Correction de la LP15 : Transitions de phase

Jeudi 15 février 2018

Présenté par Tristan Guyomar – Appréciation : B
Samuel Boury [1], **Alain Villaume** [2]

Préparation à l'Agrégation de Physique option Physique 2017-2018, Ecole Normale Supérieure de Lyon

Remarque préliminaire : Les éléments de correction qui sont donnés à l'oral et dans cette fiche corrective portent sur la leçon qui a été présentée, et uniquement sur celle-ci. Le choix du contenu de la leçon et la façon dont elle a été présentée sont deux choses différentes. Par ailleurs, il n'y a pas de plan parfait pré-établi ; nous vous donnons uniquement des références et des pistes de réflexion pour qu'ensuite vous fassiez vos propres choix.

Rapports du jury

2015 Il est dommage de réduire cette leçon aux seuls changements d'états solide-liquide-vapeur. La discussion de la transition liquide-vapeur peut être l'occasion de discuter du point critique et de faire des analogies avec la transition ferromagnétique-paramagnétique. La notion d'universalité est rarement connue ou comprise.

2014 Il n'y a pas lieu de limiter cette leçon au cas des changements d'état solide-liquide-vapeur. D'autres transitions de phase peuvent être discutées.

Quelques commentaires généraux

Dans cette leçon, vous devez présenter et traiter correctement au moins une transition de phase du premier ordre et du second ordre, par exemple liquide-vapeur et ferro-para comme ici. Sans aller trop loin dans des développements théoriques, il faut aussi présenter les deux principales classifications des transitions de phase, à savoir la théorie d'Ehrenfest (classification selon la discontinuité des dérivées des fonctions d'état) et la théorie de Landau (discontinuité du paramètre d'ordre). Pour ne pas perdre de temps, vous pouvez choisir de traiter la transition du premier ordre uniquement avec la théorie d'Ehrenfest et d'adopter l'approche de Landau pour la transition du second ordre.

Le plan de la leçon présenté est à revoir : il faut éviter de partir dans des développements théoriques dès le début sans que l'on comprenne pourquoi vous les faites. Pour rendre cette leçon beaucoup plus concrète, demandez-vous : *à quoi servent les transitions de phase* ? Vous pouvez penser aux machines thermiques, moteurs, réfrigérateurs... il y a de nombreux exemples qui permettent de montrer que les transitions de phase sont effectivement utilisées dans des applications industrielles. Cette leçon peut également être illustrée par des expériences très visuelles : le clou pour la transition ferro-para est un exemple (pensez à le changer par un trombone si vous n'êtes pas sûrs de pouvoir le décrocher, voire par un thermocouple, et

1. *samuel.boury@ens-lyon.fr*
2. *alain_villaume@yahoo.fr*

mesurez un ordre de grandeur de la température de Curie) et surtout la transition liquide-vapeur du SF_6 (vous pouvez la filmer et la projeter, montrer sur des diagrammes les différents chemins suivis, etc). Nous proposons plutôt d'adopter un plan sur le schéma suivant :

1. Une première partie expérimentale, pour montrer ce qu'est un transition de phase et poser les définitions. Vous pouvez lier ce qui se passe dans l'expérience avec des chemins dans des diagrammes de phase.
2. Une deuxième partie sur les transitions de phase du premier-ordre, par exemple la transition liquide-vapeur (que vous avez pu utiliser dans la partie précédente).
3. Une dernière partie sur les transitions de phase du second-ordre, avec la théorie de Landau et les exposants critiques.

Dans tous les cas, vous devez être soigneux sur les définitions que vous introduisez. N'oubliez pas de préciser en début de leçon, si c'est le cas, que vous considérez des **corps purs** ! À ce titre, définissez (au fil de l'expérience si nécessaire, mais rapidement) ce que sont le système considéré, une phase et une transition de phase.

Enfin, faites attention aux prérequis que vous indiquez : si vous abordez la transition liquide-vapeur il faut mettre le modèle du gaz de Van der Waals, si vous traitez la transition ferro-para il doit y avoir l'électromagnétisme ou les magnétismes ferro et para, si vous parlez de spins et d'hamiltonien il doit y avoir des bases de mécanique quantique et de mécanique analytique, etc.

Sur la leçon elle-même

1 Introduction (2 min)

Il faudrait que la leçon soit concrète dès ce moment-là : pourquoi les transitions de phase ? À quoi servent-elles ? Où les trouve-t-on et où sont-elles utilisées ?

2 Transition liquide-vapeur (23 min)

Les idées importantes sont présentes : développement des fonctions d'état, séparation en deux sous-systèmes pour des questions énergétiques, construction de Maxwell (graphique, et interprétation avec des intégrales), définition des chaleurs latentes... mais en faisant les calculs et les développements théoriques avant de faire une expérience, vous prenez le risque que l'on ne vous suive pas du tout. Même si on se représente facilement la transition liquide-vapeur, vous devez la montrer : avec l'expérience du SF_6 par exemple, ou au moins en faisant bouillir de l'eau.

