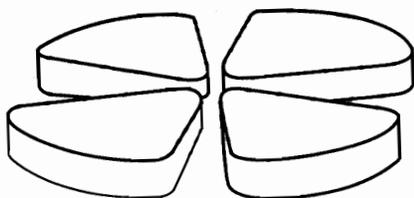


GANIL

GANIL-P-01-14



Changement de phase à Lilliput

Philippe CHOMAZ

GANIL, BP 5027, 14076 CAEN Cedex 5

NAME	ID No.	M.S.

REVISIT TO FERMILAB

GANIL P 01 14



FERMILAB

OCT 17 2001

Changement de phase à Lilliput

Philippe CHOMAZ

GANIL, BP 5027, 14076 CAEN Cedex 5

Quand on chauffe un liquide, on observe que sa température augmente jusqu'au moment où il est porté à ébullition (figure 1). L'accroissement de température s'arrête alors miraculeusement car toute la chaleur est alors utilisée pour transformer le liquide en vapeur. Cette propriété, très étrange si on y réfléchit, est bien utile pour la cuisson au bain-marie ! Vous êtes-vous jamais interrogé sur l'origine de ce comportement étrange ?

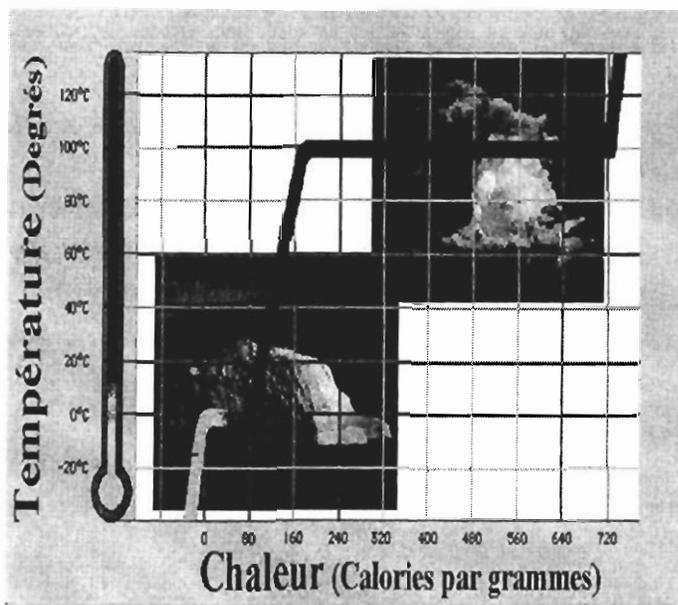


Figure 1 : Quand on chauffe de la glace, les divers changements de phase sont caractérisés par des paliers de température. Si l'on ne contrôle pas l'énergie fournie au système mais que l'on place celui-ci dans un four, ces paliers ne sont pas observables car si on est à peine en dessous de la transition, on se trouve à gauche du palier alors que si on est juste au dessus de cette température on voit la partie droite. Il y a un saut brutal dans l'énergie du système. C'est la chaleur latente d'une transition du premier ordre.

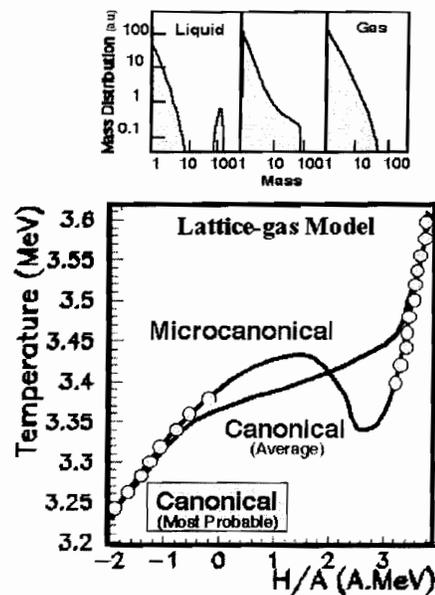
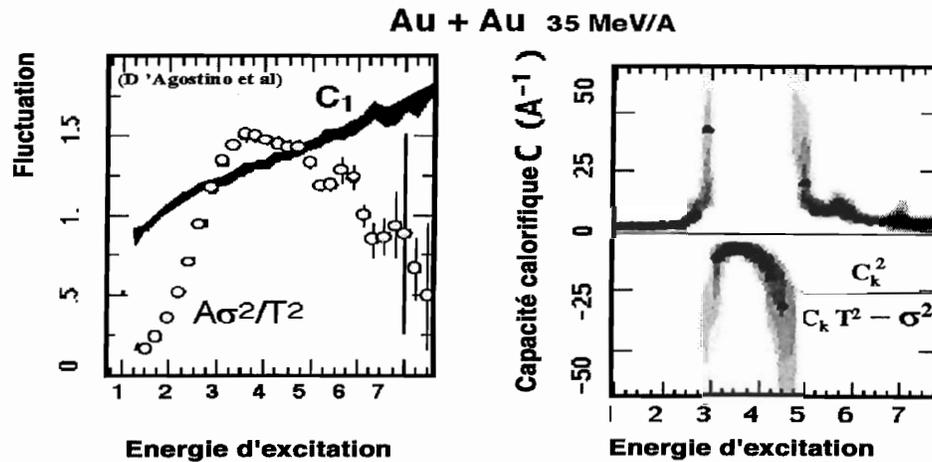


