

II - Description du projet

1 Objectifs et Contexte scientifique

L'objectif de la demande est le développement d'une forte activité de modélisation et de simulations numériques en relation avec les programmes instrumentaux et observationnels en spectropolarimétrie menés au laboratoire sur les étoiles magnétiques.

1.1 Présentation de la thématique

La génération des champs magnétiques dans l'Univers est une des questions fondamentales de l'astrophysique contemporaine, essentiellement de par le rôle qu'ils jouent dans les processus liés à la formation stellaire. Le consensus actuel est que la plus grande partie des champs magnétiques détectés résultent d'un processus dynamo. Les mouvements turbulents du plasma (conducteur) d'une étoile génèrent des courants électriques qui eux-mêmes produisent les champs magnétiques.

Si le processus physique de base de l'effet dynamo est bien compris, son application aux dynamos naturelles et plus particulièrement stellaires est encore problématique car les écoulements sources de champ magnétique sont turbulents. Ainsi, il n'existe toujours pas de modèle cohérent de la dynamo solaire ; on ne sait pas encore prévoir l'évolution du champ magnétique moyen du soleil, c'est-à-dire prédire, par exemple, l'intensité et la durée du prochain cycle magnétique solaire (le fameux cycle de 11 ans). Par ailleurs, le champ magnétique joue un rôle crucial mais tout aussi mal compris dans le processus de formation des étoiles (et de leur éventuelles planètes).

Face à ces difficultés, les astrophysiciens ont commencé une exploration systématique de l'activité magnétique des étoiles pour mieux cerner les ingrédients essentiels d'une dynamo stellaire. Cette exploration se fait actuellement grâce à deux instruments phares de la discipline : les spectropolarimètres ESPADONS, installé au foyer du télescope franco-canadien à Hawaii (le TCFH), et NARVAL, installé au foyer du télescope Bernard Lyot au Pic-du-Midi. Ces instruments ont tous les deux été conçus et réalisés au LATT qui possède dans ce domaine une expertise unique au monde. Ils sont entrés en service récemment (respectivement en 2005 et fin 2006) mais les résultats scientifiques de premier plan sont déjà là (voir Donati et al. 2005, *Nature*, **438**, 466 et Donati et al. 2006, *Science*, **311**, 633).

1.2 Positionnement du projet dans la communauté scientifique

1.2.1 Sur le site du grand Toulouse

Localement le projet s'inscrit dans la logique des activités développées à l'observatoire du Pic-du-Midi, symbole fort de l'astronomie et de l'activité scientifique en général, en Midi-Pyrénées. Le télescope Bernard Lyot (2m de diamètre) est en effet maintenant entièrement dédié à la spectropolarimétrie avec le spectropolarimètre NARVAL qui est installé à son foyer. Un programme de 700 nuits d'observation (étalé sur 2007-2016) doit permettre une exploration du magnétisme stellaire dans tous les types d'étoiles.

L'instrument NARVAL, dont le coût total est d'un million d'euros, a été financé par la Région Midi-Pyrénées et le Ministère de la Recherche (dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région), le conseil Général des Hautes-Pyrénées, l'Union Européenne (crédits FEDER) et l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) du CNRS.

L'observatoire du Pic-du-Midi est d'autre part un grand équipement associé à l'Université Paul Sabatier ; il accueille au travers de certaines formations (Master, Licence de Tarbes) de nombreux étudiants. Le développement de la science associée est donc un enjeu primordial pour le rayonnement du Campus Toulousain.

Enfin le développement de la simulation numérique intensive dans ce domaine bénéficiera de la présence du Groupement Scientifique CALMIP sur le campus tout en valorisant son action.

1.2.2 Nationalement

La thématique du magnétisme solaire et stellaire relève au plan national de deux programmes : le Programme National de Physique Stellaire (PNPS) et le Programme National Soleil-Terre (PNST), programmes qui dépendent de l'INSU. Le soutien des instances nationales à l'égard de cette thématique est manifeste tant à travers les financements obtenus (construction du spectropolarimètre ESPADONS, soit 1Meuro partagé entre la France, le Canada et la société CFH), que du temps de télescope accordé (Grand Programme MAPP, 690h d'observation à réaliser entre 2008 et 2012 sur le TCFH¹ et 700 nuits d'observations sur dix ans 2007-2016 avec le programme clef NARVAL au Pic-du-Midi).

