Université Paul Sabatier, Toulouse III

Habilitation à diriger des recherches

présentée par

Jean-François Donati

Exploration observationnelle des topologies magnétiques stellaires

Soutenue le 9 Juin 1998, devant le jury :

John Landstreet, University of Western Ontario, Canada (président et rapporteur)
André Mangeney, Observatoire de Meudon (rapporteur)
Jean-Paul Zahn, Observatoire de Meudon (rapporteur)
Claude Catala, Observatoire Midi-Pyrénées (examinateur)
Andrew Collier-Cameron, University of St. Andrews, Ecosse (examinateur)
Jean-Louis Leroy, Observatoire Midi-Pyrénées (examinateur)
Meir Semel, Observatoire de Meudon (examinateur)
Sylvie Vauclair, Observatoire Midi-Pyrénées (examinateur)

Remerciements

Je tiens à remercier John Landstreet, André Mangeney et Jean-Paul Zahn pour l'intérêt particulier qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'être rapporteurs, ainsi qu'à Claude Catala, Meir Semel, Andrew Cameron et Jean-Louis Leroy qui m'ont souvent aidé et soutenu dans l'effort de recherche dont je présente ici un bilan. Je remercie également mes amis australiens David Rees, Steve Brown et Brad Carter, sans l'investissement desquels une partie importante de ce travail n'aurait sans doute jamais vu le jour. Je suis enfin reconnaissant à Gregg Wade pour son implication intensive lors des phases de tests observationnels du polarimètre MuSiCoS, ainsi qu'à Sylvie Vauclair pour sa participation à la commission d'examen.

Cette étude aurait été bien difficile sans la participation des ingénieurs ou techniciens du CNRS/MENESR (en particulier celle d'Olivier Durand, de Gérard Gallou, de Patrick Rabou et de Guy Delaigue), sans le financement de nombreux organismes (comme celui du Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, de l'Institut National des Sciences de l'Univers et de la Région Midi-Pyrénées) ni les allocations généreuses des comités d'attribution de temps de télescope (en particulier sur le Télescope Anglo-Australien et le télescope Bernard-Lyot). Que toutes ces personnes et organismes trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Je dédie ce travail à Catherine, Nicolas et Antonin, pour la motivation qu'ils me donnent d'avancer chaque jour un peu plus.

Résumé

Ce document décrit un effort d'exploration observationnelle des topologies magnétiques stellaires, pour différents types d'objets à travers le diagramme de Hertzsprung-Russell. Le but scientifique de cette étude est d'essayer de comprendre les origines des champs magnétiques stellaires, et leur impact sur les processus physiques qui opèrent dans les atmosphères des étoiles (e.g. convection, turbulence, diffusion, accrétion, perte de masse) et qui influent par conséquent sur l'évolution stellaire à moyen et long terme.

Après un bref historique des techniques traditionnelles de mesure des champs magnétiques stellaires, je présente les principes d'une nouvelle méthode, basée sur l'analyse spectropolarimétrique de la lumière stellaire à haute résolution spectrale et temporelle, et dont les premiers résultats prometteurs (obtenus au cours de ma thèse de doctorat) ont servi de motivation à cette nouvelle étude plus ambitieuse. Je détaille également les développements instrumentaux qu'il a fallu conduire dans le cadre de ce travail, ainsi que les outils informatiques de réduction (e.g. extraction optimale), d'analyse (e.g. corrélation croisée) et de modélisation (e.g. reconstruction d'image) qu'il a fallu adapter, améliorer et parfois développer pour rendre cette nouvelle technique très compétitive et performante, puis pour décrypter et interpréter les observations en terme de topologies magnétiques stellaires. Notons en particulier que, contrairement aux méthodes de mesure traditionnelles qui ne fournissent qu'une information magnétique moyennée sur tout l'hémisphère visible de l'étoile observée, cette nouvelle technique permet d'accéder (pour les étoiles en rotation rapide) aux structures magnétiques *à petite échelle*, et à *l'orientation* des lignes de champ à l'intérieur de ces structures.

