# SYNCHRONISATION DANS DES RÉSEAUX OPTIQUES NON DISSIPATIFS

**Daniel Hennequin et Philippe Verkerk**

*Laboratoire PhLAM, UMR CNRS 8523, Université de Lille1,*
*59655 Villeneuve d'Ascq cedex, FRANCE*

daniel.hennequin@univ-lille1.fr

## RÉSUMÉ

Nous examinons ici la dynamique complexe des atomes froids dans un réseau optique carré, en nous attachant à déterminer l'origine des écarts en comportement observé pour des réseaux apparemment similaires : selon le décalage en fréquence du réseau par rapport à la fréquence atomique, on observe des régimes complètement chaotiques ou au contraire l'absence totale de chaos. Nous montrons que la présence de chaos peut être inhibée par un mécanisme de synchronisation de la dynamique dans les deux directions de l'espace, similaire au mécanisme d'accrochage de fréquences des systèmes dissipatifs. Cette synchronisation explique la disparition du chaos lorsque les fréquences propres de la dynamique dans les deux directions de l'espace sont proches l'une de l'autre.

**MOTS-CLEFS :** *atomes froids ; réseau optique ; chaos*

Les réseaux optiques représentent un des outils les plus performants pour manipuler des atomes froids, grâce à leur extrême flexibilité. On peut par exemple modifier les paramètres de confinement des atomes et leur densité en jouant sur la maille du réseau ou la profondeur des puits, et maitriser leurs mouvements en adaptant la géométrie du réseau. De ce fait, les réseaux optiques sont devenus un système modèle pour de nombreux domaines. Quand ils interagissent fortement, les atomes froids dans un réseau optique présentent de nombreuses analogies avec les systèmes de la matière condensée. Ils ont permis d'observer la transition de phase quantique entre un superfluide et un isolant de Mott [1], le régime de Tonks-Girardeau [2], et plus généralement d'étudier les propriétés de la superfluidité, y compris les instabilités.

À l'opposé, des comportements intéressants sont aussi observés dans des réseaux où les atomes n'interagissent pas entre eux. Par exemple, les atomes froids dans des réseaux optiques ont permis d'observer la transition entre des distributions gaussiennes et des lois de puissance, en particulier la distribution de Tsallis [3]. Ils ont aussi permis l'observation de la localisation d'Anderson [4]. Ils apparaissent aussi comme un système modèle idéal pour étudier la dynamique dans les limites classique et quantique. Dans les réseaux optiques non dissipatifs, les limites classique et quantique sont toutes deux accessibles expérimentalement, et il est même possible de changer continument d'un régime à l'autre [5]. De plus, l'extrême flexibilité des réseaux optiques permet d'imaginer un nombre pratiquement infini de configurations en jouant sur la complexité du réseau et le degré de couplage entre les atomes et le réseau. De nombreux résultats ont été obtenus ces dernières années dans le domaine du chaos quantique, la plupart du temps en utilisant des potentiels très simples, en général 1D. Par exemple, le chaos n'est obtenu qu'en forçant périodiquement (ou quasi-périodiquement) l'amplitude ou la fréquence d'un réseau, et seule la dynamique temporelle des atomes individuels est étudiée [5,6].

Récemment, il est apparu nécessaire d'introduire des potentiels plus complexes, en particulier des potentiels 2D [7]. Bien que la dynamique des particules dans des potentiels 2D ait été largement étudiée dans le passé, il s'agissait en général de potentiels modèles [8,9]. Les réseaux optiques expérimentaux approchent ces modèles au mieux sur un intervalle limité de paramètres, au fond des puits. Mais dans la plupart des cas, le potentiel est plus complexe, et mène à une dynamique plus complexe et plus riche. Comprendre finement la dynamique classique des atomes dans des potentiels réels est important, notamment parce qu'elle a des conséquences importantes sur le régime quantique correspondant. Or, l'approche habituelle pour l'étude de la dynamique complexe des systèmes conservatifs est statistique. On va par exemple évaluer le pourcentage de la zone chaotique dans l'espace des phases. Pourtant, une approche plus déterministe est possible, comme dans les systèmes dissipatifs. Dans un travail récent, l'étude de la dynamique des atomes dans différents potentiels 2D a montré qu'il existait différents types de régimes chaotiques, menant à des comportements macroscopiques différents. En particulier, il apparaît que le temps de vie des atomes dans le réseau dépend drastiquement de leur dynamique, ce qui passe inaperçu dans une approche uniquement statistique [10].

