

Laurent Vernac
Professeur des Universités à Paris 13
Laboratoire de Physique des Lasers
99 avenue Jean Baptiste Clément
93430 Villetaneuse

Villetaneuse le 15-10-2025

Rapport sur le manuscrit présenté par M. Guillaume Thémèze en vue de l'obtention du titre de Docteur de l'Université Paris-Saclay

Dans son manuscrit, intitulé « Etude de la dynamique hors équilibre des gaz de Bosons unidimensionnels », M. Thémèze présente son travail de thèse, effectué au Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, sous la direction de Mme Isabelle Bouchoule.

Au cours de sa thèse, M. Thémèze a étudié les propriétés d'un gaz de rubidium ultrafroid, en se focalisant sur les effets physiques se manifestant lors d'une excitation de ce système. La géométrie de piégeage, dite à une dimension, confère au système étudié des propriétés spécifiques. En particulier, lorsqu'il est placé hors équilibre il n'évolue pas vers un état d'équilibre thermique, ce qui permet de tester des concepts profonds de physique statistique. Il s'agit d'un domaine de recherche très pointu, dans lequel l'équipe qui a accueilli M. Thémèze a déjà obtenu des résultats de premier ordre, en utilisant un dispositif expérimental complexe produisant des gaz dits quantiques sur une puce atomique.

La thèse de M. Thémèze présente des résultats expérimentaux de première importance, et décrit un cadre théorique sophistiqué pour pouvoir interpréter ces résultats.

Le manuscrit comprend une introduction très courte, sept chapitres, et six Annexes. Concernant la forme, le manuscrit est écrit en français, avec un niveau de langue correct, mais avec de très nombreuses coquilles. La présentation est de bonne qualité, mais les figures sont souvent peu lisibles, voire manquantes. Au total, la lecture du manuscrit s'est révélée très intéressante, mais un peu difficile.

Les quatre premiers chapitres sont théoriques.

Le premier chapitre présente la description en seconde quantification du problème de deux particules bosoniques couplées par des interactions à très courte portée, puis sa généralisation au cas à N particules. La notion de rapidité, qui sera centrale dans l'ensemble du manuscrit, est bien introduite. L'ensemble est assez pointu mathématiquement, mais on arrive à suivre le rédacteur dans sa progression des notions discutées, comme la densité de rapidité, ou la fonction d'occupation.

Le deuxième chapitre traite de la description du système dans le cadre de l'ensemble de Gibbs généralisé, cadre nécessaire pour décrire des états non thermalisés. La notion délicate d'état stationnaire hors équilibre, qui sera celle étudiée expérimentalement dans la suite, est correctement discutée. Si la notion de charge locale conservée aurait pu être mieux précisée, et si certains termes imprécis comme « observable suffisamment locale » sont utilisés, M. Thémèze démontre une bonne maîtrise d'outils mathématiques complexes comme la dérivée fonctionnelle. Cependant certains termes ne sont pas définis (opérateur contractant, itération de

Picard). Une étude de dénombrement débouche sur la notion d'entropie dite de Yang-Yang. Le chapitre se conclut par la présentation pertinente du diagramme des phases du gaz de Bose 1D, mais le lien avec les points précédents du chapitre n'est pas évident, et ce diagramme aurait mérité d'être davantage commenté.

Le troisième chapitre présente une approche de type hydrodynamique pour la description de l'évolution du système, reposant sur l'approximation de densité locale, et faisant appel à des connaissances solides en mécanique des fluides. Un point particulièrement intéressant est la démonstration de l'équivalence entre cette approche, baptisée hydrodynamique généralisée, et l'équation de Gross-Pitaevskii, bien connue dans le domaine des gaz quantiques ; cette équivalence est obtenue dans la limite des faibles interactions, qui est celui étudié expérimentalement. Si la discussion est instructive par morceaux, la cohérence du chapitre dans son ensemble est par contre difficile à appréhender. Concernant la notion de charge globale, on ne sait pas bien si c'est une quantité conservée ou pas dans le système étudié finalement.

