

LP15 - TRANSITIONS DE PHASE

Année : 2020-2021

Correcteurs : Aubin Archambault et Léo Mangeolle

Contenu de ce rapport : Quelques remarques sur les questions qu'on s'est posées après la leçon.

Première remarque : sur la différence entre premier et second ordre. On entend souvent des choses qui s'apparentent à "la transition liquide-gaz est du premier ordre, et la transition ferro-para est du second ordre"; et même quand ce n'est pas dit explicitement, en général le plan de construction de la leçon dit ça implicitement. Or, c'est une formulation très discutable, car elle donne l'impression que liquide-gaz et ferro-para sont deux choses différentes, alors que c'est exactement le même diagramme des phases (la même classe d'universalité, comme on dit), juste traversé selon deux itinéraires différents.

Regardez la figure 1 (tirée d'un bouquin de matière condensée, les axes de la figure sont adaptés à la transition superfluide ou supraconductrice, mais comme tout ça c'est la même classe d'universalité, la figure marche aussi ici). Si on remplace ψ par la densité ρ et h par la pression P , on obtient le diagramme des phases du système liquide-vapeur : à haute P et haute ρ c'est le liquide, à basse P et basse ρ c'est le gaz, et à haute T c'est le fluide supercritique. Si on remplace ψ par l'aimantation M (et le champ magnétique extérieur h reste h), on obtient le diagramme des phases du système magnétique : à grand $h > 0$ et grande $M > 0$ c'est le ferromagnét avec les spins vers le haut, à grand $h < 0$ et grande $M < 0$ c'est le ferromagnét avec les spins vers le bas, et à haute T c'est le paramagnét. Tout ça c'est la même chose.

Donc si c'est pareil, pourquoi on a l'impression que c'est différent, avec d'un côté une transition du premier ordre, de l'autre une transition du se-

cond ordre ? La réponse vient des grandeurs expérimentales que l'on fixe¹. Lorsqu'on fixe la grandeur intensive, par exemple la pression dans le cas de liquide-gaz, ça revient à fixer le point où on se trouve dans le diagramme (P, T) : à basse T le système est soit liquide, soit gazeux ; ou le champ magnétique extérieur dans le système de spins : à basse T l'aimantation est soit vers le haut, soit vers le bas. Alors que si on fixe la grandeur extensive, par exemple le volume dans le cas liquide-gaz, le système se scinde en deux phases ; idem si on réussissait à fixer expérimentalement l'aimantation dans le cas du système magnétique. En gros, si (à T fixée) vous avez N spins et que vous leur dites "je veux que l'aimantation soit de $(N/3)\mu_B s \mathbf{h}$ " ($s = 1/2$), le système n'a pas le choix : il va se séparer en deux phases, deux tiers des spins se mettront vers le haut et un tiers se mettra vers le bas ; dans la figure 1, on est alors quelque part au milieu de la falaise orange (notez que c'est la même chose que le palier dans le diagramme de Clapeyron, et que le raisonnement que j'ai fait ci-dessus avec les populations de spins c'est juste le théorème des moments).

J'espère que maintenant, il apparaît plus clairement que la transition liquide-gaz "n'est pas" du premier ordre, et la transition ferro-para "n'est pas" du second ordre : si on fixe le volume du système liquide-gaz de sorte à avoir coexistence, puis qu'on augmente la température jusqu'à atteindre le point critique, on aura une transition du second ordre. A l'inverse, si on prend le système magnétique à basse T et qu'on fait passer le champ magnétique de $h < 0$ à $h > 0$, on observera une transition du premier ordre. C'est vraiment exactement la même chose, en fait.

Seconde remarque : sur la définition d'une transition de phase. Rien de plus simple a priori : une transition de phase, c'est "[...] transiter d'une phase à une autre"². Reste alors à définir une phase, et là c'est bien embêtant : le liquide et le gaz, c'est la même phase ou pas ? Si on traverse la ligne de coexistence, on subit une transition du premier ordre - dans l'expérience avec le SF₆, il

y a une discontinuité de densité, un dioptre, c'est plutôt clair qu'il y a deux phases. Mais si on choisit plutôt de contourner le point critique, on passe continûment de l'un à l'autre sans rencontrer aucune transition - en choisissant un astucieux dispositif de plusieurs centaines de mètres de hauteur (pour avoir des variations de pression significatives) avec des thermostats astucieusement pla-

1. Fun fact, j'ai découvert récemment que cette information capitale se trouvait déjà dans le cours de Peter (thermo L3). Tirez-en les conclusions que vous voulez.

