

Les billes sauteuses ou comment modéliser des transitions de phase et des instabilités (10 points)

Avant de commencer cette épreuve, veuillez lire les instructions générales contenues dans l'enveloppe séparée

Introduction

Les transitions de phase sont bien connues dans la vie de tous les jours si l'on pense par exemple à l'eau qui peut se trouver dans différents états : solide, liquide ou gazeux. Ces différents états sont séparés par des transitions de phases durant lesquelles le comportement collectif des molécules change. Un tel changement de phase est toujours associé à une température de transition à laquelle l'état change ; en reprenant l'exemple de l'eau, cela correspond aux températures de solidification et d'ébullition.

Les transitions de phase sont très répandues et observables dans bon nombre de systèmes, comme les aimants ou les supraconducteurs où, en-dessous d'une température de transition, l'état macroscopique passe du paramagnétisme au ferromagnétisme, ou encore d'un conducteur "normal" à un supraconducteur.

On peut décrire l'ensemble de ces transitions au moyen d'un formalisme commun en introduisant ce qu'on appelle un paramètre d'ordre. Pour le magnétisme par exemple, le paramètre d'ordre correspond à l'alignement des moments magnétiques des atomes, qui induit une aimantation macroscopique.

Lors d'une transition de phase dite continue, le paramètre d'ordre est toujours nul au-dessus de la température critique, et il croît continûment en-dessous de cette température, comme indiqué dans la Fig. 1 pour un aimant. La température de transition d'une transition de phase continue est appelée température critique. La Fig. 1 comporte également un schéma de l'ordre/du désordre microscopique dans le cas d'un aimant où les moments magnétiques individuels s'alignent dans l'état ferromagnétique - donnant ainsi naissance à une aimantation macroscopique - alors qu'ils sont désordonnés dans la phase paramagnétique ce qui mène à une aimantation macroscopique nulle.

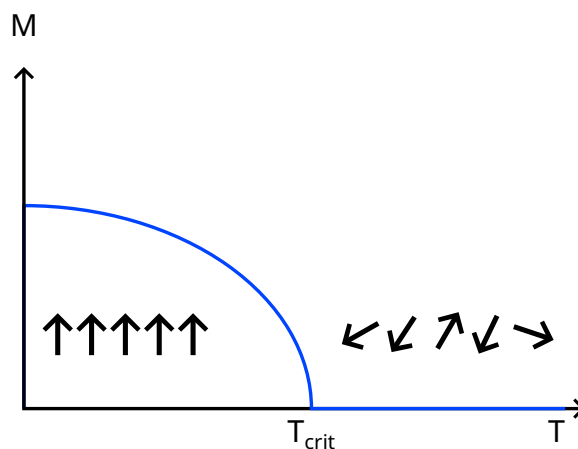


Figure 1 : Représentation schématique de la dépendance en température d'un paramètre d'ordre M lors d'une transition de phase. En-dessous de la température critique T_{crit} , le paramètre d'ordre croît et est non nul, alors qu'il est nul au-dessus de la température critique T_{crit} .

Dans le cas des transitions de phase continues, on montre que le paramètre d'ordre suit une loi de

puissance au voisinage de la transition. Dans l'exemple du magnétisme, l'aimantation M en-dessous de la température critique T_{crit} est donnée par :

$$M \begin{cases} \sim (T_{\text{crit}} - T)^b, & T < T_{\text{crit}} \\ = 0, & T > T_{\text{crit}} \end{cases} \quad (1)$$

avec T la température. Ce qui est d'autant plus stupéfiant, c'est que ce comportement est universel : le paramètre d'ordre suit non seulement une loi de puissance, mais l'exposant de cette loi est le même pour différents types de transition de phase.

Expérience

Nous allons considérer un exemple simple pour lequel plusieurs caractéristiques des transitions de phase continues peuvent être étudiées ; nous allons ainsi voir comment une instabilité mène à un comportement collectif des particules et donc à la transition de phase, ou encore de quelle manière le changement macroscopique dépend de l'excitation des particules.

