

Rapport sur le manuscrit de thèse  
**« Etude de la dynamique hors équilibre des gaz de bosons unidimensionnels »**  
présenté par M. Guillaume THEMEZE

Le manuscrit de M. Thémèze présente une caractérisation à la fois numérique et expérimentale d'un gaz quantique de Lieb-Liniger (LL), ensemble unidimensionnel d'atomes froids en interaction de contact. Ce système à  $N$  corps se distingue par son intégrabilité, qui se traduit notamment par une absence de thermalisation vers un ensemble de Gibbs conventionnel et par une dynamique conservant largement la mémoire des conditions initiales. De manière générale, la dynamique hors équilibre des systèmes intégrables constitue un sujet majeur, où le modèle de LL joue un rôle central. Dans ce contexte, les travaux de l'équipe « puce atomique » du LCFIO, où s'est déroulée la thèse, occupent une position de premier plan. Les expériences réalisées pendant la thèse de M. Thémèze, en particulier, apportent des résultats originaux, notamment des mesures précises de la distribution de rapidités d'un gaz de LL, tant à l'équilibre qu'à l'hors d'équilibre. Ces dernières constituent une confirmation directe de la théorie hydrodynamique généralisée, un cadre récent décrivant la dynamique des systèmes intégrables. La première moitié du manuscrit, consacrée à ce formalisme appliqué au modèle de LL, témoigne d'une bonne maîtrise du sujet par M. Thémèze, bien que certaines sections théoriques manquent de pédagogie, se limitant à des développements formels dont la finalité n'est pas toujours explicite. On peut aussi regretter la présence de trop nombreuses coquilles et maladresses de style. Les chapitres expérimentaux et leur interprétation, en revanche, se distinguent par une qualité nettement supérieure.

En détail, le manuscrit se compose d'une introduction, de sept chapitres et d'une conclusion. L'introduction générale est bien menée, bien que brève. Un état de l'art plus développé sur la physique des gaz quantiques unidimensionnels aurait permis de mieux situer le travail dans son contexte scientifique. L'auteur enchaîne ensuite avec un premier chapitre consacré à la présentation des éléments fondamentaux du modèle de LL. Cette partie est claire et pédagogique : elle part du problème d'interaction à deux particules pour être progressivement généralisée au cas de  $N$  particules. Les notions essentielles à la compréhension du reste du manuscrit — telles que la phase de diffusion, les équations de Bethe ou la distribution de rapidités — sont introduites de manière progressive et accompagnées de discussions physiques pertinentes.

Le second chapitre est dédié à une présentation de l'ensemble de Gibbs généralisé dans le cadre de la thermodynamique de Bethe. Le parti pris par l'auteur est de consacrer l'essentiel de ce chapitre à la construction mathématique des moyennes d'ensemble et à la dérivation des équations intégrales de Bethe. Ce choix est légitime, mais il aurait pu être davantage mis en perspective et motivé dans le contexte global de la thèse. En contraste avec cet effort mathématique, la partie finale du chapitre, qui expose le diagramme de phase du gaz de LL à l'équilibre thermodynamique, apparaît trop concise : on aurait apprécié un peu plus de détails sur la construction de ce diagramme, ainsi qu'un lien plus marqué avec les développements théoriques précédents.

Le troisième chapitre présente la théorie de l'hydrodynamique généralisée (GHD), cadre pertinent pour décrire la dynamique des systèmes intégrables. Bien que relativement court, ce chapitre accorde une place prépondérante à un formalisme mathématique parfois superfétatoire, ce qui tend à masquer les messages physiques et rend l'ensemble peu digeste. Moins de formalisme et quelques exemples concrets d'application de la GHD auraient permis de le rendre plus accessible. Le lecteur a par moments trop l'impression de suivre une succession de dérivations dont la finalité et le lien avec les objectifs généraux de la thèse ne sont pas toujours explicites. La conclusion du chapitre établit néanmoins un lien particulièrement intéressant entre l'hydrodynamique généralisée et l'équation de Gross-Pitaevskii dans la limite d'un gaz dilué.

