

Table des matières

1	Objectifs pédagogiques	1
2	Pré-requis, introduction et ouverture	1
3	Proposition de plan	2
3.1	Notions de transitions de phase	2
3.2	Applications des transitions de phase	2
3.3	Annexes	2
4	Expériences illustratives et exploitations pédagogiques	3
5	Bibliographie	3
6	Remarques des correcteurs et réponses aux questions	3

1 Objectifs pédagogiques

Les objectifs de cette leçon sont nombreux :

- ▷ Rapprocher la notion de stabilité d'un état au minimum d'un potentiel thermodynamique bien choisi.
- ▷ Comprendre la notion de transition de phase et savoir interpréter le diagramme de phase d'un corps pur.
- ▷ Savoir démontrer la relation de Clapeyron et définir la notion de chaleur latente.
- ▷ Savoir définir une transition de phase d'ordre 1 et 2.
- ▷ Expliquer qualitativement la désaimantation d'un morceau de fer.
- ▷ Connaître des applications diverses et variées sur les transitions de phase.

2 Pré-requis, introduction et ouverture

▷ Pré-requis :

- Cours précédents sur la thermodynamique (notion de fonctions, variables d'état, transformations usuelles,..).
- Allure des diagrammes (P,T) et (P,V).
- Premier et second principe.
- Propriétés sur différentes fonctions d'états (U,H,F,G)
- Modèle du gaz parfait.
- Notions ferromagnétisme, paramagnétisme (abordées dans le cours de magnétisme).

- ▷ **Introduction** : continuité du cours de thermodynamique + transitions de phases omniprésents dans la vie quotidienne. *Problématiques* : comment caractériser une tel changement de comportement ? Comment caractériser, plus généralement, une transition de phase et quelles en sont les applications les plus courantes ?

- ▷ **Conclusion et ouverture** : on revient que les points importants que l'on a abordés pendant la leçon + ouverture sur un modèle plus réaliste pour les gaz, celui de Van Der Waals (on a vu précédemment l'existence d'un point critique pour la transition liquide gaz mais cette transition de phase ne prend vraiment de sens que si l'on considère les interactions entre les molécules, ce qui n'est pas le cas avec le modèle du gaz parfait => On va revenir sur l'élaboration des isothermes d'Andrew avec la construction de maxwell et expliciter avec ce nouveau modèle l'expression de T_c en fonction du terme d'interaction).

3 Proposition de plan

3.1 Notions de transitions de phase

► Potentiels thermodynamiques et notions de stabilité

Retour sur l'équilibre thermodynamique + rappels fonctions d'états (F et G) + définitions potentiels thermodynamiques (insister qu'en fonction du problème on choisit l'un ou l'autre) + schéma pour bien comprendre les notions de stabilité-métastabilité et instabilité.

► Notions de transition et diagramme de phase

Définitions, illustration compétition ordre-désordre + condition d'équilibre entre deux phases sur un diagramme de phase (PT) pour un corps pur.

► Caractérisation et classification

Démonstration de la formule de Clapeyron : notion de chaleur latente (ordre de grandeur avec l'eau, expérience de Tyndall). Chaleur latente et notions de discontinuité du potentiel thermodynamique => classification transition 1er et 2nd ordre.

3.2 Applications des transitions de phase

(Liste non exhaustive).

► Les chaufferettes chimiques

*Présentation et application "au chauffage".
(+ présentation de la surfusion (métastabilité) -> Illustration de la sous partie I)1).*

► Retour sur l'expérience introductive : aimantation du fer

*Présentation et applications diverses de la transition Ferro-Para.
(Cuiseurs riz, contrôle fer à souder, aimants,..).*

► Les chambres à bulles

*Présentation et application à la détection de particules.
(+ présentation de la surébulition (métastabilité) -> Illustration de la sous partie I)1).*

3.3 Annexes

► Les matériaux à changement de phase

A faire en live s'il manque du temps. Présentation et application au stockage de l'énergie.

