

Introduction générale

Ma thèse porte sur l'étude des gaz d'atomes froids, plus précisément sur des systèmes expérimentaux où des ensembles, de quelques dizaines à plusieurs millions, d'atomes sont refroidis jusqu'à des températures proches du zéro absolu. Dans ce régime extrême, les effets quantiques collectifs prennent le dessus et donnent accès à une physique à N corps difficilement accessible autrement [BDZ08]. Ces gaz offrent ainsi un laboratoire exceptionnel pour explorer la mécanique quantique et tester des modèles théoriques complexes. Ils trouvent aussi de nombreuses applications, allant de la métrologie de très haute précision au développement de processeurs quantiques [GLM06], en passant par la simulation de systèmes quantiques dont la dimension de l'espace de Hilbert croît de manière exponentielle avec le nombre de particules, ce qui rend leur traitement classique rapidement inabordable [NC10; Fey82].

Parmi ces systèmes, les gaz atomiques unidimensionnels (1D) constituent une plateforme privilégiée pour l'étude de la physique quantique dans les systèmes de basse dimension. En réduisant drastiquement le mouvement transversal des atomes grâce à des pièges très confinants, leurs degrés de liberté sont figés dans deux directions et le mouvement se limite à une seule dimension. Cette géométrie particulière conduit à des systèmes de type ; modèles de bosons [BI05; KWW04; Hal+09; Ame+08; Jac+11], de fermions [GBL13; Lia+10; Mor+05] ou encore de mélanges multi-composants [Pag+14]. Leur intérêt réside notamment dans la possibilité d'établir des comparaisons directes avec des descriptions théoriques et numériques très précises, mais aussi dans leur rôle de systèmes analogues pour comprendre des matériaux de basse dimension tels que les chaînes de spins, les nanofils supraconducteurs ou les réseaux de jonctions Josephson. Dans les expériences menées au **Laboratoire Charles Fabry (LCF)**, ces gaz 1D sont réalisés en piégeant des atomes de rubidium 87 à l'aide de champs magnétiques générés par des microstructures déposées sur une puce atomique.

La restriction à une dimension unique entraîne des propriétés singulières pour les gaz atomiques. Ainsi, les fluctuations quantiques y sont fortement amplifiées, ce qui empêche la formation d'une condensation de Bose-Einstein à température nulle (qBEC). Certains de ces systèmes 1D présentent également une intégrabilité : ils possèdent autant de quantités conservées que de degrés de liberté. Cette caractéristique se traduit par une dynamique particulière, contrairement aux systèmes ergodiques. Ces gaz ne tendent pas vers un état thermique classique, mais vers un état décrit par des fonctions conservées dont les distributions de rapidités, qui codent l'ensemble des constantes de mouvement du système.

Ma thèse s'est concentrée sur l'étude d'un gaz 1D de bosons avec interactions de contact répulsives, un système intégrable étudié initialement par Lieb et Liniger [LL63; Lie63]. Les états propres de ce modèle, obtenus via l'ansatz de Bethe, sont décrits par des rapidités qui peuvent être interprétées comme les vitesses de quasi-particules à temps de vie infini. Dans la limite thermodynamique, l'état relaxé du système est entièrement caractérisé par la distribution de rapidités.

Durant cette thèse, j'ai réalisé une partie des expériences avec Léa Dubois, doctorante ayant travaillé précédemment sur le même dispositif. J'ai contribué à l'étude expérimentale de la distribution de rapidités, ainsi qu'à l'analyse numérique des résultats via des simulations basées sur la théorie Hydrodynamique Généralisée (GHD). Mon apport a notamment porté sur l'étude des fluctuations dans le cadre du formalisme de l'Ensemble de Gibbs Généralisé (GGE) et sur la mise en place d'un potentiel dipolaire permettant de contrôler et moduler la distribution atomique.

Ce mémoire présente les résultats obtenus sur la caractérisation expérimentale et numérique des gaz de bosons 1D, tant à l'équilibre qu'hors équilibre, à travers l'étude de la distribution de rapidités spatialement résolue. Il est structuré en sept chapitres, chacun abordant un aspect spécifique de l'étude, qu'il soit théorique, numérique ou expérimental.