J'expose ensuite les résultats obtenus dans le cadre de cette étude pour les étoiles dont le magnétisme, dynamo ou fossile, est déjà connu depuis longtemps, à savoir les étoiles de type solaire, les étoiles Ap magnétiques et les naines blanches. Ce travail a permis par exemple de détecter les champs magnétiques d'une vingtaine d'étoiles très actives d'états évolutifs variés (échantillonnant l'intervalle compris entre la phase de contraction vers la séquence principale et la phase géante rouge), et de mettre en évidence des distorsions structurelles importantes de leur topologie magnétique par rapport au cas solaire. En particulier, nous avons pu démontrer que les champs magnétiques à grande échelle de ces étoiles sont au moins deux ordres de grandeur plus intenses que celui du Soleil, et que les processus dynamo qui les engendrent y opèrent à travers *toute* la zone convective, et ne sont pas confinés à la seule région d'interface avec le cœur radiatif comme c'est le cas pour le Soleil. Nous avons également mesuré les signatures Zeeman dans tous les états de polarisation (circulaire et linéaires) pour quelques étoiles Ap magnétiques et suivi leur modulation rotationnelle, ce qui devrait à terme nous permettre de décrire plus précisément comment et de comprendre pourquoi les topologies magnétiques de ces objets diffèrent d'une expansion multipolaire de bas degré.

Je présente enfin un début d'exploration systématique du diagramme de Hertzsprung-

Russell à la recherche de nouvelles classes d'étoiles magnétiques, et peut-être de nouvelles formes de magnétisme stellaire. Parmi les très bons candidats potentiels figurent les étoiles chaudes, pour lesquelles un champ magnétique est souvent invoqué pour expliquer les structurations azimutales observées dans leur vent (étoiles O, étoiles Be, étoiles Ae/Be de Herbig, étoiles Wolf-Rayet, supergéantes A/B), mais aussi les disques d'accrétion des objets jeunes (e.g. T Tauri classiques, objets FU Ori) ou des variables cataclysmiques dont la viscosité anormale est souvent interprétée en terme de champ magnétique. Les premières tentatives, qui ont permis en particulier de détecter le champ magnétique d'une étoile de Herbig, sont très prometteuses. L'avenir de cette campagne exploratoire est aujourd'hui conditionné à la construction d'un instrument de nouvelle génération sur le télescope Canada-France-Hawaii, projet dont je suis le responsable scientifique.

Table des matières

Chapitre 1

Introduction

1.1 Motivation scientifique

Il est bien connu que le champ magnétique joue un rôle important dans de nombreux problèmes physiques en général, et en astrophysique en particulier, à quasiment toutes les échelles spatiales et temporelles. C'est bien sûr aussi le cas en physique stellaire, puisque le champ magnétique intervient de manière décisive à toutes les phases de la vie d'une étoile, depuis la contraction pré-séquence principale jusqu'aux phases ultimes de l'évolution. Il peut en particulier affecter des paramètres aussi fondamentaux pour l'évolution stellaire que la rotation, la masse, la gravité de surface ou la composition chimique d'une étoile, en modifiant de manière importante les processus de transport de la matière dans les intérieurs et les atmosphères stellaires. Pour comprendre l'évolution stellaire sous toutes ses facettes, il est donc nécessaire de disposer d'une évaluation précise des paramètres magnétiques (non seulement l'intensité du champ, mais aussi sa topologie et la variation temporelle de cette topologie), pour un échantillon d'objets représentatif des différentes phases évolutives.

Dans ce contexte, une des premières questions qui se pose est de comprendre *l'origine* de ce champ magnétique. Est-ce un champ amplifié par des mouvements turbulents au sein d'un plasma partiellement ionisé et conduisant à une structure magnétique assez complexe et rapidement variable, comme par exemple celle du Soleil ? Ou plutôt un champ fossile, emprisonné dans l'étoile et amplifié lors de la phase de contraction pré-séquence principale, produisant une structure magnétique relativement simple à grande échelle et très lentement variable, comme celle des étoiles chimiquement particulières ? Ou encore à d'autres mécanismes non encore identifiés, et pourtant régulièrement invoqués pour expliquer l'activité de certaines étoiles chaudes, comme par exemple les étoiles Ae/Be de Herbig ? Le débat est loin d'être clos, comme on le verra au cours des prochains chapitres.

