

Conclusions et perspectives

La thématique centrale de ce travail était la compréhension de l'origine et de la dynamique des grandes échelles de la convection observées dans la photosphère du Soleil, à savoir la mésogranulation et la supergranulation. La modélisation de la convection photosphérique fait appel aux équations de la dynamique des fluides en milieu fortement stratifié en densité et en présence de champ magnétique. Les résultats obtenus au cours de cette étude concernent donc simultanément les domaines de la physique solaire et de la dynamique des fluides.

Pour commencer, une description et une synthèse détaillées des différentes observations de la photosphère du Soleil calme et des nombreuses simulations numériques de convection réalisées pour les comprendre ont été effectuées (chapitre 1). Cette première partie a permis de préciser la problématique associée à l'origine de la mésogranulation et de la supergranulation solaires. Nous avons en particulier mis en évidence les problèmes d'interprétation liés aux observations et avons mis l'accent sur les succès mais aussi sur les limites de résolution et les défauts de réalisme des modèles numériques actuels, qu'ils soient locaux (en géométrie cartésienne) ou globaux (en géométrie sphérique). Une question essentielle posée au terme de cette analyse a été de savoir si la mésogranulation et la supergranulation constituaient des phénomènes de surface ou si elles étaient la manifestation d'une dynamique trouvant naissance en profondeur dans la zone convective du Soleil.

Les travaux présentés dans ce document ont ensuite permis d'apporter de nouveaux éléments de réponse à cette question. Les résultats obtenus à l'aide d'un modèle théorique linéaire de convection à grande échelle utilisant des conditions aux limites effectives de type flux thermique fixé ont tout d'abord montré qu'une approche linéaire du problème de l'instabilité convective n'aboutissait pas nécessairement à des cellules d'extension horizontale comparable à l'épaisseur de la couche fluide, contrairement à ce qui est supposé dans le modèle historique de la supergranulation (chapitre 3). Une des conclusions importantes de cette étude est donc qu'il est possible d'imaginer des modèles pour lesquels les *grandes échelles horizontales de la convection* sont *générées à proximité de la surface*.

Dans la configuration étudiée, une étude approfondie de l'influence du champ magnétique et de la stratification en densité a également montré que des échelles « finies » dans la direction horizontale pouvaient se développer en présence d'un champ magnétique suffisant, alors que la théorie linéaire sans champ magnétique dans l'approximation de Boussinesq prédit une instabilité du mode correspondant à la plus grande échelle disponible du domaine considéré. Une estimation du champ magnétique moyen nécessaire à l'obtention d'échelles supergranulaires dans une couche de 5 000 km de profondeur a abouti à des valeurs comprises entre 100 G et 1 kG, qui sont compatibles avec l'intensité des champs magnétiques observés dans le réseau chromosphérique.

Le complément logique de cette étude *linéaire* a été la réalisation de simulations numériques de convection *turbulente* compressible dans un polytrope, visant à mettre en évidence des mécanismes possibles de génération d'écoulements à grande échelle à proximité de la surface de la zone de convection solaire. Au chapitre 4, nous avons présenté des résultats sans champ magnétique obtenus grâce à un code DNS de MHD compressible partiellement développé et validé au cours de la thèse en partant d'un code Boussinesq (annexe A). Afin de résoudre le problème de la simulation des échelles comprises entre la granulation et la supergranulation, le choix d'un rapport d'aspect très important a été fait dans cette expérience. Cette configuration coûteuse du point de vue numérique a permis pour la première fois d'étudier dans des simulations compressibles la dynamique de la convection à des échelles horizontales jusqu'à quarante fois plus grandes que l'épaisseur du domaine de la simulation.

Le principal résultat de ces simulations concerne le développement simultané de *structures cohérentes d'origine convective à mésoéchelle* et de structures granulaires générées dans une couche limite thermique. Une comparaison entre la simulation polytropique et une simulation de convection avec transfert radiatif a permis d'affiner l'analyse de ce résultat et de le relier qualitativement aux observations de la photosphère. Nous sommes arrivés à la conclusion que les deux échelles *distinctes* mises en évidence dans la simulation présentaient des similarités avec la mésogranulation et la granulation solaires. Nous avons alors argumenté que la mésogranulation pourrait être l'échelle dominante du transport convectif sous la surface solaire et que sa dynamique pourrait être en grande partie masquée par la physique de la couche limite thermique. Il n'a en revanche pas été possible d'observer le développement privilégié de mouvements à des échelles « supergranulaires » comparables à l'extension horizontale du domaine de simulation, mais nous avons malgré tout mis en évidence que les transferts non-linéaires permettaient d'alimenter faiblement ces modes à très grande échelle. Une autre possibilité serait que les mésoéchelles obtenues correspondent en réalité à une supergranulation pour les paramètres de la simulation.