Présentation des chapitres

Chapitre 1 : Modèle de Lieb-Liniger et approche Bethe Ansatz. Ce chapitre introduit de manière pédagogique le modèle de Lieb-Liniger (LL) et l’approche de l’ansatz de Bethe (BA). Il commence par un rappel des notions de première et deuxième quantification pour expliquer la structure de l’Hamiltonien de Lieb-Liniger (LL), en particulier l’interaction de contact. Les états de Bethe sont des états propres de l’Hamiltonien (LL), ainsi que des opérateurs nombre de particules et quantité de mouvement. Ils constituent un point de départ pour l’étude des charges conservées, qui sera développée dans le chapitre suivant [CM11].

Chapitre 2 : Relaxation et Équilibre dans les Systèmes Quantiques Intégrables : de l’Ensemble de Gibbs Généralisé à la Thermodynamique de Bethe. Le chapitre 2 présente le formalisme (GGE) et introduit le formalisme du Bethe Ansatz thermodynamique (TBA) à travers les travaux de Yang et Yang. On y détaille notamment le calcul des moyennes de charges locales et le formalisme nécessaire pour relier l’état intégrable aux distributions de rapidités. Les notions de fluctuations sont évoquées, mais leur étude détaillée est laissée au chapitre 4.

Chapitre 3 : Dynamique hors-équilibre et hydrodynamique généralisée. Le chapitre 3 étend l’étude à la dynamique hors équilibre à l’aide de la théorie (GHD). On y montre comment le formalisme du (GGE) se traduit dans la dynamique, et que les distributions de rapidités restent des quantités conservées, contrairement à l’approche classique de Gibbs.

Chapitre 4 : Fluctuations de la distribution de rapidités dans les états stationnaires du modèle de Lieb-Liniger homogène. Nous avons montré qu’il est possible d’échantillonner correctement le (GGE) en utilisant des simulations de Monte-Carlo. Le principe de fluctuation-réponse est employé pour tester la validité des formules établies dans le régime où le formalisme (TBA) est applicable.

Chapitre 5 : Dispositif expérimental. Ce chapitre présente les aspects expérimentaux de la thèse : lasers, puce atomique, Dispositif de Micromiroirs Digitaux (DMD), etc. Deux expériences principales sont décrites : la première étudie l’évolution d’un nuage initialement piégé dans un potentiel harmonique, dans le régime de quasi-condensation de Bose (qBEC) ; la seconde utilise le (DMD) pour résoudre spatialement la distribution de rapidités et pour préparer des états hors équilibre.

Chapitre 6 : Étude du protocole de bi-partition : Mesure de distribution de rapidités locales $\rho(x, \theta)$ pour des systèmes hors équilibre. Le chapitre 6 se concentre sur l’étude des déformations du profil de densité et des résultats numériques issus des simulations (GHD), permettant de comparer les prédictions théoriques avec les mesures expérimentales.

Chapitre 7 : Potentiel dipolaire et perspectives expérimentales. Le dernier chapitre présente la réflexion sur l’ajout d’un potentiel dipolaire et les perspectives expérimentales associées. On y discute comment ce potentiel permet de préparer des distributions atomiques plus complexes et d’étudier de nouveaux régimes dynamiques.

Bien que chaque chapitre puisse être lu indépendamment, certaines dépendances existent pour une compréhension plus complète :

- Le chapitre 4 s’appuie sur le chapitre 2, lui-même basé sur le chapitre 1.
- Le chapitre 7 se fonde sur le chapitre 6, qui fait référence au chapitre 3, lequel repose sur le chapitre 2.

Bibliographie de l’Introduction

- [Lie63] Elliott H. LIEB. “Exact Analysis of an Interacting Bose Gas. II. The Excitation Spectrum”. In : *Phys. Rev.* 130 (4 mai 1963), p. 1616-1624. DOI : [10.1103/PhysRev.130.1616](https://doi.org/10.1103/PhysRev.130.1616). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.130.1616>.
- [LL63] Elliott H. LIEB et Werner LINIGER. “Exact Analysis of an Interacting Bose Gas. I. The General Solution and the Ground State”. In : *Phys. Rev.* 130 (4 mai 1963), p. 1605-1616. DOI : [10.1103/PhysRev.130.1605](https://doi.org/10.1103/PhysRev.130.1605). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.130.1605>.

