

3D hydrodynamic analysis of Cepheid star pulsations

Auteur : Gérard, Henri

Promoteur(s) : Dupret, Marc-Antoine

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil physicien, à finalité approfondie

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/26160>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

3D Hydrodynamic Analysis of Cepheid Star Pulsations

Henri Gérard

Academic supervisor: Prof. Marc-Antoine Dupret
FACULTY OF APPLIED SCIENCES, UNIVERSITY OF LIÈGE
Master of Science in Engineering Physics
Academic Year 2025–2026

Abstract

Asteroseismology is a rapidly growing field dedicated to the study of stellar pulsations. Among the various classes of pulsating stars, Cepheids occupy a particularly important place owing to their key role as distance indicators. At the same time, one of the major challenges in stellar physics remains the modelling of turbulent convection. Consequently, understanding the interaction between convection and pulsations is an important and still largely unresolved problem.

This thesis presents a comprehensive analysis of this interaction through the study of a high-resolution three-dimensional numerical simulation of a Cepheid convective envelope exhibiting self-excited pulsations. Particular emphasis is placed on identifying and understanding the physical mechanisms responsible for sustaining these pulsations.

The analysis begins with an examination of the radial profiles of the main thermodynamic quantities, together with a study of the horizontal structure of the flow. This first investigation reveals a strongly asymmetric convective pattern, characterised by narrow, intense downflows surrounded by broader and smoother upflows. Such an asymmetry limits the relevance of horizontally averaged radial profiles, as they combine regions exhibiting very different behaviours.

To overcome this limitation, the flow is separated into upflow and downflow regions and analysed independently. This decomposition highlights the dominant role of the downflows in the transport of convective energy.

The thermodynamic cycle associated with the pulsations is then investigated through the study of the work integral and the heat exchanges occurring during the pulsation cycle. While the work integral does not allow any firm conclusion to be drawn, the analysis of the heat supply demonstrates the existence of heat gains during the hot phase and heat losses during the cold phase, resulting in a thermodynamic cycle that sustains the pulsations. This behaviour is dominated by the downflows, whose relative abundance increases during the hot phase as a consequence of the stronger convective instability and enhanced turbulence. Concerning the upflows, signatures of the well-known κ -mechanism can be identified, but its contribution is completely dominated by other processes.

Keywords: Cepheid stars, stellar pulsations, stellar convection, convection-pulsation interaction, 3D hydrodynamical simulations

Résumé

L'astérosismologie est un domaine en plein essor consacré à l'étude des pulsations stellaires. Parmi les différentes classes d'étoiles pulsantes, les Céphéides occupent une place particulièrement importante en raison de leur rôle essentiel comme indicateurs de distance. Parallèlement, l'un des principaux défis de la physique stellaire demeure la modélisation de la convection turbulente. Dès lors, comprendre l'interaction entre convection et pulsations constitue un problème important qui reste encore largement non résolu.

Ce mémoire présente une analyse approfondie de cette interaction à travers l'étude d'une simulation numérique tridimensionnelle à haute résolution de l'enveloppe convective d'une Céphéide présentant des pulsations auto-entretenues. Une attention particulière est portée à l'identification et à la compréhension des mécanismes physiques responsables de l'entretien de ces pulsations.

L'analyse débute par un examen des profils radiaux des principales grandeurs thermodynamiques, complété par une étude de la structure horizontale de l'écoulement. Cette première investigation met en évidence un schéma convectif fortement asymétrique, caractérisé par des écoulements descendants étroits et intenses entourés d'écoulements ascendants plus larges et plus réguliers. Une telle asymétrie limite la pertinence des profils radiaux moyennés horizontalement, ceux-ci combinant des régions présentant des comportements très différents.

Afin de surmonter cette limitation, l'écoulement est séparé en régions ascendantes et descendantes puis analysé indépendamment. Cette décomposition met en évidence le rôle dominant des écoulements descendants dans le transport de l'énergie convective.

Le cycle thermodynamique associé aux pulsations est ensuite étudié à travers l'analyse de l'intégrale de travail et des échanges de chaleur se produisant au cours du cycle pulsatoire. Bien que le comportement de l'intégrale de travail ne permette pas de tirer de conclusion définitive, l'analyse de l'apport de chaleur met en évidence l'existence de gains thermiques durant la phase chaude et de pertes thermiques durant la phase froide, conduisant à un cycle thermodynamique qui entretient les pulsations. Ce comportement est dominé par les écoulements descendants, dont l'abondance relative augmente durant la phase chaude en raison d'une instabilité convective plus marquée et d'une turbulence renforcée. Concernant les écoulements ascendants, des signatures du célèbre mécanisme κ peuvent être identifiées, mais sa contribution demeure totalement dominée par d'autres processus.

Mots-clés : étoiles céphéides, pulsations stellaires, convection stellaire, interaction convection-pulsation, simulations hydrodynamiques 3D