Le chapitre 4 présente les résultats numériques obtenus par l'auteur sur les fluctuations de la distribution de rapidités. Cette étude, particulièrement pertinente, vise à valider plus finement le concept d'ensemble de Gibbs généralisé (GGE) que ne le permet l'analyse de la seule distribution moyenne. M. Thémèze décrit d'abord la méthode de Monte Carlo employée et en vérifie la validité via la relation fluctuation-réponse appliquée à la distribution de rapidités. Il propose ensuite une analyse numérique détaillée du lien entre la fonction de réponse et l'action effective de Yang-Yang, évaluée au second ordre des fluctuations, dans les cas d'un poids spectral quadratique et d'un poids thermique imposé par un bain extérieur. Les résultats apportent une validation solide du GGE à travers l'étude des fluctuations. On peut toutefois regretter que leur impact soit atténué par une rédaction inégale et, là encore, par certains passages formels inutilement complexes, qui nuisent à la clarté de l'exposé.

Les chapitres 5 et 6 constituent le cœur du travail expérimental de la thèse et forment le point d'orgue du manuscrit. Le chapitre 5 présente le dispositif expérimental et le principe de sélection spatiale du nuage atomique à l'aide d'un DMD. L'auteur y décrit également le contexte de travail de l'équipe et sa propre contribution, une démarche particulièrement appréciable. Le chapitre expose ensuite des mesures d'expansion de paquet d'onde, comparées à une solution auto-similaire de l'équation de Gross-Pitaevskii, ainsi que des mesures de distributions locales de rapidités à l'équilibre obtenues via le DMD. Ces résultats sont d'une grande originalité et les comparaisons avec la théorie GHD impressionnantes. Le chapitre 6 étend cette approche à une configuration hors équilibre, où la distribution de rapidités issue de l'expansion d'une coupure bipartite de densité est déterminée. Les mesures révèlent une asymétrie typique de l'évolution intégrable, et les résultats expérimentaux sont confrontés à des simulations GHD reproduisant le protocole. L'accord global est satisfaisant, les écarts étant attribués à des effets diffusifs brisant faiblement l'intégrabilité ou à de l'échauffement parasite.

Le dernier chapitre du manuscrit se distingue du reste des travaux en présentant une caractérisation théorique préliminaire d'une nouvelle méthode de piégeage du gaz par un potentiel dipolaire. L'auteur y rappelle le principe et la théorie bien connue de l'interaction lumière-matière dipolaire, qu'il applique ensuite aux transitions hyperfines du rubidium. Des contraintes sont établies sur la puissance et la longueur d'onde du laser afin de limiter le chauffage tout en assurant un confinement efficace des atomes. Ces éléments justifient le choix de la source optique et de l'amplificateur envisagés pour les futures expériences de l'équipe. Bien qu'il ne contienne pas de résultats physiques à proprement parler, ce chapitre témoigne d'un travail préparatoire pertinent, pleinement légitime dans le cadre de la thèse. Il est néanmoins dommage que l'auteur n'explique pas plus clairement la motivation du développement de cette nouvelle source de piégeage, notamment au regard du dispositif déjà disponible sur la puce.

En résumé, le manuscrit de thèse de M. Thémèze présente des résultats numériques intéressants sur les fluctuations de distributions de rapidités, ainsi que des mesures expérimentales de tout premier plan de distributions de rapidités, caractérisant notamment les signatures de l'intégrabilité des gaz de Bose unidimensionnels dans des configurations hors équilibre. Ces mesures sont le fruit de plusieurs années de développement expérimental au sein de l'équipe, aboutissant aujourd'hui à des résultats remarquables. Il est toutefois regrettable que ces contributions soient quelque peu ternies par un manuscrit d'une qualité inégale, où le formalisme prend parfois le pas sur la discussion physique, et où l'abondance de coquilles et de maladresses de rédaction nuit à la clarté et à la cohérence d'ensemble. Malgré ces réserves, le travail témoigne d'une bonne maîtrise par M. Thémèze des outils théoriques modernes pour la description des systèmes intégrables, ainsi que d'une bonne compréhension de la physique expérimentale des atomes froids. Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, j'émetts un avis favorable à la tenue de la soutenance de thèse de M. Guillaume Thémèze.

Fait à Paris, le 7 octobre 2025



Nicolas Cherroret

Chargé de recherche au CNRS