

Les grandes échelles de la convection dans la photosphère solaire

Problématique générale

Why these distinct scales would be present (and possibly a third intermediate scale mesogranulation) is somewhat of a mystery.

T. L. Duvall, 188th AAS Meeting, 1996

La mise en service dans les années 1990 de télescopes dédiés à l'observation du Soleil, comme SOHO ou TRACE, a en grande partie révolutionné les méthodes d'étude de notre étoile. De la structure interne aux couches externes que sont la photosphère ou la couronne, un ensemble considérable de nouveaux phénomènes a pu être observé, l'exemple le plus marquant étant certainement la découverte de la tachocline solaire et « l'imagerie » de la rotation différentielle dans la zone convective. Grâce notamment à l'amélioration continue des moyens de calcul mis à la disposition de la communauté astrophysique, beaucoup de problèmes de la physique solaire sont également aujourd'hui nettement mieux compris. C'est par exemple le cas de la granulation ou de la dynamique des taches solaires. Bien heureusement pour les scientifiques, de nombreux phénomènes demeurent largement inexplicables. On ne parlera pas ici du problème du cycle d'activité de onze ans du Soleil ni de la génération des champs magnétiques en son sein. Des conférences entières sont encore consacrées à ces questions, qui demeurent parmi les plus difficiles de la physique solaire et stellaire. D'autres problèmes aux dimensions *a priori* plus modestes sont susceptibles d'être résolus dans la prochaine décennie. Cette thèse est consacrée en particulier à l'étude de certains aspects du problème de la génération des écoulements de surface dans la photosphère solaire à des échelles horizontales plus grandes que la granulation solaire (1 000 km) dans le Soleil calme (c'est-à-dire loin des taches solaires, plages

et autres facules). Il s'agit principalement de la mésogranulation (8 000 km) et de la supergranulation (30 000 km).

Si la granulation solaire est connue depuis deux siècles, la découverte des structures méso et supergranulaire est plutôt récente (le début des années 1980 pour la première et les années 1950 pour la seconde). Leur compréhension, quant à elle, est encore très partielle mais, comme nous le verrons tout au long de cette étude, il y a de bons espoirs pour qu'elle s'améliore notablement dans les années à venir. Pour être synthétique, les problèmes essentiels relatifs à ces écoulements sont les suivants :

- Qu'est-ce que la supergranulation ? Quelle est son origine ?
- La mésogranulation existe-t-elle ? Si oui, quelle est son origine ?
- Quelles sont les relations entre ces diverses échelles ? La mésogranulation et la supergranulation sont-elles issues de mécanismes non-linéaires d'interaction de la granulation solaire ?
- Ces écoulements s'étendent-ils en profondeur dans la zone convective ?
- Pourquoi les écoulements dans le Soleil calme nous semblent-ils particulièrement structurés aux trois échelles *distinctes* que sont la granulation, la mésogranulation, et la supergranulation, alors que les couches périphériques de la zone convective sont de toute évidence extrêmement turbulentes et devraient de ce fait générer un *continuum* monotone d'échelles ?
- Quel rôle ces écoulements jouent-ils dans la distribution et la génération des champs magnétiques dans le Soleil calme ? De quelle manière sont-ils influencés par la présence du champ magnétique ?

Comme on peut l'imaginer, certaines de ces questions sont connectées de manière assez forte. Si nous connaissions la réponse à l'une d'elles, nous progresserions sensiblement dans la recherche d'une réponse à certaines autres.

On peut aborder ces problèmes sous trois angles différents : l'amélioration de la précision et de la compréhension des observations, la théorie, et la simulation numérique. Au cours de cette thèse, nous nous sommes principalement consacrés à ces deux derniers points. Bien évidemment, on ne saurait se lancer dans des théories et des simulations sans avoir essayé de comprendre au préalable la nature des phénomènes observés ainsi que les techniques (observationnelles ou numériques) utilisées pour les étudier et les modéliser. C'est pourquoi nous présentons pour commencer ce manuscrit une description non exhaustive mais nous l'espérons suffisamment détaillée de l'état actuel des connaissances observationnelles sur la convection et les champs magnétiques dans le Soleil calme, suivie par une étude détaillée des efforts de modélisation réalisés au cours de ces trente dernières années (chapitre 1). Cette synthèse nous permettra de mieux comprendre

la nature précise des problèmes rencontrés à l'heure actuelle dans l'étude de la mésogranulation et de la supergranulation solaire et fournira des éléments de justification aux différentes approches utilisées dans le cadre de cette thèse pour tenter de les résoudre.

