

Bilan des résultats de l'équipe de physique solaire et stellaire (période 2009-2013)

1. Introduction

Les travaux de l'équipe de physique solaire et stellaire portent sur la compréhension de la structure, interne et externe, du Soleil et des étoiles. Les grandes questions abordées sont celles de l'évolution des étoiles, Soleil inclus, au cours de leur évolution, et celles des relations entre étoiles et planètes, en particulier les relations Soleil-Terre. Les techniques utilisées pour progresser dans ces domaines sont la sismologie et différents moyens (principalement l'imagerie et la spectroscopie UV) de diagnostics des couches externes du Soleil pour cerner la physique à l'œuvre dans l'atmosphère solaire, laboratoire incomparable pour comprendre ce qui gouverne les plasmas stellaires, et donc l'influence d'une étoile sur ses planètes.

Dans ce cadre, l'équipe a été impliquée dans la conception et la réalisation d'instruments de plusieurs missions spatiales, à divers niveaux:

- SOHO (instruments EIT, SUMER, GOLF)

- Picard* (instrument SODISM)

- STEREO (instrument SECCHI)

- CoRoT

Pour ces missions, l'équipe a participé à la conception, la réalisation (et parfois les opérations) des instruments (en tant que PI pour EIT et GOLF, co-PI pour SUMER) et est engagée dans l'exploitation de ces missions depuis leur lancement. L'équipe s'investit aussi dans l'exploitation scientifique d'autres missions comme SDO, *Hinode* et *Kepler* qui sont des compléments naturels des missions précédentes. Un autre complément naturel est fourni par les expériences embarquées à bord de fusées comme le projet HECOR pour l'observation de la couronne solaire.

Les centres MEDOC et IDOC sont au cœur de cette exploitation: ils mettent à disposition les données de ces missions ainsi que les activités d'enrichissement des données (divers produits "à valeur ajoutée") pour une exploitation (analyse et interprétation) optimale.

L'équipe investit aussi dans l'avenir à travers des actions de R&D portant sur une instrumentation innovante destinée à voler sur les plateformes spatiales dans les dix années à venir (spectro-imageur UV, filtres métalliques EUV, lumière diffusée sur optique UV, mécanismes de roue à filtre).

2. Bilan structure interne du Soleil et des étoiles

2.1 Le Soleil

En ce qui concerne la physique de l'intérieur du Soleil, une des questions toujours en suspens est celle de la détection de modes d'oscillations mus par la gravité (modes g), d'une importance capitale pour sonder le cœur du Soleil. La détection annoncée par Garcia et al. (Science, 2007) n'a cependant pas complètement convaincu la communauté. Un grand travail de revue regroupant des collègues travaillant sur les principaux instruments susceptibles de détecter ces modes et les théoriciens a été mené par Appourchaux et al. (2010) qui laisse les modes proposés au rang de candidats modes g vu la faiblesse du signal détecté. Une inconnue notoire est l'amplitude attendue de ces modes g solaires (voir Appourchaux 2013).

2.2 Les étoiles de type solaire

La période récente a vu une véritable révolution en matière de sismologie stellaire. Les missions CoRoT et *Kepler* en ont été à l'origine avec la qualité de leurs observations. L'IAS a été particulièrement impliqué dans CoRoT: après les développements instrumentaux avant le lancement (fin 2006), le laboratoire a assuré la responsabilité de l'archivage et de la mise à disposition des données, ainsi que celle de certaines chaînes de traitement (avec de plus la fonction d'*Instrument Scientist* assurée par M. Ollivier de l'IAS depuis quelques mois). Le laboratoire a aussi été largement impliqué dans l'exploitation scientifique avec par exemple la première analyse d'une étoile observée par CoRoT montrant des oscillations de type solaire : HD49933 (Appourchaux et al. 2008). Ces travaux et d'autres menés à l'IAS ont montré la complexité (comparé au cas solaire) de ce genre d'analyse (Benomar et al. 2009a,b). L'équipe a participé à l'analyse d'autres pulsateurs de type solaire observés par CoRoT dont l'interprétation a permis le début de l'exploration de la séquence principale par la sismologie. Par exemple, Boumier et al. (2013) ont montré la contradiction entre l'âge de l'étoile relativement élevé (plus de 5 milliards d'années) déterminé à partir de

données sismiques et l'abondance en lithium, élevée et donc comparable à celle d'une étoile beaucoup plus jeune (2 milliards d'années) le lithium étant censé disparaître par transport et combustion au cours de l'évolution de l'étoile. Cela mènera à mieux comprendre les phénomènes de transport qui jouent un rôle important dans l'abondance du lithium, ce dernier étant détruit quand il atteint les couches profondes à haute température de l'étoile.