- [Fey82] Richard P. FEYNMAN. “Simulating physics with computers”. In : *International Journal of Theoretical Physics* 21.6-7 (juin 1982), p. 467-488. DOI : [10.1007/BF02650179](https://doi.org/10.1007/BF02650179).
- [KWW04] Toshiya KINOSHITA, Trevor WENGER et David S. WEISS. “Observation of a one-dimensional Tonks-Girardeau gas”. In : *Science* 305.5687 (2004), p. 1125-1128. DOI : [10.1126/science.1100700](https://doi.org/10.1126/science.1100700). URL : <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1100700>.
- [BI05] Immanuel BLOCH et IMMANUEL. “Ultracold quantum gases in optical lattices”. In : *Nature Physics* 1 (oct. 2005), p. 23-30. DOI : [10.1038/nphys138](https://doi.org/10.1038/nphys138).
- [Mor+05] Henning MORITZ et al. “Confinement induced molecules in a 1D Fermi gas”. In : *Phys. Rev. Lett.* 94 (juin 2005), p. 210401. DOI : [10.1103/PhysRevLett.94.210401](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.210401). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.94.210401>.
- [GLM06] Vittorio GIOVANNETTI, Seth LLOYD et Lorenzo MACCONE. “Quantum Metrology”. In : *Phys. Rev. Lett.* 96 (1 jan. 2006), p. 010401. DOI : [10.1103/PhysRevLett.96.010401](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.010401). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.96.010401>.
- [Ame+08] A. H. van AMERONGEN et al. “Yang-Yang thermodynamics on an atom chip”. In : *Phys. Rev. Lett.* 100 (mars 2008), p. 090402. DOI : [10.1103/PhysRevLett.100.090402](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.090402). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.100.090402>.
- [BDZ08] Immanuel BLOCH, Jean DALIBARD et Wilhelm ZWERGER. “Many-body physics with ultracold gases”. In : *Rev. Mod. Phys.* 80 (3 juill. 2008), p. 885-964. DOI : [10.1103/RevModPhys.80.885](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.80.885). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.80.885>.
- [Hal+09] Elmar HALLER et al. “Realization of an excited, strongly correlated quantum gas phase”. In : *Science* 325.5945 (sept. 2009), p. 1224-1227. ISSN : 1095-9203. DOI : [10.1126/science.1175850](https://doi.org/10.1126/science.1175850). URL : <http://dx.doi.org/10.1126/science.1175850>.
- [Lia+10] Yean-an LIAO et al. “Spin-imbalance in a one-dimensional Fermi gas”. In : *Nature* 467.7315 (sept. 2010), p. 567-569. ISSN : 1476-4687. DOI : [10.1038/nature09393](https://doi.org/10.1038/nature09393). URL : <http://dx.doi.org/10.1038/nature09393>.
- [NC10] Michael A. NIELSEN et Isaac L. CHUANG. *Quantum Computation and Quantum Information : 10th Anniversary Edition*. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. ISBN : 9781107002173.
- [CM11] Jean-Sébastien CAUX et Jorn MOSSEL. “Remarks on the notion of quantum integrability”. In : *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment* 2011.02 (fév. 2011), P02023. DOI : [10.1088/1742-5468/2011/02/P02023](https://doi.org/10.1088/1742-5468/2011/02/P02023). URL : <https://dx.doi.org/10.1088/1742-5468/2011/02/P02023>.
- [Jac+11] Thibaut JACQMIN et al. “Sub-Poissonian fluctuations in a 1D Bose gas : From the quantum quasi-condensate to the strongly interacting regime”. In : *Phys. Rev. Lett.* 106 (juin 2011), p. 230405. DOI : [10.1103/PhysRevLett.106.230405](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.230405). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.106.230405>.
- [GBL13] Xi-Wen GUAN, Murray T. BATCHELOR et Chaohong LEE. “Fermi gases in one dimension : From Bethe ansatz to experiments”. In : *Rev. Mod. Phys.* 85 (nov. 2013), p. 1633-1691. DOI : [10.1103/RevModPhys.85.1633](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.1633). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.85.1633>.
- [Pag+14] Guido PAGANO et al. “A one-dimensional liquid of fermions with tunable spin”. In : *Nature Physics* 10.3 (fév. 2014), p. 198-201. ISSN : 1745-2481. DOI : [10.1038/nphys2878](https://doi.org/10.1038/nphys2878). URL : <http://dx.doi.org/10.1038/nphys2878>.