Le quatrième chapitre aborde le calcul des fluctuations dans le système : il s'agit d'aller au-delà de la prédiction des valeurs moyennes. M. Thémèze s'appuie sur un principe très général en physique qui est celui de la relation entre fluctuations et réponse linéaire. Sans surprise, les calculs deviennent encore plus complexes, mais sont assez bien expliqués, même si certains termes ne sont pas définis et si des étapes intermédiaires peuvent manquer. Des résultats de simulations numériques permettent de démontrer la vérification du principe évoqué ci-dessus. Mais il est dommage que le sens physique des résultats numériques présentés ne soit pas discuté. De plus si la motivation de ce chapitre sur le plan théorique est très claire, il n'est pas indiqué si certains des résultats pourraient être testés expérimentalement.

Au total, l'ensemble de cette partie théorique est pertinent et apparaît comme globalement maîtrisé. Il est par contre dommage que M. Thémèze n'ait pas indiqué quels passages relèvent d'une approche originale de sa part. De plus, indiquer explicitement pour un résultat théorique donné son lien avec les expériences qui suivent aurait renforcé significativement l'attrait de ces chapitres pour des lecteurs expérimentateurs.

Les chapitres 5, 6 et 7 sont expérimentaux.

Dans le chapitre 5, M. Thémèze décrit son système expérimental, et un premier ensemble de résultats expérimentaux.

La description du système est assez sommaire. Si parfois aller à l'essentiel sur des aspects très communs d'un dispositif d'atomes ultra-froids est justifié, il manque certains détails et la donnée de certaines valeurs numériques pour bien comprendre les particularités de celui de M. Thémèze (valeurs de température, obtention des fréquences de piégeage). En particulier, la réalisation technique de la sélection d'une tranche d'atomes avec un faisceau pousseur, décisive pour les expériences, n'est pas assez détaillée. Enfin, le système d'imagerie n'est pas décrit, et la façon d'obtenir la densité expérimentale linéique $n(x)$ non plus ; or tous les résultats viennent des mesures de $n(x)$.

Les résultats présentés sont très nombreux. La démonstration de la sélection d'atomes contenus dans des tranches du gaz allongé, sans perturbation significative, est claire. L'évolution au cours du temps du profil de densité permet de reconstruire la distribution de rapidité du gaz initialement à l'équilibre, avec un bon accord avec la théorie. Le comportement hydrodynamique du système est testé avec succès. Enfin une expérience très originale permet de révéler sans ambiguïté une absence de thermalisation : en créant une situation très hors

équilibre, puis en sondant la distribution de rapidité de la zone pertinente, une distribution avec deux maxima est obtenue. Cette dernière réalisation, spectaculaire, aurait mérité d'être bien plus longuement expliquée, et discutée : par quoi est fixée l'échelle de temps du développement d'une distribution de rapidité doublement piquée, qu'est-ce qui détermine son extension spatiale, d'où vient l'asymétrie entre les deux maxima mesurés, pourquoi une distribution de rapidité périphérique - qui n'a qu'un maxima - n'a-t-elle pas été mesurée pour montrer une forte hétérogénéité ?

Le chapitre 6 décrit d'autres expériences hors équilibres.

L'état initial est obtenu en créant une zone vide d'atomes non plus dans une zone centrale limitée en taille comme en fin du chapitre 5, mais sur la moitié du nuage initial. La grande différence avec le chapitre précédent est en fait l'utilisation d'un potentiel quartique et non plus quadratique ; ceci n'est pas assez mis en avant. La motivation est d'obtenir une densité initiale plus homogène ; la contrainte portant sur le confinement quadratique à réaliser (pour assurer une homogénéité donnée sur une extension donnée) n'est pas discutée ; une Figure montrant la densité du nuage complet manque pour juger de l'homogénéité obtenue.

Après la création de la quasi-discontinuité initiale (en $x=0$), plusieurs études sont faites.

En analysant l'évolution des profils de densité au voisinage de $x=0$, une démonstration convaincante d'une évolution autosimilaire est obtenue, et la justification théorique est bien expliquée.

