

Projet de thèse :

Développement de modèles de turbulence pour la simulation numérique instationnaire du Soleil

Unité de recherche :

Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI)
Institut des Sciences de la Terre (ISTerre)

Adresse :

Domaine Universitaire, 38041 Grenoble Cedex 9

Contact :

Guillaume Balarac, guillaume.balarac@grenoble-inp.fr
Franck Plunian, franck.plunian@ujf-grenoble.fr

Financement : La rémunération est d'environ 1370 € net / mois.

Les connaissances et compétences requises :

Le candidat pour ce sujet de thèse devra posséder des compétences solides concernant **la physique des écoulements magnétohydrodynamique (MHD)** et **la modélisation et la simulation de la turbulence**. Il devra également avoir un **intérêt pour les mathématiques appliquées**. Des cours du master « Recherche en Mathématiques Appliquées » et/ou « Mécanique des Fluides et Transferts » pourront éventuellement être suivis par le candidat pour avoir les pré-requis nécessaires.

Résumé du projet :

La puissance des calculateurs actuels nous permet désormais des simulations instationnaires de la turbulence pour des écoulements de plus en plus complexes. On doit donc être capable de proposer des outils de simulation instationnaire performants. La SGE est un de ces outils. Elle permet d'accéder aux instationnarités de l'écoulement dans des configurations réalistes. Cependant, elle nécessite un effort de modélisation pour fermer les équations résolues. En effet, avec cette approche, seules les grandes échelles du mouvement sont résolues, il faut donc modéliser les transferts entre ces échelles et les plus petites échelles qui ne sont pas explicitement résolues. Pour réaliser des simulations réalistes de la zone convective du Soleil à l'aide de cette approche, des modèles doivent être développés, non seulement pour le calcul du champ de vitesse mais également pour le calcul du champ magnétique. C'est l'objectif de ce projet. Ainsi, après une analyse fine des transferts énergétiques se produisant dans de tels écoulements, de nouvelles procédures permettant de mesurer la performance des modèles développés seront proposées. Des approches d'optimisation des modèles utilisant des techniques sophistiquées de mathématiques appliquées seront également utilisées.

Description détaillée :

Physique des tenseurs magnétiques et cinétiques sous-maille : La première étape aura pour objectif de générer la base de données à partir de laquelle les tests pourront être effectués. Un code de calcul permettant de simuler des écoulements turbulents MHD est déjà disponible. Ce code résout les équations de Navier-Stokes incompressible couplées à l'équation de transport du champ magnétique. Il utilise des méthodes spectrales réduisant ainsi les erreurs numériques. Ce code a déjà été utilisé avec succès pour des études similaires portant sur la modélisation sous-maille d'un scalaire passif en application à des problèmes de combustion et pour de premières études sur la modélisation en turbulence MHD. Des configurations de turbulence homogène isotrope forcée (THIF) seront principalement étudiées. Ces configurations représentent un cas idéal de turbulence sans influence de champs moyens. Différents forçages permettant de maintenir le niveau d'énergie cinétique seront testés pour mieux comprendre également leur rôle dans la dynamique du champ magnétique. Des premières simulations directes (SND, l'ensemble des échelles sont résolues sans modélisation) ont été effectuées pour une résolution comportant 256^3 points de grille. Cette résolution permet de générer un écoulement turbulent pleinement développé avec un nombre de Reynolds basé sur la micro-échelle de Taylor, R_λ , de l'ordre de 90. Dans cette configuration, un nombre de Prandtl magnétique, $Pr_m = \nu/\eta$, de l'ordre de 0.5 produit un effet dynamo. Cette première configuration nous permettra d'étudier, dans une configuration largement documentée, les différentes hypothèses de modélisation utilisées dans les modèles de la littérature. Une attention particulière sera portée sur les échanges énergétiques entre les différentes échelles afin de pouvoir évaluer la capacité des modèles sous-maille à prédire ces transferts et en particulier, les transferts d'énergie magnétique. En effet, ces transferts peuvent se produire des petites échelles vers les grandes. Ce mécanisme illustre alors l'existence d'une cascade inverse d'énergie, contrairement aux transferts d'énergie cinétique qui drainent l'énergie principalement des grandes vers les petites échelles. C'est un challenge particulier pour les modèles SGE, car cela signifie que les modèles devront être capable de produire l'énergie aux niveaux des échelles résolues.

Tests a priori des modèles existants et propositions de modifications : La seconde étape du projet aura pour objectif de mesurer la performance des modèles existant pour la SGE d'écoulements turbulents MHD. Pour mesurer la performance des modèles, on peut définir estimateur optimal qui permet de calculer l'erreur minimale que l'on peut espérer d'un modèle. Il permet ainsi de comprendre si l'erreur de modélisation est principalement due à un jeu de paramètres d'entrée mal choisi ou à une mauvaise relation algébrique dans le modèle. Dans cette idée, l'objectif du projet est d'utiliser des estimations non-paramétriques pour réduire de façon systématique l'erreur des modèles. D'un point de vue mathématique, le problème se résume à déterminer une relation algébrique entre une sortie, i.e. la quantité à modéliser, et des entrées, i.e. le jeu de paramètres d'entrée du modèle. Cette détermination sera réalisée à partir des bases de données issues de simulations de références. Dans ce travail, il s'agit donc de déterminer la meilleure estimation qui deviendra alors le modèle. Dans le cadre de la SGE, il y a aura un double objectif pour le modèle. En effet, ce dernier devra approximer le mieux possible les quantités inconnues mais également le rôle que joue ces quantités sur les échanges énergétiques.

Tests a priori des modèles Les modèles les plus performants aux tests a priori réalisés lors de l'étape précédente seront alors implémentés dans le code spectral. Des SGE seront alors réalisées. Il s'agira de comparer les comportements statistiques de ces SGE aux résultats filtrés des SND de référence. Etant donné la nature fortement non-linéaire des équations, il n'y a qu'une comparaison statistique qui soit envisageable mais nous prévoyons de faire des comparaisons approfondies avec des statistiques d'ordre élevé. La difficulté sera alors de déterminer l'influence de chaque terme modélisé sur le résultat final. Des pistes sont envisageables. Par exemple, nous prévoyons de faire des simulations mixte SND/SGE où nous réaliserons une SND pour le champ cinétique et une SGE pour le champ magnétique et inversement. Du fait de la nature fortement couplée des équations, cette approche n'est possible qu'en considérant des équations tronquées. Par exemple, si on se place en SND pour le champ cinétique et en SGE pour la champ magnétique, la force de Lorentz qui apparaît dans l'équation de Navier-Stokes ne pourra être définie qu'à partir du champ magnétique filtré. On pourra également reprendre des techniques connues sous le vocable "Validation & Verification". Ces techniques visent à comprendre l'influence des incertitudes d'une simulation numérique sur le résultat. On pourra de cette façon mesurer la sensibilité des résultats à la valeur des coefficients des modèles. Des travaux sont actuellement menés dans notre équipe de recherche sur ces techniques de mesure d'incertitudes et quand le projet atteindra cette étape, il pourra bénéficier de l'avancé de ces recherches.