2. Définition qu'on trouve dans le Taillet. Tirez-en les conclusions que vous voulez.

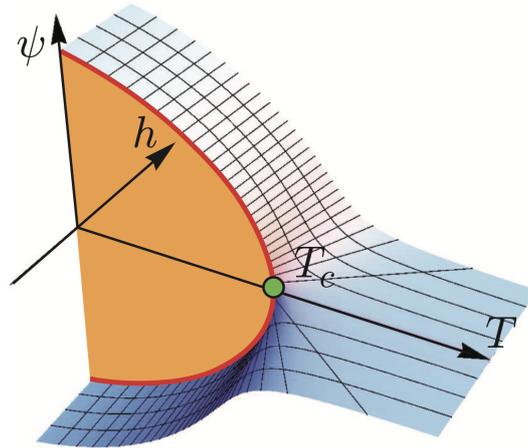


FIGURE 1 – Piers Coleman, *Introduction to Many-Body Physics*, C. U. P. (2016), p. 363

cés, on pourrait même concevoir un tuyau contenant du SF_6 qui passerait continûment du gaz au liquide, sans dioptre ni rien. Donc en fait, il semblerait que le gaz et le liquide peuvent être deux phases différentes, ou une même phase, selon la manipe qu'on choisit de faire. Damned.

D'autre part, vous savez que la classification de Landau définit les phases en termes de symétries préservées et brisées. Et sans surprise, le liquide et le gaz ont exactement les mêmes symétries (il ne pouvait pas en être autrement, sinon il ne serait pas possible de passer continûment de l'un à l'autre en contournant le point critique!). Donc théoriquement aussi, il semblerait bien que le liquide et le gaz soient une seule et même phase. Bon, soit. Alors comment on définit une phase?

Je vous laisse vous creuser la tête, et simplement constater qu'*il est beaucoup plus facile de définir une transition de phase que de défini-*

nir une phase. Voilà une proposition de définition qu'à titre personnel et sans une once de modestie je trouve en tout point supérieure à celle du Taillet : "évolution d'un système thermodynamique à l'équilibre, obtenue par suivi adiabatique d'une variation quasistatique des paramètres expérimentaux, au cours de laquelle au moins une grandeur physico-chimique du système présente une singularité". Voilà, donc passer du liquide au gaz en traversant la ligne de coexistence c'est une transition de phase parce que la densité présente une discontinuité, passer de l'un à l'autre en contournant le point critique ce n'est pas une transition de phase³- tout au plus une balade dans le diagramme des phases en restant toujours dans la même phase -, et l'affaire est réglée. On peut définir une transition de phase sans avoir à définir une phase.

3. Corentin, qui passait sur cette LP cette année, a suggéré que c'était une transition de phase continue. Ce terme est réservé aux transitions du second ordre au sens de Landau, i.e. les transitions sans chaleur latente. Ces transitions restent des transitions avec la définition que je suggère ci-dessus, car par exemple pour ferro-para, même si M est continue à la transition $\partial M/\partial T$ présente une singularité. Rien à voir avec contourner le point critique, où il n'y a aucune discontinuité d'aucune dérivée n-ième. Inutile de tenter "transition C^∞ ", c'est déjà pris par la transition BKT qui est encore une vraie transition.

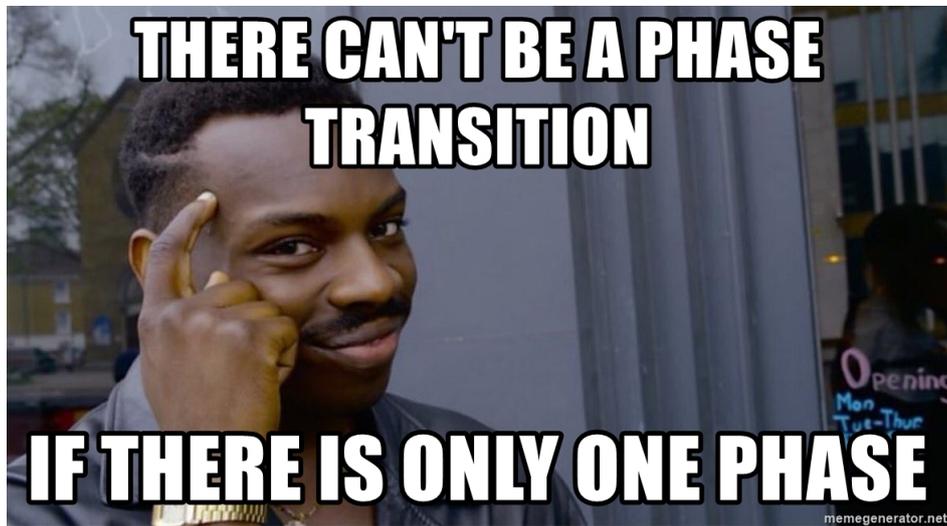


FIGURE 2 – Ça semble frappé au coin du bon sens, mais c'est plutôt faux.