision est de 3%, ce qui correspond à une incertitude de l'ordre de $\pm 5^{\circ}\text{C}$. On voit alors sur le graphe que la transition est relativement nette, donc l'incertitude liée à la mesure de la résistance va être négligeable par rapport à la température.

3.3 Commentaires des autres années :

La transition normal/supraconducteur n'est pas intrinsèquement « du deuxième ordre », **mais c'est le cas en l'absence de champ magnétique externe. En présence d'un fort champ magnétique ou d'un très fort courant, la supraconductivité est supprimée. De même qu'il existe une température critique, il existe donc un champ magnétique critique.**⁷ (voire deux pour un supra de type II) et un courant critique : en utilisant ces variables, il est possible de construire des diagrammes de phase, mais leur discussion est nettement plus compliquée que dans le cas d'un fluide (et hors du programme de ce montage) La manipulation sur la supraconductivité avec le tracé de la résistance en fonction de la température permet d'avoir une expérience quantitative sur le sujet. Il serait dommage de la perdre, en revanche pour s'affranchir de la difficulté de la mesure de la résistance à l'ohmmètre, on peut envoyer un courant fixe et mesurer la tension qui devient une image de la résistance. Ne pas oublier qu'une application possible de la variation brutale de la résistivité est l'utilisation du dispositif en thermomètre de très forte sensibilité, cela donne également un point fixe en thermométrie.

3.3.1 Hypothèses:

- Le champ magnétique extérieur est supposé nul
- pas d'effet Joule en état supra

Imperfections :

- En vrai il existe un fort gradient de température entre l'extrémité basse du supra et le thermocouple
- l'erreur de mesure à la volée est négligeable car $R^{supra}(T)$ est quasi verticale à la transition

Conclusion

Dans ce montage nous avons observé différents types de transitions de phase et, grâce aux lois physiques 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...).

⁷D'après Benjamin Huard : "l'entropie du supra diffère de celle du normal quand H est non nul puisque la différence est donnée par $H_c dH_c/dT$. Un saut d'entropie correspond à une chaleur latente finie et donc pas à une transition d'ordre 2. Donc quand on passe la transition en température à T_c , cela veut dire que l'on est à un point où $H_c(T) = 0$. On aurait pas pu atteindre T_c à la transition si H est non nul en d'autres termes."

4 Annexe :

4.1 Opalescence critique

Lire le dernier paragraphe de jolidon p382.

4.2 Rappels de supraconductivité