Il s'agit aussi de mieux saisir *l'impact* de ce champ magnétique sur les phénomènes physiques qui affectent l'évolution stellaire, et en particulier sur les processus de transport de matière dans les intérieurs et les atmosphères stellaires. Si les étoiles chimiquement particulières nous renseignent sur le transport des éléments par diffusion microscopique en présence de champ magnétique, les étoiles froides nous permettent d'étudier les processus dynamo, et par conséquent les mécanismes physiques sous-jacents que sont la convection, la turbulence, la rotation différentielle et la circulation méridienne. L'étude du magnétisme des disques d'accrétion ou des étoiles affectées par une forte perte ou accrétion de matière devrait aussi nous apprendre beaucoup sur les mécanismes de dissipation du moment cinétique.

1.2 Physique des étoiles magnétiques

Il n'y a en fait aujourd'hui que très peu d'étoiles (quelques centaines tout au plus) pour lesquelles le champ magnétique a été détecté de manière directe par les signatures Zeeman qu'il engendre dans les raies spectrales observées en polarisation circulaire, linéaire et en lumière non polarisée. Ces étoiles peuvent se regrouper en deux classes, celles comme le Soleil dont le magnétisme est d'origine purement magnétohydrodynamique (magnétisme dynamo), et celles comme les étoiles chimiquement particulières ou les naines blanches dont le magnétisme est probablement un vestige d'une étape évolutive antérieure (magnétisme fossile).

1.2.1 Magnétisme dynamo

C'est au début de ce siècle que Hale (1908) met pour la première fois en évidence, à l'aide d'observations spectroscopiques en polarisation circulaire, la présence d'un champ magnétique sur une étoile, le Soleil, et plus particulièrement à l'intérieur des taches sombres qui maculent sa surface. Les très nombreuses observations du champ magnétique solaire obtenues depuis cette époque (non seulement dans les taches, mais aussi dans le réseau et à l'intérieur des supergranules, Stenflo 1989) ont fait avancer considérablement notre connaissance de l'atmosphère solaire, en permettant en particulier de proposer la première formulation de la théorie dynamo (Parker 1955) : la convection en présence de rotation engendre une rotation différentielle qui transforme un champ initialement poloïdal en un champ toroïdal plus intense. Les mouvements convectifs, rendus cycloniques par la force de Coriolis, régénèrent ensuite une composante poloïdale à partir de la composante toroïdale, mais de polarité opposée à celle qui lui a donné le jour. C'est l'enchaînement répété de ces opérations élémentaires qui, croit-on (dans le modèle de la dynamo $\alpha\Omega$), constitue la physique de base du cycle magnétique du Soleil (dont la période moyenne est de 22 ans).

Si les premiers modèles théoriques de dynamo (e.g. Steenbeck & Krause 1969, caractérisés par une paramétrisation ad'hoc des phénomènes physiques impliqués dans le processus) ont permis de reproduire approximativement certains aspects des observations (et notamment la migration équatoriale des régions actives au cours du cycle), les approches récentes, pourtant plus cohérentes car basées sur la résolution des équations de la magnétohydrodynamique (MHD) dans un milieu convectif en présence de rotation, sont encore limitées par les performances des calculateurs et manquent encore singulièrement de réalisme. De nombreuses questions relatives aux processus dynamo dans les enveloppes convectives des étoiles froides restent sans réponse. Citons par exemple les interrogations des théoriciens et des observateurs sur le rôle des structures magnétiques à petite échelle dans le cycle d'activité (Stenflo 1989), ou sur le lieu exact de la régénération de la composante poloïdale du champ (Durney et al. 1993 ; MacGregor & Charbonneau 1997).