Dans le chapitre 2, nous décrivons ensuite les éléments essentiels du formalisme mathématique utilisé au cours de ce travail pour décrire les mouvements turbulents de fluides stratifiés en densité en présence de champ magnétique.

Une fois ces différentes tâches accomplies, nous détaillons trois approches possibles du problème qui ont été suivies au cours de cette thèse. La première consiste à élaborer une théorie linéaire idéalisée de la supergranulation ainsi que de ses interactions avec le champ magnétique à la surface solaire (chapitre 3). Elle tente en particulier de répondre aux questions suivantes : quel est le modèle linéaire le plus approprié pour décrire des mouvements à des échelles horizontales aussi grandes que la supergranulation ? Quel sont les effets de la stratification en densité et du champ magnétique (deux ingrédients essentiels de la physique des atmosphères stellaires) sur les résultats d'une telle théorie ? Les ordres de grandeurs obtenus par l'intermédiaire de celle-ci sont-ils satisfaisants si on les compare aux observations ? Quelles conclusions pouvons-nous tirer d'un tel modèle pour la supergranulation ?

La deuxième approche est basée sur des simulations numériques directes de turbulence hydrodynamique dans une atmosphère de grand rapport d'aspect (très aplatie) et fortement stratifiée en densité (chapitre 4). De telles simulations permettent de décrire la dynamique d'une vaste gamme d'échelles turbulentes et offrent au fluide une liberté horizontale de mouvement importante. Elles sont susceptibles de nous éclairer sur les mécanismes d'interactions entre ces diverses échelles et sur leur origine physique. Il faut cependant toujours garder à l'esprit que les simulations numériques de turbulence sont loin de permettre d'atteindre les régimes d'écoulement du gaz dans la photosphère solaire, et que les résultats de telles études doivent de ce fait être analysés avec précaution et les conclusions rester fort prudentes. Nous tenterons donc d'identifier les ressemblances entre nos simulations idéalisées et la convection photosphérique afin d'en tirer des conclusions pour les problèmes de la mésogranulation et de la supergranulation, mais aussi – et c'est un point extrêmement important – d'en comprendre les limites. La configuration de la simulation numérique que nous présentons (avec un rapport d'aspect $A = 42.6$) est unique à ce jour et notre expérience peut être rattachée à des problèmes différents de celui de la convection photosphérique. Nous présentons en particulier des résultats susceptibles d'être reliés à des questions actuellement discutées dans le milieu de la convection expérimentale. Le développement du code de simulations magnétohydrodynamiques (MHD) pour les milieux compressibles utilisé pour cette étude, qui a constitué une part importante de ce travail, est présenté dans l'annexe A.

Nous présentons enfin un travail encore préliminaire visant à mieux formaliser les interactions entre l'échelle caractéristique d'un écoulement (par exemple la granulation) et une échelle beaucoup plus grande (la supergranulation) : l'hy-

pothèse de séparation d'échelles est largement utilisée en MHD et en hydrodynamique pure et permet de procéder à des développements asymptotiques intéressants (théories de champ moyen) visant à décrire la stabilité et l'évolution de structures à grande échelle. En MHD, il s'agit par exemple de l'effet α . En hydrodynamique, il s'agit de l'effet AKA et de la théorie de la viscosité turbulente (chapitre 5). Notons que cette approche s'inscrit dans le cadre plus général de la compréhension et de la paramétrisation des mécanismes de transport turbulent dans les zones convectives stellaires, et que la modélisation de ces mécanismes représente un des défis actuels importants pour des disciplines comme l'astérosismologie, la structure et l'évolution stellaires.

L'organisation logique suivante a été adoptée dans le manuscrit : les motivations des différentes approches utilisées sont systématiquement détaillées au début des chapitres correspondants, tandis que les conclusions propres à chacune de ces approches sont données en fin de chapitre. Nous concluons le manuscrit par une discussion globale sur le travail effectué au cours de cette thèse et sur les conséquences des résultats obtenus pour la compréhension de la mésogranulation, de la supergranulation, et plus généralement de la convection turbulente aux grandes échelles.

Pour terminer, mentionnons que l'annexe B du manuscrit est consacré à la présentation d'une étude des oscillations alfvéniques d'une coquille sphérique de plasma incompressible baignée par un champ magnétique. Ce deuxième projet de recherche a été mené tout au long de ces trois ans en parallèle du sujet principal et trouve sa motivation dans l'astérosismologie des étoiles magnétiques de type roAp. Il ne présente de fait pas de relation directe avec le thème principal de cette thèse, ce qui justifie son report en annexe.