Dans les transitions de phases habituelles, cette excitation est en principe influencée par la température. Dans notre exemple, l'excitation correspond à l'énergie cinétique des particules accélérées par la vibration d'un haut-parleur. Le changement macroscopique lié à la transition de phase correspond ici au tri des particules dans une seule des deux moitiés du cylindre, par ailleurs séparées par une petite paroi.

En augmentant l'amplitude depuis le moment où les particules se sont regroupées dans une moitié du cylindre, vous allez remarquer que ces particules vont finir par se distribuer également entre les deux moitiés. En reprenant notre analogie, cela correspond à avoir chauffé au-delà de la température critique.

Votre objectif va donc consister à déterminer l'exposant critique pour le modèle de transition de phase étudié ici.

Liste du matériel

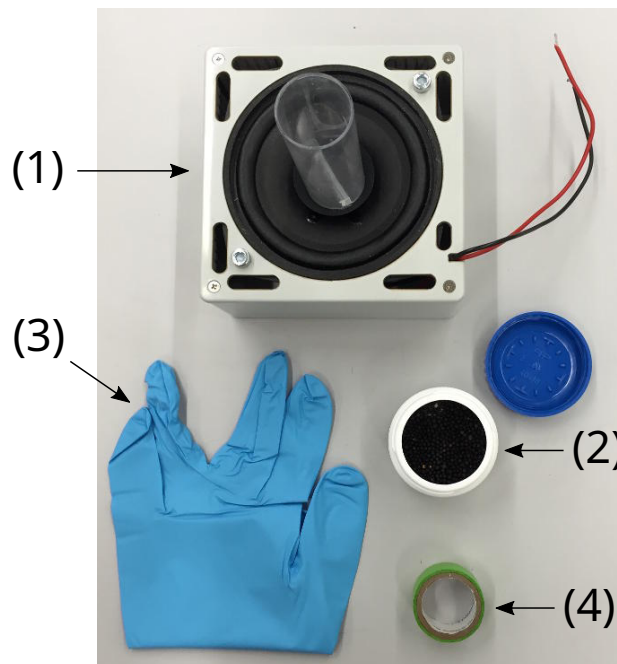


Figure 2 : Matériel additionnel pour l'expérience.

1. Haut-parleur avec un cylindre en plastique fixé au-dessus.
2. Une centaine de graines de pavot dans un récipient en plastique
3. Gant
4. Ruban adhésif

Précautions importantes

- N'appliquez aucune force latérale excessive sur le cylindre en plastique fixé au haut-parleur. Notez bien qu'aucun dispositif ne sera échangé dans le cas d'une membrane déchirée ou d'un cylindre descellé.
- Eteignez le haut-parleur lorsque vous ne l'utilisez pas, et ce afin d'éviter de vider la batterie inutilement.
- Dans cette expérience, un signal en dents de scie de 4 Hz est envoyé au haut-parleur via les sorties situées sur le côté du générateur.
- On peut ajuster l'amplitude du signal en dents de scie au moyen du potentiomètre de droite (*speaker amplitude* (4)). Une tension constante proportionnelle à l'amplitude du signal est produite entre la sortie *speaker amplitude* (6) et la sortie *GND* (7). Les numéros font référence à l'image (Fig. 2) donnée dans les instructions générales.
- La membrane du haut-parleur est fragile. Surtout, ne lui appliquez strictement aucune pression inutile.

Partie A. Amplitude d'excitation critique (3.3 points)

Connectez tout d'abord le haut-parleur à la sortie du générateur de signal située sur le côté (assurez-vous d'utiliser la bonne polarité). Remplissez le cylindre fixé au haut-parleur avec des graines de pavot (par ex. 50), et en coupant un morceau du gant fourni, fermer le sommet du cylindre pour maintenir les graines à l'intérieur du cylindre. Démarrez l'excitation au moyen de l'interrupteur et ajustez l'amplitude en tournant le potentiomètre de droite (*speaker amplitude* (4)) au moyen du tournevis fourni. Observez le tri des graines entre les deux moitiés du cylindre, en testant différentes amplitudes d'excitation.