Puis comme au chapitre 5 l'évolution de la densité d'une tranche est analysée. La présence d'une asymétrie dans le profil d'expansion pour un temps long est discutée ; si l'analyse est claire, le rapport signal sur bruit obtenu rend la conclusion moyennement convaincante, et la discussion physique sur le lien avec une absence de thermalisation est trop courte. L'ajustement du profil par des courbes théoriques donne lieu à une discussion intéressante sur les effets liés au caractère fini du temps d'expansion, et sur les limites de la modélisation, avec en particulier l'effet d'un chauffage localisé lors de la préparation. L'ajustement avec différentes températures effectives est instructif, mais le grand écart entre ces températures (facteur 3) questionne, et n'est pas commenté. Enfin des simulations numériques sur l'évolution des rapidités synthétisent le savoir-faire acquis par M. Thémèze pour la modélisation de son système.

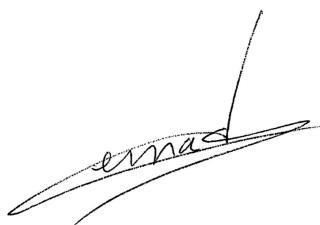
Le chapitre 7 est consacré spécifiquement à une évolution technique envisagée pour l'expérience, sur laquelle M. Thémèze a travaillé en fin de thèse. Le but est de façonne la géométrie du piège dans lequel sont confinés les atomes avec l'utilisation d'un laser de longueur d'onde inférieure à celles des transitions atomiques, afin de générer un potentiel répulsif. Après une présentation générale sur les potentiels lumineux, une étude portant sur le choix du laser est exposée, en discutant des contraintes sur la longueur d'onde à utiliser, et la puissance requise. Ceci est assez classique. Les critères utilisés en termes de profondeur minimale et de taux de diffusion maximal sont crédibles, mais ils auraient dû être justifiés par rapport aux caractéristiques du système expérimental. Un montage optique a été réalisé, il permet d'obtenir un faisceau de puissance appréciable mais peut être insuffisante, avec a priori un profil transverse de bonne qualité : ceci est important pour profiter pleinement des performances de l'optique adaptative qui sera utilisée in fine. Ici on a du mal à suivre pleinement la logique du montage optique, car il manque des informations (focales des lentilles). La nécessité d'utiliser un système de filtrage spatial n'apparaît pas évidente, le faisceau devant passer par une fibre monomode qui de toutes façons se chargera du filtrage. On comprend bien néanmoins l'intérêt de ce développement pour le futur de l'expérience, qui a par ailleurs permis à M. Thémèze de développer un savoir-faire technique pertinent.

Au total M. Thémèze démontre une bonne compréhension du système expérimental déjà construit sur lequel il a travaillé. Il a de plus participé à la remise en place de l'expérience suite à une faille du système fournissant les atomes, ce qui lui a permis de parfaire sa formation expérimentale. On peut souligner la grande honnêteté de M. Thémèze qui met plusieurs fois en avant les réalisations de l'étudiante l'ayant précédé sur l'expérience, mais aussi les contributions de sa directrice de thèse, ou d'autres membres du laboratoire ou encore des extérieurs.

En conclusion

M. Thémèze démontre dans son manuscrit une bonne compréhension de la physique très complexe de son domaine de recherche, ainsi que des compétences de très bon niveau en simulation numérique. Il a participé à des prises de données qui ont débouché sur des résultats expérimentaux très novateurs, et acquis un savoir-faire expérimental en particulier en optique. Il est 2^{ème} auteur d'un article paru dans Physical Review Letters, et également 2^{ème} auteur d'un article soumis à SciPost, pour lequel l'équipe est dans la phase de réponse aux juges-arbitres : sa parution semble proche. Ceci démontre une contribution significative de sa part dans les résultats obtenus par son équipe.

Je donne un avis favorable à la soutenance orale de ses travaux.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Séverine Nicaud". The signature is fluid and cursive, with the name being the most prominent part.