Dans un réseau résultant de l'interférence entre deux ondes stationnaires orthogonales, la maille est carrée, et les deux directions de l'espace sont fortement couplées. Par conséquent, on s'attend à ce que la dynamique soit complètement chaotique dès que l'anharmonicité devient suffisamment élevée, c'est à dire pour les atomes suffisamment énergétiques. Ce régime est effectivement observé, sauf dans les réseaux dont la fréquence est décalée vers le rouge de la transition atomique. Dans ce cas, le chaos disparaît presque complètement et la dynamique reste essentiellement quasi-périodique, bien que les non linéarités restent les mêmes.

Nous avons essayé de comprendre l'origine de la disparition du chaos. Nous montrons que, au fond des puits, les fréquences de résonance dans les deux directions sont dégénérées. Évidemment, quand l'énergie des atomes augmente, cette dégénérescence disparaît à cause de l'anharmonicité du potentiel. Cependant, nous montrons que les mouvements dans les deux directions restent accrochés à la même fréquence, selon un mécanisme de synchronisation proche de l'accrochage en fréquence des systèmes dissipatifs. Bien sûr, à cause de la conservation de l'énergie, il ne s'agit pas d'un accrochage strict, mais il apparaît que le régime quasi-périodique est essentiellement un régime périodique accroché en fréquence, avec de petites bandes latérales. Même au bord des puits, le chaos apparaît de façon très marginale, dans un régime où les fréquences restent accrochées. Ce phénomène de synchronisation, bien que pas aussi strict que dans un système dissipatif, est cependant un mécanisme suffisamment puissant pour expliquer la disparition du chaos dans ce cas.

## RÉFÉRENCES


[1] M. Greiner, O. Mandel, T. Esslinger, T. W. Hänsch and I. Bloch, Nature **415**, 39 (2002 )

[2] B. Paredes, A. Widera, V. Murg, O. Mandel, S. Fölling, I. Cirac, G. V. Shlyapnikov, T. W. Hänsch and I. Bloch, Nature **429**, 277 (2004)

[3] P. Douglas, S. Bergamini. and F. Renzoni, Phys. Rev. Lett. **96**, 110601 (2006)

[4] J. Billy, V. Josse, Z. C. Zuo, A. Bernard, B. Hambrecht, P. Lugan, D. Clement, L. Sanchez-Palencia, P. Bouyer and A. Aspect, Nature **453** 891-894 (2008) ; J. Chabe, G. Lemarie, B. Gremaud, D. Delande, P. Szriftgiser, and J. C. Garreau, Phys. Rev. Lett. **101** 255702 (2008)

[5] D. A. Steck, V. Milner, W. H. Oskay, and M. G. Raizen, Phys. Rev. E **62**, 3461 (2000)

[6] H. Lignier, J. Chabe, D. Delande, J. C. Garreau and P. Szriftgiser, Phys. Rev. Lett **95**, 234101 (2005)

[7] H. Guo, Y. Wen and S. Feng, Phys. Rev. A **79**, 035401 (2009)

[8] D. K. Chaikovsky and G. M. Zaslavsky, Chaos **1**, 463 (1991)

[9] N. C. Panoiu, Chaos **10**, 166 (2000)

[10] D. Hennequin and P. Verkerk, Phil. Trans. R. Soc. A **368** 2163-2177 (2010)