► Transition de phase des cristaux liquides

A faire en live s'il manque du temps. Présentation avec les mains et application à l'affichage des écrans.

► Généralité sur le gaz de VdW et construction de Maxwell

► Transition Ferro-Para avec le modèle d'Ising et Curie-Weiss

► Exposants critiques VdW et Ferro-para

► Transitions de phase et paramètres d'ordre

► Métaux et alliages

► Supraconductivité-Superfluidité

► Transition vitreuse

► Condensation de Bose-Einstein

► Transition d'ordre infini : BKT

Toutes ces parties annexes ont pour but de répondre à un large panel de questions pendant l'entretien (tous ces éléments se trouvent sur le diaporama).

4 Expériences illustratives et exploitations pédagogiques

- ▷ Vidéo température de Curie : (si impossible de le faire en live)

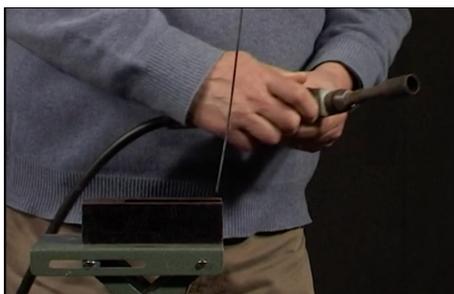


Fig. 1 – Processus de désaimantation d'un morceau de fer.

- ▷ Vidéo de cours sur le modèle de Van Der Waals et la construction de Maxwell : (Cours d'un physicien de l'université de Grenoble, à exploiter pour une éventuelle partie sur le gaz de VdW.)

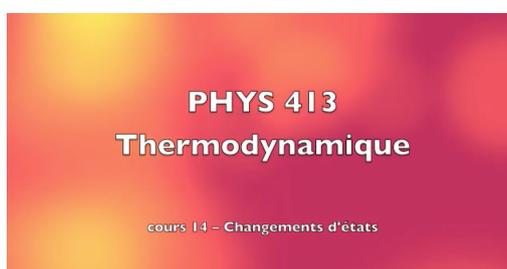


Fig. 2 – Cliquer sur l'image pour avoir accès à la vidéo.

5 Bibliographie

Les références bibliographiques ont été nombreuses et variées pour la conception de la leçon :

- ▷ *Thermodynamique des états de la matière* de Pierre Papon et Jacques Leblond.
- ▷ *Thermodynamique* de Bernard Diu.
- ▷ *BFR Thermodynamique*.

(Le coeur du cours a été écrit grâce à ces trois ouvrages)

- ▷ *Des processus élémentaires aux phénomènes collectifs* de Christophe Texier et Guillaume Roux (pour la transition Ferro-Para et sur la notion d'universalité).
- ▷ Anciens cours de M1 sur la matière molle (pour la transition de phase des cristaux liquides).
- ▷ Anciens cours de L3-M1-M2 sur le magnétisme (pour la transition Ferro-Parra).
- ▷ Sujet du DS de Thermodynamique de cette année et cours de Thierry Jolicoeur (pour les annexes sur le gaz de Van Der Waals).
- ▷ Anciens cours de M1 de Physique statistique quantique (pour l'annexe sur la condensation de Bose-Einstein) .
- ▷ Enifn, de nombreux sites divers (citons par exemple Wikipédia) pour les différentes applications (chaufferette, chambre à bulles, alliages,..).

6 Remarques des correcteurs et réponses aux questions

- ▷ *Autres méthodes de détection par chambre ?* Chambre à brouillard (vapeur saturante qui se liquéfie, Charles Winson, Prix Nobel 1929) et chambre à fils (Charpak).