Les définitions posées dans cette partie était incomplètes ou inexactes. En particulier, vous devez préciser que le système considéré est un corps pur. Vous devez au moins donner une idée de ce que sont une phase et une transition de phase. De même, les chaleurs latentes ne sont pas seulement définies pour une transition liquide-vapeur, donc précisez L_{vap} plutôt que L.

Cette partie permet aussi de discuter des transitions de phase d'un point de vue énergétique. L'exemple de la vaporisation d'1kg d'eau qui équivaut à peu près au travail nécessaire pour monte une voiture en haut de la tour Eiffel est bien pour en donner une idée, il faudrait le quantifier davantage. C'est aussi l'occasion d'insister sur l'intérêt des transitions de phase dans les machines thermiques.

3 Transition ferro-para (20 min)

Une première remarque sur cette partie : vous ne pouvez pas aborder la transition ferro-para sans expliquer ce qu'est un matériau ferromagnétique et un matériau paramagnétique. Soit vous le mettez

en prérequis et vous le rappelez simplement (aimantation, et ordre de grandeur des susceptibilités magnétiques, comment trouver un ordre de grandeur de l'aimantation maximale), soit vous les définissez complètement. Et n'oubliez pas les unités pour l'aimantation.

Faire toute la théorie du ferromagnétisme et du paramagnétisme dans cette leçon n'est pas le meilleur choix (il y a une autre leçon pour ça). Vous pouvez tout à fait donner directement le hamiltonien avec l'approche de champ moyen et en déduire l'équation d'autocohérence. À partir de là, il est pertinent de faire une résolution graphique et de bien discuter le phénomène comme ce fut le cas dans la leçon.

4 Théorie de Landau (5 min)

C'est un passage important de la leçon, ne le reléguez pas à la fin comme ça. Il est préférable de l'inclure dans la partie précédente avec la transition ferro-para, et vous pouvez faire le développement de Taylor sur l'énergie libre pour retrouver l'expression en $(T - T_c)^\alpha$.

Pour terminer, vous pouvez effectivement montrer le passage au-dessus du point critique dans le cas d'un fluide. L'expérience du tube de Natterer n'est pas la plus démonstrative : on voit très mal ce qui se passe lorsque c'est filmé avec la flexcam et projeté, et on ne sait pas vraiment ce qui se passe (chauffe-t-on le liquide ? l'interface ? juste au-dessus ? la main chauffe-t-elle le tube aussi ?). Si vous voulez montrer ce phénomène, préférez l'expérience du SF_6 en la filmant et la projetant (vous l'installez en préparation et vous n'avez plus à y toucher). Le phénomène est beaucoup plus visible et vous contrôlez vraiment les paramètres P, T.

Quelques questions posées

Qu'est-ce qu'une transition de phase ?

Une définition simple que vous pouvez reprendre : une transition de phase est une transformation thermodynamique macroscopique d'un système d'un état à un autre à cause d'un changement statistique d'une variable interne.

Dans le diagramme de phase (P, T) de l'eau, la délimitation liquide-solide passe-t-elle par zéro ? Pourquoi ?

Elle passe par zéro, avec une tangente horizontale. C'est une conséquence du troisième principe de la thermodynamique.

Comment en pratique (c'est-à-dire avec quelles sondes) peut-on détecter ou suivre une transition de phase ?

Avec la susceptibilité magnétique ou la chaleur spécifique (adapté pour des transitions d'ordre 2), et avec la dilatation thermique en utilisant une jauge de contrainte (si la transition est d'ordre 1).

Où les transitions de phase sont-elles utilisées en pratique ?

Il y a de nombreux exemples avec les machines thermiques. Comme la transition de phase s'accompagne d'un transfert d'énergie important, les fluides circulant entre sources chaude et froide dans les machines dithermes peuvent être des fluides à changement d'état (cf. *BUP 832* sur le réfrigérateur).

À quel champ est lié l'aimantation M ?

L'aimantation est liée au champ $\mathbf{H}$ par la susceptibilité magnétique χ_m. Pour les matériaux ferromagnétiques, χ_m est positive et grande (de l'ordre de 10^3). Pour les paramagnétique, elle est positive et faible (de l'ordre de 1).

La nature de la transition de phase peut-elle changer en fonction de paramètres extérieurs ? (ordre 1 devenir ordre 2 et inversement ?)

Oui. Dans la transition ferro-para, la solution de l'équation d'autocohérence $M = 0$ passe d'un minimum global à un maximum local, changeant l'ordre de la transition de phase.

La théorie de Landau est cohérente qualitativement mais en désaccord sur les exposants critiques. Pourquoi ?

La théorie de Landau est une approche de type champ moyen, qui néglige les fluctuations au point critique. Or c'est justement là qu'elles divergent. Le comportement qualitatif est donc compris dans la théorie (en champ moyen) mais on ne trouve pas les bons exposants (voir la différence entre les modèles d'Ising et d'Heisenberg).

Éléments de bibliographie

1. Diu. *Thermodynamique.* Hermann, 2007.
2. Diu. *Physique statistique.* Hermann, 1996.
3. Pérez. *Thermodynamque.* Dunod, 2001.
4. Sanz. *Physique PC.* Dunod, 2014.
5. *BUP 832.*