L'équipe s'est aussi investie dans l'analyse et l'exploitation des données de la mission *Kepler*, avec l'analyse de plus de 60 pulsateurs de type solaire (Appourchaux et al. 2012a) avec un travail plus précisément appliqué à la mesure de l'amortissement des oscillations (Appourchaux et al. 2012b) qui a montré un bon accord entre ces observations et les calculs théoriques d'amortissement de Belkacem et al. (2012).

De manière plus générale, ces travaux visent aussi à la détermination des caractéristiques globales des étoiles observées (rayon, masse, âge) qui sont d'un grand intérêt quand il s'agit de caractériser d'éventuelles planètes en orbite autour de ces étoiles (Gaulme et al. 2010a,b).

2.3 Les étoiles évoluées

Une observation complètement inattendue fut celle des oscillations des géantes rouges par CoRoT, détectables en grand nombre grâce à leur amplitude élevée et à la stabilité de l'instrument. Ce sont ainsi des centaines de géantes rouges oscillantes qui furent détectées par CoRoT (De Ridder et al. 2009) puis des milliers par *Kepler* (voir Stello et al. 2013). Ces détections mènent à plusieurs développements, dont la modélisation de la structure interne de ces étoiles (voir par ex. Baudin et al. 2012a) qui contribuent à la compréhension de l'évolution des étoiles après épuisement de leur hydrogène central. Ensuite, tout comme cela a été fait pour les étoiles de la séquence principale, les mesures de l'amortissement et de l'amplitude (équilibre excitation/amortissement) des modes (Baudin et al. 2011) peuvent être comparées aux calculs théoriques en la matière (Belkacem et al. 2012). Ceci a permis notamment la mise en évidence d'effets non-adiabatiques importants (Samadi et al. 2012).

2.4 Les étoiles massives

Une autre surprise amenée par CoRoT fut la découverte d'oscillations de type solaire (c.à.d. excitées par la convection turbulente) dans des étoiles massives (Belkacem et al. 2009), généralement affectées par des oscillations excitées par un mécanisme lié à la variation d'opacité avec la température du plasma stellaire. Cette observation repose entre autres sur une méthode d'analyse temps-fréquence initialement développée pour le cas solaire (Baudin et al. 1996). Cette découverte confirme l'existence de zones convectives dans les étoiles massives, non pas en surface comme pour les étoiles de plus petite masse, mais dans le cœur central ou dans une zone intermédiaire. La mesure des amplitudes peut fournir des contraintes sur l'excitation des oscillations (et donc sur la convection) mais les premières tentatives d'interprétation n'ont pas réellement permis de situer précisément la source de l'excitation, soit dans la zone convective centrale ou dans des couches intermédiaires. La mesure de l'amortissement de ces oscillations fournit par ailleurs un diagnostic contraignant sur l'âge de l'étoile (Baudin et al. 2012b).

3. Structure externe du Soleil et des étoiles

3.1 Moyens de diagnostics

Résoudre les questions posées par les observations de l'atmosphère solaire passe par des moyens de diagnostics appropriés. Les observations UV (imagerie et surtout spectroscopie) constituent le moyen privilégié et incontournable d'obtenir une description (densité, température...) du plasma observé. Ce type de diagnostic est couramment utilisée à l'IAS: Parenti et al. 2008 (dans le cas des protubérances), Buchlin et al. 2009 (dans le cas du Soleil calme). La spectroscopie X est aussi un outil important pour les événements plus énergétiques (Zabaydullin & Dubau, 2012, 2013). L'imagerie est tout aussi incontournable pour l'étude des structures observées (Tison 2008, Auchère et al., 2013) et sa combinaison avec la spectroscopie se révèle particulièrement puissante. En effet, l'intégration le long de la ligne de visée complique considérablement l'interprétation des données. Pour lever cette ambiguïté, on dispose de plusieurs outils, dont la Differential Emission Measure (DEM) qui permet d'obtenir la distribution thermique du plasma le long de la ligne de visée, et la tomographie (à partir de l'imagerie), qui permet cette fois-ci d'obtenir des informations d'ordre géométrique. Le couplage de ces deux méthodes permet d'obtenir un diagnostic tridimensionnel en température et densité de la couronne. A l'heure actuelle, l'IAS dispose d'un des deux

seuls codes capables de réaliser ce couplage. Cependant, le problème inverse inhérent à ces deux méthodes complique considérablement leur interprétation, en particulier la DEM, pour laquelle la caractérisation de ses propriétés a montré que le niveau d'incertitudes actuel, inclus dans les données atomiques et les observations limite la précision du diagnostic des conditions thermiques coronales. Les propriétés de cet outil ont été évaluées, ses limitations quantifiées, dans le cadre d'observations en imagerie EUV de AIA/SDO (Guennou et al. 2012a,b; Dudok de Wit et al. 2013) et des mesures spectroscopiques de EIS/Hinode (Guennou et al. 2013).