- ▷ *Critère d'équilibre ? $\Delta(G^*) < 0$.* Un état d'équilibre est un extrema du potentiel (minima ou maxima)
- ▷ *Quelle est la différence d'état physique dans la transition ferro/para ?* L'état physique est le même donc il est délicat de voir en L2 que c'est une transition de phase. Il faudrait modifier la définition de transition en insistant sur la notion de propriétés.
- ▷ *Exemples de changement d'états métastables dans la nature ?* Ailes des avions sur des gouttes d'eau surfondues dans les nuages.
- ▷ *Comment casse-t-on un état de surfusion ? Comment rompt-on un état de métastabilité ou de stabilité ?* Il faut apporter de l'énergie **rapidement**. Peut-être faudrait-il insister sur la notion de rapidité.
- ▷ *Différence entre G et G^* ?* Les deux ne se confondent que pour les transformations isobares et isothermes. En général, on n'a qu'une transformation monotherme et monobare en chimie. C'est un point assez précis et pointilleux qui mérite quelques précautions/précision.
- ▷ *Transition de phase d'ordre 2 ?* Par exemple Ferro-Para. *Définition d'un paramètre d'ordre/paramètre de contrôle ?* Le paramètre d'ordre est le paramètre pertinent qui varie au cours d'une transition de phase. Transition cristalline aussi d'ordre 2.
- ▷ La notion de paramètre d'ordre illustrée sur la transition para ferro est accessible en L2 tout comme les volumes massiques pour la transition liquide/gaz.
- ▷ *Comment définir une phase ?* En thermodynamique pas de différence avec un état. Domaine de l'espace où les grandeurs sont continues. Dans ce cadre une transition de phase est un domaine où les grandeurs caractéristiques ne sont plus continues (au moins une des propriétés).
- ▷ *Qu'est ce qu'un potentiel thermodynamique ?* C'est une fonction qui évolue spontanément vers un minimum. L'équilibre est alors atteint.
- ▷ *Des transitions d'ordre 3 ?* Non mais ordre infini BKT (réseau de vortex dans les supra à 2D).
- ▷ *Ordre/désordre pour la transition liquide gaz ?* Le liquide reste plus organisé car il existe des interactions plus fortes.
- ▷ *Compétition énergie/entropie ?* Attention, énergie et entropie n'ont pas la même dimension. Plutôt parler de compétition ordre/désordre pour être plus vague et paradoxalement plus juste (ou alors interaction-agitation thermique).
- ▷ *Lien entre chaleur latente et discontinuité du potentiel ?* $L_{vap} = (s_g - s_l)T \neq 0$ et $\frac{\partial G}{\partial T} = -s$ donc $(s_g - s_l) = \frac{\partial G_l}{\partial T} - \frac{\partial G_g}{\partial T}$ on a donc discontinuité de la dérivée.
- ▷ *Pourquoi pas de point critique solide/liquide ?* La transition solide liquide est plus "abrupte", on doit casser des interactions pour devenir liquide tandis que la transition liquide/gaz demande un changement moins grand.
- ▷ *Similitude entre modèle d'Ising et transition liquide/gaz ?* Graphe avec construction de Maxwell, hystérésis. Mêmes exposants critiques => même classe d'universalité (c'était plutôt ça qui était attendu).
- ▷ *Peux-tu parler de théorie de Landau ?* On décompose le potentiel thermodynamique F en fonction d'un paramètre d'ordre $F = F_0 + \alpha s^2 + \beta s^4$ et on cherche à le minimiser.
- ▷ *Comment représenter les états métastables sur les diagrammes de phases ?* A trois dimension par des points cols. A deux dimensions, on pourrait tracer les domaines de métastabilité dans lesquels il n'y a pas transition. Il faudrait définir un critère ... Peu convaincant.