Par ailleurs, la simulation numérique en astrophysique a été largement

¹Télescope Canada-France-Hawaii (3.6m de diamètre).

soutenue ces dernières années par les instance nationales : recrutement de chercheurs et mise en place d'une action spécifique de l'INSU². Le GDR dynamo est une autre instance qui fédère les efforts de la communauté scientifique en réunissant astrophysiciens, géophysiciens et expérimentateurs.

Enfin, le CEA, au travers de ses moyens de calculs et de son institut d'astrophysique (IRFU, Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers), soutient fortement cette thématique.

1.2.3 Internationalement

J.-F. Donati, PI³ d'ESPADONS et Co-PI de NARVAL, a mis sur pied une collaboration internationale, MagiCS (a Magnetic Investigation of various classes of Stars) qui regroupe une centaine de chercheurs et fédère la communauté internationale autour de l'exploitation des nouveaux spectropolarimètres⁴. Les spectropolarimètres ESPADONS et NARVAL, qui ont des performances bien supérieures à leur prédecesseurs (typiquement un ordre de grandeur en sensibilité), offrent de nouvelles perspectives de recherches et motivent donc très fortement la communauté scientifique concernée ; le projet est donc très favorablement positionné du point de vue international. Il pourrait s'enrichir à moyen terme d'un nouvel instrument actuellement proposé en réponse à un appel d'offre du TCFH⁵.

Sur le plan de la simulation numérique, le projet s'insérera naturellement dans les collaborations internationales déjà actives (avec l'université de Cambridge, le laboratoire de physique des plasmas de l'Imperial College de Londres, le Politecnico de Milan ou Nordita à Stockholm). Par ailleurs, une collaboration avec l'Université de Californie à Santa-Cruz est en train de se mettre en place sur la thématique de la magnétohydrodynamique stellaire et la formation des étoiles et des planètes. Elle permettra des échanges d'étudiants et post-docs, et nous donnera accès au calculateur très puissant que cette université vient d'acquérir.

2 Description du projet et résultats attendus

La description et les résultats attendus d'un recrutement d'un enseignant-chercheur vont bien au delà de ce qu'il est humainement prévisible aujourd-

²<http://www.insu.cnrs.fr/a398,assna.html>

³Principal Investigator

⁴Plus de détails sur <http://www.ast.obs-mip.fr/users/donati/magics/v1>

⁵Il s'agit d'un projet de spectropolarimètre travaillant dans le proche infra-rouge, voir http://www.ast.obs-mip.fr/article.php3?id_article=637.

d’aujourd’hui. Il nous semble plus judicieux de montrer comment et pourquoi un tel recrutement aura un impact scientifique important et constitue un investissement crédible pour l’avenir.

2.1 Impact scientifique

Nous avons vu précédemment qu’il y avait à tous les niveaux (local, national, international) un fort développement de l’activité observationnelle et instrumentale dans le domaine de la spectropolarimétrie appliquée aux étoiles magnétiques. Comme dans les autres branches de la physique, le meilleur retour scientifique ne sera obtenu que si ce développement est accompagné par un développement similaire de la modélisation. Sur ce plan là, les progrès les plus spectaculaires sont accomplis grâce aux simulations numériques sur des ordinateurs massivement parallèles. Il faut en effet résoudre les équations de la magnétohydrodynamique soit directement, soit en utilisant des modèles de turbulence qui miment le rôle des petites échelles.

Le domaine de recherche de l’enseignant-chercheur recruté s’étendra de la simulation numérique des atmosphères de ces étoiles, incluant le transfert radiatif, aux simulations numériques globales de la dynamo de ces étoiles permettant de modéliser la topologie du champ magnétique à grande échelle de ces objets. La comparaison des données d’observation aux résultats des modèles permettra de contraindre ces derniers, notamment sur le point délicat de la modélisation des petites échelles de la turbulence.