Les structures observées étant tridimensionnelles, un outil tomographique a aussi été développé à l'IAS et appliqué aux données STEREO (Barbey et al. 2008, Barbey et al. 2013, Guennou et al. 2013) pour obtenir la distribution volumique d'émissivité du plasma.

3.2 Petites échelles spatiales: turbulence, chauffage à micro-échelle

Les plasmas solaires doivent être étudiés dans un régime de turbulence pleinement développée dans le cadre du chauffage de la couronne solaire comme dans celui de l'accélération du vent solaire. Le modèle utilisé est celui de la magnétohydrodynamique (chauffage de la couronne) avec éventuellement un raffinement incluant l'effet Hall (vent solaire). L'objectif est de comprendre, par exemple, comment le transfert de l'énergie à travers les échelles spatiales peut chauffer un milieu où un fort champ magnétique ambiant est présent (Bigot, Galtier & Politano, 2010) — c'est le régime de turbulence d'ondes — ou comment le découplage entre les électrons et les ions entraîne le plasma dans un nouveau régime de turbulence forte (Meyrand & Galtier, 2012). En parallèle, une étude est actuellement menée pour comprendre comment la compressibilité d'un plasma affecte ses propriétés statistiques (Banerjee & Galtier, 2013). Ces travaux (une vingtaine d'articles) se font analytiquement ou numériquement à l'aide des supercalculateurs mis à disposition par l'IDRIS.

Le chauffage du plasma coronal a donc très certainement lieu à de petites échelles spatiales. Les simulations numériques MHD sont un moyen de le caractériser. C'est par exemple ce qu'a fait Buchlin et al. (2010) en utilisant de telles simulations pour explorer le chauffage à l'intérieur des boucles coronales. Ces simulations permettent d'explorer les paramètres physiques de ces boucles et d'estimer l'efficacité du chauffage, son comportement temporel (intermittent), son échelle spatiale, pour comparer dans une étape ultérieure avec des observations pour tenter d'y trouver la signature de ce processus.

Une question d'importance est celle de la génération de champ magnétique à petite échelle, dans un contexte turbulent. Cette question peut être traitée par des simulations numériques, mais celles-ci sont très vite limitées dans leur domaine d'échelles spatiales. Buchlin (2011) a abordé cette question de la dynamo locale en s'appuyant sur des modèles magnéto-hydrodynamiques "en couches" qui lui permettent de couvrir un domaine d'échelles spatiales bien plus grand que les simulations classiques. Buchlin (2011) montre ainsi que le nombre de Reynolds magnétique critique, celui au-delà duquel la dynamo devient efficace, est constant (ou presque) pour un très grande domaine du nombre de Reynolds. Autrement dit, la dynamo locale devient efficace dès que la diffusivité magnétique est assez faible, et ce quelle que soit la viscosité du plasma, ce que les simulations numériques ne pouvaient montrer.

Une des manifestations du chauffage à petite échelle est peut-être les embrillancements intermittents observés en EUV dans la couronne. Pour quantifier l'impact de ces embrillancements, il s'agit d'obtenir les distributions de l'énergie qu'ils dissipent. Pour cela V. Joulin prépare dans le cadre de sa thèse un code qui permet de détecter de façon automatique ces embrillancements se produisant aux petites échelles spatiales et temporelles dans les bandes EUV d'AIA (94Å, 131Å, 171Å, 193Å, 211Å et 335Å). Grâce aux cartes de températures et de mesures d'émission (voir plus haut) nous pouvons calculer les énergies thermique, radiative et de conduction des embrillancements détectés. Les résultats obtenus nous permettront de savoir si ces événements contribuent de façon significative au chauffage de la couronne.

Des mesures de température (par l'intermédiaire de largeur de raies) dans les trous coronaux effectuées par Dolla & Solomon (2008, 2009) montrent que les ions atteignent des températures plus élevées que les électrons. Cependant, si cela reste un fait, l'origine de ce chauffage reste incomprise: un mécanisme souvent considéré, celui de la dissipation d'ondes d'Alfvén, devrait avoir pour conséquence une décroissance des vitesses non thermiques avec l'altitude, signe de la dissipation des ondes. Dolla & Solomon ont mené un travail d'analyse tenant en compte des effets négligés par d'autres auteurs (en particulier l'influence de la lumière diffusée). Ce travail minutieux ne montre pas la décroissance attendue

avec l'altitude, signature de l'amortissement de ces ondes, ce qui oblitère l'hypothèse du chauffage par ce mécanisme.