Votre première tâche va consister à déterminer l'amplitude critique d'excitation de cette transition. Pour ce faire, vous devez déterminer le nombre de billes N_1 et N_2 dans les deux moitiés du cylindre (en prenant $N_1 \leq N_2$) en fonction de l'amplitude affichée A_D de la tension mesurée sur la sortie *speaker amplitude* (6). Cette tension est proportionnelle à l'amplitude de l'onde en dents de scie qui excite le haut-parleur. Faites au moins 5 mesures par valeur de tension.

Remarque :

- Afin de pouvoir observer la dynamique des particules que vous étudiez, n'utilisez que des amplitudes correspondant à des tensions (*speaker amplitude*) supérieures à 0.7 V. Observez le comportement du système en faisant varier la tension suffisamment lentement et sans compter le nombre de graines. Il est possible que certaines graines restent collées sur le fond du cylindre par attraction électrostatique : ne tenez pas compte de ces graines dans le décompte.

A.1	Reportez vos mesures des nombres de particules N_1 et N_2 dans chaque moitié du récipient dans le Tableau A.1 , et ce pour différentes amplitudes A_D .	1.2pt
------------	--	-------

A.2	Calculez l'incertitude sur vos mesures de N_1 et N_2 et reportez vos résultats dans le Tableau A.1 . Tracez N_1 et N_2 en fonction de l'amplitude affichée A_D dans le Graph A.2 , en y incluant leurs incertitudes.	1.1pt
------------	--	-------

A.3	A l'aide du graphe A.2, déterminez l'amplitude critique $A_{D,crit}$ à laquelle N_1 et N_2 sont égaux après un temps suffisamment long pour qu'un état stationnaire soit atteint.	1pt
------------	---	-----

Partie B. Calibration (3.2 points)

L'amplitude A_D est celle de la tension appliquée au haut-parleur. Cependant, la grandeur physique qui nous intéresse est la distance A parcourue lors d'une oscillation du haut-parleur puisqu'elle détermine le degré d'excitation des particules. Pour cela, vous devez donc calibrer l'amplitude affichée en volts. Vous êtes libre d'utiliser n'importe quel matériel/outil à disposition.

B.1	Esquissez le dispositif que vous utilisez pour mesurer l'amplitude d'excitation, c'est-à-dire la distance maximum A (en mm) que parcourt le haut-parleur sur une période d'oscillation.	0.5pt
------------	---	-------

B.2	Déterminez l'amplitude A en mm pour un nombre adéquat de mesures, autrement dit tracez l'amplitude A en fonction de l'amplitude A_D dans le Tableau B.2 et indiquez les incertitudes sur vos mesures.	0.8pt
------------	--	-------

B.3	Tracez vos données dans le Graphe B.3 , en y incluant les incertitudes.	1.0pt
B.4	Déterminez les paramètres de la courbe obtenue et donnez la fonction de calibration $A(A_D)$.	0.8pt
B.5	Déterminez l'amplitude d'excitation critique A_{crit} des graines de pavot.	0.1pt

Partie C. Exposant critique (3.5 points)

Dans notre système, la température correspond à l'énergie cinétique apportée à l'excitation. Cette énergie est proportionnelle au carré de la vitesse du haut-parleur, c-à-d à $v^2 = A^2 f^2$, où f est la fréquence des oscillations. Nous allons à présent tester cette dépendance et déterminer l'exposant b de la loi de puissance qui régit le comportement du paramètre d'ordre (cf Eq. 1).

C.1	Le déséquilibre $\left \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right $ est un bon candidat comme paramètre d'ordre de notre système, puisqu'il est nul au-dessus de l'amplitude critique et égal à 1 à basse excitation. Déterminez ce paramètre d'ordre en fonction de l'amplitude A . Reportez vos résultats dans le Tableau C.1 .	1.1pt
C.2	Tracez le déséquilibre $\left \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right $ en fonction de $ A_{\text{crit}}^2 - A^2 $, sur le Graphe C.2 dont les deux axes ont des échelles logarithmiques. Vous pouvez utiliser le Tableau C.1 pour effectuer vos calculs. Linéarisez le graphique afin de le faire correspondre à l'expression donnant l'exposant critique.	1pt
C.3	Déterminez l'exposant b et estimez l'incertitude correspondante.	1.4pt