Le travail de recherche de l’enseignant-chercheur aura donc un impact sur notre compréhension du magnétisme stellaire, y compris celui du soleil. Sur ce dernier, notons que toute avancée dans nos connaissances contribue au développement du domaine de la météorologie spatiale dont les applications sont nombreuses. Plus fondamentalement, ce programme de recherche pourra aussi contribuer à la modélisation de la turbulence dans les écoulements fluides ou encore au développement de nouvelles méthodes numériques. Observons en passant que la simulation numérique de l’effet dynamo est un domaine en plein développement lui aussi. En effet, au delà de la motivation astrophysique dont nous parlons, la réalisation de dynamos fluides en laboratoire est en pleine effervescence depuis qu’une équipe française a réalisé une telle dynamo dans un écoulement très peu contraint⁶.

En conclusion, nous soulignons le fait que le domaine scientifique dans lequel nous proposons le recrutement est un domaine très prospectif et

⁶Monchaux et al. 2007, PRL, **98**, 044502.

Membres	Poste	Thème de recherches
		Théorie/modélisation
M. Rieutord (Coordinateur)	PR1, UPS	Modélisation des étoiles en rotation rapide, Dynamo et supergranulation solaire
B. Dintrans	CR1, CNRS	Couplage convection-oscillation, Dynamos stellaires
J. Morin	Doctorant 9/2006–9/2009	Dynamo dans les étoiles entièrement convectives
		Observation/Analyse de données/Instrumentation
M. Aurière	Astronome	PI du spectropolarimètre NARVAL étude des étoiles magnétiques
J.-F. Donati	DR2, CNRS	PI du spectropolarimètre ESPADONS Spectropolarimétrie des étoiles magnétiques et des étoiles jeunes
P. Petit	Astronome-Adjoint	Spectropolarimétrie des étoiles de type solaire
A. Morgenthaler	Doctorante 9/2008–9/2011	Magnétisme des étoiles de type solaire

TAB. 1 – L'équipe impliquée dans le projet.

scientifiquement plein d'avenir ; il est en conséquence tout à fait adapté au démarrage de la carrière d'un Maître de Conférences.

2.2 Effet structurant pour le laboratoire

Les membres de l'équipe proposante sont actuellement distribués dans deux équipes du LATT : l'équipe *Magnétisme Solaire et Stellaire* (MSS) et l'équipe *Dynamique des Fluides Astrophysiques* (DFA). Schématiquement la première est focalisée sur l'instrumentation, l'observation et l'analyse de données, tandis que la seconde porte ses efforts sur la modélisation. Le projet et l'équipe proposante ont émergé des synergies existantes et qu'on souhaite renforcer. L'enseignant-chercheur intégrera l'équipe DFA pour développer la modélisation associée aux observations portant sur le magnétisme stellaire. Comme le résume le tableau ci-joint, cette thématique (simulation numérique et modélisation des étoiles magnétiques) est actuellement portée par Boris Dintrans pour 50% de son temps, Julien Morin pour 50% de son temps aussi et Michel Rieutord pour environ 10% de son temps de recherche.

Cela fait à peine 1.1 ETP sur le sujet, un Equivalent-Temps-Plein non-pérenne puisque JM termine son doctorat en septembre 2009.

En confiant cette thématique à un Maître de Conférences, nous pérennisons les compétences de l'équipe DFA dans ce domaine, et nous renforçons la collaboration avec l'équipe MSS.

Par ailleurs, nous souhaitons plus spécifiquement le recrutement d'un enseignant-chercheur car l'expertise qui sera acquise au niveau recherche sera aussi bienvenue au niveau de l'enseignement ; la simulation numérique sur machine massivement parallèle est appelée à un fort développement, plus particulièrement sur le plan industriel⁷ où il y a une forte marge de progression. L'enseignement d'une telle matière est donc très porteur en terme de débouchés car les étudiants maîtrisant ces techniques sont trop rares.