3.3 Grandes échelles spatiales

La haute atmosphère solaire est dominée par le champ magnétique qui sculpte littéralement le plasma chromosphérique et coronal. Cela donne lieu à l'observation de différentes structures de grande taille comme les plumes, les filaments et protubérances, les boucles coronales... Les comprendre est fondamental pour être en mesure de faire le diagnostic de ces structures, modéliser leur évolution temporelle et spatiale, prévoir leur déstabilisation dans le cas des filaments/protubérances, ce qui reste parmi les objectifs fondamentaux de la compréhension des relations Soleil-Terre.

Filaments et protubérances restent donc des objets d'une grande complexité, mêlant plasmas de différentes températures (relativement froides) dans une structure magnétique les maintenant dans un environnement coronal beaucoup plus chaud. La complexité de ces objets est par exemple mise en évidence par des observations dans les raies H α et Ly α observées par l'instrument VAULT (Vial et al. 2012): pour des températures plus froides (H α), le filament montre une structure en fils très fins ($\sim 0.4''$) alors qu'à plus haute température (Ly α) cette structure fine disparaît, signature de la complexité de ces objets. La méthode basée sur la DEM (voir 3.1) permet aussi d'investiguer ce type de structure (Gunnarsson et al. 2011) à partir d'observations UV de SUMER en comparant la DEM de modèles de protubérances avec celle observée (Parenti & Vial 2007) pour contraindre les modèles.

Les éruptions de filaments/protubérances sont un des aspects d'un des phénomènes les plus marquants dans les relations Soleil-Terre : les éjections de masse coronale (CME sous son appellation anglaise couramment utilisée - 20000 ont été observées par SOHO). Des centaines de millions de tonnes de matière sont alors éjectées à des vitesses de plusieurs centaines de km/s. Les impacts sur l'atmosphère terrestre sont clairement établis (voir Hanuš et al., 2006 par ex.). La propagation de ces CME a été étudiée à partir d'observations STEREO par Dai et al. (2010) qui suggère que, dans le cas de l'événement étudié, le front d'onde observée correspond plutôt à l'élévation de matière suite à une reconfiguration du champ magnétique et non à la propagation d'une onde. Des observations plus récentes suggèrent que ce phénomène peut coexister avec la présence d'une réelle onde. Cette dualité avait déjà été suggérée par Zhukov & Auchère (2004). La question qui se pose ensuite est celle du déclenchement d'un tel événement, et éventuellement de sa prévision. Des phénomènes oscillants sont parfois considérés comme des précurseurs de CME : un des filaments observés par Bocchialini et al. (2011) pourrait en être un exemple.

La reconfiguration de la topologie du champ magnétique durant ces événements est souvent associée à *flare* (augmentation brusque du rayonnement X). Un exemple d'un tel événement est celui observé par la mission spatiale XRT/*Hinode* dont l'analyse a été menée par Parenti et al. (2010). Un diagnostic thermique (carte de température) a été effectué, mettant en évidence l'évolution de structures en boucles complexes, et la propagation du chauffage dans des boucles de tailles croissantes. Cette analyse a aussi permis la quantification de l'énergie thermique mise en jeu dans cet événement.

Durant un autre événement du même type (*flare*), une étude portant sur la source des SEP (Solar Energetic Particles) a permis de remonter à l'éruption initiale, de calculer le taux de reconnexion magnétique et enfin d'expliquer les sursauts Types III associés (Li et al. 2009). Cette étude combine mesures particulières (in-situ y compris neutrons), mesures remote sensing de l'UV à la radio et modélisation magnétique.

La compréhension des grandes structures passe aussi par la modélisation du champ magnétique coronal. Il s'agit de reconstruire celui-ci à l'aide de modèles numériques associés (Amari et al. 2013) à des données magnétiques mesurées par des instruments au sol (VSM/SOLIS, MTR/THEMIS, GONG, ATST, EST) ou spatiaux (SOT/*Hinode*, HMI/SDO, Solar Orbiter). Une première étape a consisté à traiter les données nouvellement disponibles de SDO/HMI afin de s'en servir comme conditions aux limites des modèles numériques. Différentes études sont menées au sein de l'équipe et dans le cadre de collaborations nationale et internationale (étude de régions actives émergentes et éruptives, étude de la structure magnétique globale du Soleil avant éruption ou lors de phase calme et comparaison avec différentes observations, caractérisation des structures magnétiques impliquées dans le chauffage, comparaison des modèles numériques et des différentes données disponibles).

Des oscillations à grande échelle observées dans la couronne peuvent aussi avoir un lien avec le phénomène de chauffage à petite échelle. La thèse soutenue par E. Tison en Mars 2010 porte sur la