Figure 2 : dans les petits systèmes (ici un calcul modèle de gaz et de liquide sur un réseau contenant 200 particules), quand l'énergie par particule augmente - courbe microcanonique - la température (convertie en énergie après multiplication par la constante de Boltzmann) peut décroître lors d'un changement d'état. Si le système est placé dans un four l'énergie moyenne suit la courbe rouge alors que la plus probable saute brutalement (point jaune).

Au cœur de l'atome, le noyau. Dans le noyau, une matière deux cent mille milliard de fois plus dense que l'eau, la matière nucléaire constituée de protons et de neutrons. Pour explorer les propriétés thermiques et mécaniques de cette matière nucléaire, les chercheurs utilisent les collisions entre noyaux provoquées à l'aide d'accélérateurs de particules. À basse température, les protons et neutrons se condensent en gouttelettes : les noyaux. En excitant de plus en plus les noyaux, ils finissent par se vaporiser.

Il a récemment été proposé [1] de mesurer directement la capacité calorifique des systèmes nucléaires fragmentés en observant les fluctuations de l'énergie cinétique. En effet, pour une énergie totale constante, l'agitation thermique est un réservoir d'énergie pour les interactions. Les échanges d'énergie étant régis par les capacités calorifiques, les fluctuations de cette énergie partielle (l'énergie cinétique) sont une mesure de ces capacités. Quand le système a une capacité calorifique négative, il hésite entre liquide et gaz. Son énergie d'interaction fluctue et l'agitation thermique varie de conserve. Les fluctuations de l'agitation thermique en présence d'un changement d'état deviennent ainsi plus grandes que celles attendues en l'absence de transition.



- FIGURE - 4 -

Partie gauche : comparaison entre les fluctuations observées dans l'expérience et la prédiction canonique C_1 (voir texte). Partie droite : capacité calorifique du système extraite en utilisant la formule (3) ; la zone grisée prend en compte les différentes erreurs alors que les points n'utilisent que la valeur moyenne.

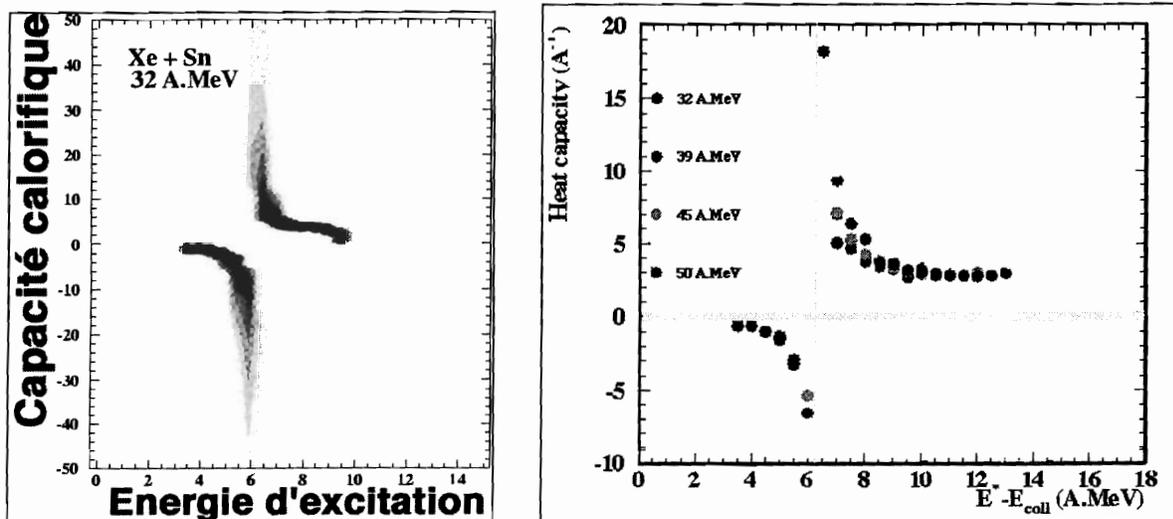
Cette procédure vient d'être appliquée avec succès à plusieurs expériences. La figure 4 présente un exemple d'une telle analyse pour la fragmentation de projectiles d'or sur une cible d'or. Ces données ont été mesurées à MSU aux Etats Unis par le détecteur MULTICS-MINIBALL [2]. Bien que l'énergie de bombardement soit fixe (35 MeV par nucléon) les collisions périphériques correspondent à toute une gamme d'énergies

d'excitation. En effet, le projectile et la cible n'ont qu'un bref contact durant lequel une partie de leur énergie cinétique est dissipée en chaleur. Deux noyaux chauds sont formés. Dans cette expérience, seul le noyau projectile a été étudié.