Au début du chapitre 5, nous avons souligné que la compréhension et la modélisation du transfert non-linéaire, qui étaient au cœur des deux études précédentes, constituaient les pierres angulaires du problème des grandes échelles

de la convection dans la photosphère solaire. Après avoir constaté que l'hypothèse de séparation d'échelle pourrait être appliquée dans le cadre des interactions entre la supergranulation et la turbulence à petite échelle, nous avons donc pour terminer suggéré une nouvelle approche du problème de l'origine de la supergranulation se fondant sur les travaux théoriques de dynamique des fluides sur les théories de champ moyen de type effet AKA ou viscosité turbulente.

Au cours de cette thèse, l'étude de configurations d'écoulement inédites a abouti à des propositions d'idées nouvelles concernant la question de l'origine de la mésogranulation et de la supergranulation solaires. Le travail réalisé a également permis de confirmer, de généraliser et de préciser des résultats récents obtenus par différentes équipes. Il pose aussi de nombreuses questions : beaucoup d'efforts restent à faire pour parvenir à une description cohérente et complète de la dynamique de la convection dans la photosphère solaire. Il semble donc naturel de terminer cette synthèse par un ensemble de propositions et de directions de recherche possibles s'appuyant sur les résultats présentés dans ce document.

Du point de vue observationnel, il y a beaucoup à attendre des mesures des champs magnétiques intra-réseau dans les années à venir. Les travaux les plus récents à ce sujet indiquent que le champ magnétique est présent à toutes les échelles de la convection photosphérique, mais ses caractéristiques restent malheureusement encore mal connues aujourd'hui. En particulier, l'obtention d'observations magnétiques à haute résolution sera essentielle pour comprendre le processus de dynamo à petite échelle généré par la convection dans la photosphère.

Nous devons en parallèle suivre attentivement les progrès de l'héliosismologie locale et espérer que les résolutions offertes par cette méthode atteindront un jour l'échelle mésogranulaire pour pouvoir notamment tester les idées proposées ici. Si la détermination de la topologie des champs magnétiques photosphériques par cette technique s'avérait possible dans les années à venir, il serait également extrêmement intéressant de pouvoir regarder la structure du réseau magnétique sous la surface afin de mieux comprendre le rôle du champ magnétique dans la dynamique de la supergranulation.

Des simulations numériques semblables à celles que nous avons présentées doivent être réalisées dans des régimes de paramètres différents (stratification, nombre de Rayleigh, nombre de Prandtl, rapport d'aspect) pour clarifier les résultats obtenus. En particulier, comment les tailles des structures cohérentes et des granules varient-elles avec le nombre de Rayleigh ?

L'inclusion du champ magnétique dans les simulations, comme nous l'avons souligné au chapitre 4, sera de toute évidence une étape clé vers une description cohérente de la structure de la convection photosphérique. Se poseront à ce moment là l'ensemble des questions relatives à la dynamo, qui devront être résolues en collaboration avec des spécialistes de la question.

Un point qui n'a pas été soulevé dans ce travail mais qui mériterait une at-

tention particulière est la question du taux de rotation anormalement élevé de la supergranulation par rapport au réseau chromosphérique, et de manière plus générale la compréhension des relations entre les champs magnétiques du réseau et la structure supergranulaire. Ces problèmes ont été peu abordés du point de vue numérique, alors que leur étude est susceptible de nous fournir des informations intéressantes sur la dynamique de la supergranulation. Cependant, la mise en place du couplage entre simulations de convection photosphérique et simulations chromosphériques est vraisemblablement très difficile et nécessitera du temps. Un projet postdoctoral sur ce sujet est en cours de définition. Il devrait être réalisé en collaboration avec Tahar Amari, du groupe de MHD de l'École Polytechnique, et avec des spécialistes de la dynamo à petite échelle de l'université de Cambridge. Nous espérons qu'il offrira des perspectives intéressantes pour la compréhension de l'interface entre photosphère et chromosphère.

Du côté théorique, il est important que les tentatives d'application de théories de champ moyen au problème de la supergranulation se poursuivent. L'objectif à court terme est de dépasser les résultats obtenus pour des écoulements théoriques simples et de parvenir à estimer les propriétés de transport et les possibilités d'instabilité à grande échelle pour des écoulements à petite échelle issus de simulations numériques directes. À plus long terme, il restera à inventer une théorie satisfaisante du transport d'énergie par convection à l'échelle des étoiles...

Voilà de quoi occuper plusieurs générations d'astrophysiciens !