- ▷ *Comment peut-on réutiliser la chauffeuse ?* La transition solide/liquide nécessite un apport d'énergie. Si on fait bouillir la chauffeuse, on lui apporte de l'énergie et donc on peut le rendre de nouveau métastable.
- ▷ *La chauffeuse est-elle vraiment siège d'une transition de phase ? $L = \Delta rH^\circ$ de la mise en solution ?* OUI.
- ▷ *Comment démontre-t-on que $P=P(T)$?* Seulement pour les corps purs car les changements d'état des corps purs sont mono-variants. Fixer P revient à fixer T par variance. $P = P_{sat}(T)$
- ▷ *Autre application dans le cadre simple du corps pur ?* Machine thermique à changement d'état (très au programme de L2). On tire partie des changements d'états.
- ▷ *Transition isotrope-neumatique peut-être plutôt en ouverture ?* Peut-être traiter un exemple plus en profondeur et ouvrir sur les transitions plus exotiques.
- ▷ *Pourquoi la courbe de séparation solide/liquide d'un diagramme PT est quasi verticale ?* On ne peut pas négliger les volumes molaires des deux phases, le dénominateur est donc quasi nul d'où la valeur de pente.
- ▷ *Comment définit-on la chaleur latente pour une transition ferro-para ?* On ne peut pas forcément le faire il existe des pseudo-relations de Clapeyron qui donnent des équivalents de la chaleur latente pour d'autres transitions.
- ▷ Attention, le diagramme (P, V) est le diagramme de Watt (lequel est conditionné par une utilisation, un volume) tandis que le diagramme de Clapeyron représente (P, V_m) . Le volume massique (ou molaire) est le paramètre d'ordre de la transition.
- ▷ *Qu'est ce qu'une transition de phase quantique ?* C'est une transition de phase à température nulle, en faisant varier B ou P,... (superfluide/isolant de Motte)
- ▷ *Comment faire une étude microscopique du modèle de Van der Waals ?* Un terme répulsif dû au volume propre des molécules (principe d'exclusion de Pauli + répulsion coulombienne). Le terme en $1/r^6$ caractérise l'attraction de longue portée (interaction dipôle-dipôle).
- ▷ *Qu'est ce qu'un fluide à glissement de température ?* C'est un mélange de plusieurs corps dont les températures de changement d'état sont assez proches (exemple dans les frigo). Le palier de changement d'état est penché (on peut tracer un diagramme binaire).
- ▷ *Quelle est l'origine de ferromagnétisme ?* Couplage coulombien entre les électrons, pour écrire la fonction d'onde on doit utiliser un déterminant de Slater. Pas de couplage dipôle/dipôle sinon des températures de Curie trop basse (pas d'aimants à température ambiante).
- ▷ *Pourquoi la transition ferro/para utilise F et pas G ?* F dépend de T et V tandis que G dépend de T et P. En pratique, on travaille à volume fixé car les phases sont condensées.
- ▷ *Comment on traite la transition ferro/para ? Quelle est l'approximation de champ moyen ?* On considère que les spins sont soumis à un champ de spin moyen ce qui est valable quand la coordinence est élevée (au moins en 3D). Les systèmes bidimensionnels ont des propriétés particulières (par exemple le champ moyen ne marche pas très bien).
- ▷ Le passage $\Delta H = T\Delta S \Rightarrow \Delta h = T\Delta s$ n'est vrai que si le système est homogène.
- ▷ Essayer de gagner du temps sur la première partie pour avoir plus de temps pour les applications. La démonstration de Clapeyron est à garder au tableau (histoire de faire un calcul) mais certaines définitions/techniques peuvent être placées sur slide. Bonne utilisation pour les applications quotidiennes. Revoir la définition d'un changement de phase (sur slide).

- ▷ *Autre corps avec une pente négative pour la transition Solide-Liquide ?* Eau et Bismuth.
- ▷ *A quoi ca sert que l'eau ait une chaleur latente élevée ?* Excellent caloporteur. Cela permet de faire de bons échangeurs.
- ▷ *Hypothèses du modèle du Gaz parfait ?* Pas d'interaction entre les molécules dont le rayon est "nul", les molécules sont ponctuelles.
- ▷ Application en chimie : Transition solide/liquide avec une recristallisation.