Enfin, par le recrutement d'un Maître de Conférence le laboratoire souhaite renforcer sa présence auprès des étudiants de physique, pour le moment assurée par trois professeurs seulement (A. Blanchard, M. Rieutord et S. Vauclair). Notons aussi que dans le scénario d'une fusion LATT-CESR, cette demande est invariante car la thématique Soleil-Etoiles-Simulations Numériques est absente au CESR.

2.3 Environnement du poste

Le laboratoire mettra naturellement les moyens nécessaires pour accueillir efficacement cet enseignant-chercheur. Au delà des moyens évidents comme un bureau et son équipement standard, le laboratoire prévoit de doubler la puissance de calcul de la « grappe » de PC (32 processeurs actuellement, qui viennent d'être renouvelés en collaboration avec le Laboratoire d'étude des Mécanismes de Transfert en Géologie et le Laboratoire d'Aérodologie). Le montant de cette opération est estimé à 20kEuros (10kE demandés au CS en accompagnement du recrutement de l'Enseignant-Chercheur et 10kE proposés par le laboratoire). Par ailleurs, le laboratoire s'engage à mettre en priorité, vis-à-vis de l'école doctorale, les sujets de thèse sur cette thématique lorsque le Maître de Conférences sera opérationnel. Enfin, le laboratoire a affiché (Labintel) la nécessité du recrutement d'un ingénieur de recherche en calcul scientifique pour la maintenance des codes de calculs ; il est évident que le futur Enseignant-Chercheur bénéficiera de cette expertise.

⁷Les secteurs concernés sont l'industrie pétrolière, les transports (aérodynamique, combustion) et l'énergie.

3 Production scientifique du demandeur

La production scientifique de l'équipe demandeuse peut être évaluée via la base de données ADS⁸ - accessible librement sur le web.

La production scientifique des membres (permanents) de l'équipe DFA directement concernés par le projet (B. Dintrans et M. Rieutord) est de 66 articles dans les revues de rang A (28 articles sur 2003-2008).

La production scientifique des membres permanents de l'équipe MSS impliqués dans le projet (M. Aurière, J.F. Donati et P. Petit) est de 180 articles dans les revues de rang A (une grosse production qui reflète le succès des instruments - 72 articles sur 2003-2008).

3.1 Cinq publications significatives du côté théorie et modélisation

- Gastine, T. and **Dintrans, B.**, 2008, "Direct numerical simulations of the κ -mechanism. I. Radial modes in the purely radiative case", *A & A*, **484**, 29
- **Rieutord M.** 2008, "The Solar Dynamo", in *Les Comptes rendus de l'Académie des sciences, Physique*, vol. 9, pp. 757-765
- Rincon F., Lignières F. & **Rieutord M.**, 2005, "Mesoscale flows in large aspect ratio simulations of turbulent compressible convection", *A & A*, 430, L57
- **Dintrans, B.** and Brandenburg A., 2004, "Identification of gravity waves in hydrodynamical simulations", *A & A*, 421, 775
- Rincon F. & **Rieutord M.**, 2003, "Oscillations of magnetic stars : I. Axisymmetric shear Alfvén modes of a spherical shell in a dipolar magnetic field", *A & A*, 398, 663

3.2 Trois publications significatives du côté des observation et de l'analyse de données

- **Donati J.-F.**, Paletou F., Bouvier J. and Ferreira, J., 2005, "Direct detection of a magnetic field in the innermost regions of an accretion disk", *Nature*, vol. 438, 466-469
- **Donati J.-F.**, Forveille T., Cameron A. C., Barnes J. R., Delfosse X., Jardine M. M. and Valenti, J. A 2006, "The Large-Scale Axisymmetric Magnetic Topology of a Very-Low-Mass Fully Convective Star", *Science*, **311**,633-635,

⁸http://cdsads.u-strasbg.fr/abstract_service.html

- **Donati J.-F., Morin J., Petit P.**, Delfosse X., Forveille T., **Aurière M.**, Cabanac R., Dintrans B., Fares R., Gastine T., Jardine M. M., Lignières F., Paletou F., Velez J. C. R. and Théado S., 2008, "Large-scale magnetic topologies of early M dwarfs", à paraître in MNRAS