La présence d'une transition de phase est trahie par un pic de fluctuation de l'agitation thermique σ_c^2 qui dépasse la valeur attendue (canonique) $\bar{\sigma}_c^2 = C_c T^2$. C'est exactement ce que nous observons sur la figure 3. Dans le cadre de cette analyse, la région où la fluctuation est anormalement grande est au milieu de la zone de transition liquide gaz.

En suivant cette philosophie on peut ainsi extraire la capacité calorifique du système. Dans la région où σ_c^2 est nettement plus fort que $\bar{\sigma}_c^2 = C_c T^2$, la capacité calorifique totale est négative. Cette branche négative est entourée de deux divergences là où $\sigma_c^2 = \bar{\sigma}_c^2$.

Des résultats analogues pour le système formé lors de collisions frontales entre un faisceau de xénon à 32 MeV par nucléon et une cible d'étain sont présentés sur la figure 4 ainsi qu'une systématique à plusieurs énergies. Ces résultats ont été obtenus au GANIL avec le détecteur INDRA [3]. Dans le cas de collisions frontales, les deux noyaux fusionnent en un seul système chaud. Quelques particules ne participent pas à la formation du système équilibré. Elles emportent peu d'énergie, ce qui permet d'étudier un système d'énergie variable mais dans une gamme beaucoup plus étroite que celle obtenue dans l'expérience décrite précédemment. Pour couvrir une large gamme il faut utiliser plusieurs énergies incidentes (partie droite de la figure).



- FIGURE - 5 -

Capacité calorifique du système extraite en utilisant les fluctuations d'énergie pour le système Xe+Sn à 32 MeV/A (gauche) et pour une série d'énergie (droit).

Il est important de souligner que ces analyses font appel à une méthode inédite. Elle demande maintenant un travail collectif de critique, d'amélioration et de contrôle. De nouveaux tests de l'équilibre et une meilleure connaissance des propriétés du système au moment où les fragments se forment, en particulier son volume et son énergie d'excitation, sont nécessaires. Ce travail est actuellement entrepris tant du point de vue expérimental que théorique.

Les enjeux sont grands. Si ces résultats sont confirmés, la première observation d'une capacité calorifique négative aurait été effectuée grâce aux noyaux chauds. L'outil des fluctuations maîtrisé ouvrirait la porte à une véritable métrologie de l'équation d'état et du diagramme de phases des noyaux. Mais, dans tous les cas, ces étonnants petits systèmes qui refroidissent quand on les chauffe changent notre compréhension de la thermodynamique et des transitions de phase. Pas de bain-marie à Lilliput.

[1] Ph. Chomaz et F. Gulminelli, *Nucl. Phys. A*647 (1999) 153.

[2] M. D'Agostino et al., *Phys. Lett. B*473 (2000) 219.

[3] N. Le Neindre, R. Bougault et al., (coll. INDRA) *Comptes rendus du XXXVIII meeting d'hiver de physique nucléaire, Bormio (Italie) 2000*, p.404 et thèse Caen 1999.

Encadré : Comment reconstruire les fluctuations de l'agitation thermique.

Après une collision entre ions lourds, les physiciens détectent tous les fragments émis grâce à des appareillages spécifiques. Pour reconstruire les fluctuations de l'agitation thermique à l'instant où le système nucléaire produit par la collision se fragmente, il faut suivre une procédure expérimentale bien définie dont chaque étape doit être contrôlée de façon critique :

- *Isoler une source de masse et d'énergie d'excitation connues en triant les événements et en procédant à une étude calorimétrique ;*
- *Contrôler que cet état est compatible avec un état d'équilibre ;*
- *Utiliser l'information mesurée pour reconstruire les propriétés du système à l'instant où il s'est fragmenté ; en particulier on peut reconstruire la masse et la charge des fragments tels qu'ils existaient à ce moment-là ;*
- *Calculer un bilan de masse pour chaque événement et en déduire la composante de l'énergie qu'il faut fournir pour former cette partition en plusieurs fragments et l'énergie de la répulsion électrique de ceux-ci ; le reste de l'énergie disponible est réparti en énergie d'excitation interne et en mouvement des fragments les uns par rapport aux autres, ces deux contributions pouvant être vues comme l'agitation thermique globale.*

La valeur moyenne de l'agitation thermique fournit un thermomètre. L'évolution de la température de cette agitation en fonction de l'énergie correspondante permet de calculer les fluctuations attendues dans un cas normal, c'est-à-dire si le système était placé dans un bain thermique. En comparant cette fluctuation attendue et celle réellement observée, on peut déduire la capacité calorifique du système. En particulier, l'observation d'une fluctuation plus grande que celle attendue démontre l'existence d'une transition de phase. La capacité calorifique est négative.