C'est dans le but de trouver de nouvelles pistes pour répondre à ces questions que les astronomes se sont tournés vers l'étude des champs magnétiques dans d'autres étoiles froides présentant le même type de phénoménologie magnétique que le Soleil (i.e. présence d'une chromosphère et d'une couronne à très haute température, mises en évidence par leur signatures spectrales dans l'UV et en rayons X). L'idée est de replacer le Soleil dans un contexte évolutif, et de regarder comment les paramètres magnétiques de ces étoiles dépendent des paramètres stellaires fondamentaux (e.g. rotation angulaire, température effective, âge, masse). Si la complexité des topologies magnétiques de ces objets a tout d'abord empêché toute détection par des méthodes polarimétriques similaires dans leur principe à celle employée par Hale dans le cas du Soleil (e.g. Borra et al. 1984), les résultats obtenus par la suite au moyen d'une analyse détaillée des profils de raies spectrales en lumière non polarisée (Robinson 1980 ; Saar 1996) ne sont pas vraiment à la hauteur des espérances : fournissant uniquement des mesures intégrées sur la totalité d'un hémisphère stellaire, ces techniques ne permettent en effet pas d'étudier les détails de la topologie magnétique (e.g. position et mouvement propre des taches, orientation des lignes de champ dans ces taches), et donc de tester efficacement les différentes théories dynamo proposées dans le cas particulier du Soleil.

1.2.2 Magnétisme fossile

La première détection de champ magnétique sur une étoile autre que le Soleil est obtenue par Babcock (1947) avec un instrument similaire à celui utilisé pour les observations solaires. Contre toute attente, le champ de cette étoile, de la classe des étoiles chimiquement particulières, ne possède que peu de similitudes avec celui du Soleil : bien que les observations indiquent un champ variable avec le temps, il est maintenant clair que cette variation est en fait une modulation induite par la rotation de l'étoile, plutôt qu'à une variation temporelle intrinsèque (due par exemple à un cycle d'activité comme sur le Soleil). En suivant les détails de cette modulation, on peut étudier la structure à grande échelle du champ magnétique des étoiles magnétiques de cette classe, qui s'avère être relativement simple (en première approximation et dans la grande majorité des cas, un dipôle dont l'axe de symétrie fait un angle avec l'axe de rotation de l'étoile) et stable sur des périodes d'au moins plusieurs dizaines d'années. Si elles confirment globalement cette vision des choses, les observations plus récentes (e.g. Leroy et al. 1994, utilisant notamment des mesures en polarisation linéaire) indiquent toutefois que la topologie magnétique de ces étoiles s'écarte souvent légèrement, mais significativement, de l'axisymétrie, au moins dans les parages de l'équateur magnétique.

L'hypothèse la plus crédible aujourd'hui est que le champ magnétique des objets de cette classe est un reste du champ galactique, emprisonné dans le nuage protostellaire et amplifié lors de la contraction du nuage vers la séquence principale. Bien que cette suggestion ne soit toujours pas démontrée, loin s'en faut, c'est celle qui permet de rendre compte le mieux des observations (et en particulier de la relative simplicité des structures magnétiques, de l'invariance temporelle de leur paramètres et de leur apparente décorrélation avec l'âge et la rotation de l'objet), en comparaison d'autres hypothèses possibles sur l'origine du champ (e.g. mécanisme dynamo invoqué pour expliquer le magnétisme solaire). Il est probable qu'une analyse détaillée des structures magnétiques de ces étoiles permettra d'avancer dans ce débat.

Le fait que toutes les étoiles magnétiques de la classe des étoiles chimiquement particulières montrent des hétérogénéités d'abondance à leur surface et que ces hétérogénéités reproduisent grossièrement la répartition du champ magnétique, confirme l'idée intuitive que le champ magnétique doit influencer le mécanisme dominant de transport des espèces chimiques dans l'atmosphère, à savoir la diffusion microscopique sous l'action combinée de la gravité et de la pression de radiation (mécanisme tenu pour responsable des anomalies d'abondance observées dans cette classe d'objets, Michaud 1970). Il est en effet naturel de penser qu'en première approximation, les particules neutres diffusent radialement tandis que les ions se propagent le long des lignes de champ magnétique (Mégessier 1984 ; Babel & Michaud 1991). Pour tester ce scénario assez simpliste (il est en effet probable que l'influence du champ magnétique sur la diffusion soit en fait bien plus complexe) et si possible le raffiner, il est nécessaire de disposer, pour certaines étoiles bien représentatives de cette classe, de cartographies précises de la topologie magnétique ainsi que de l'abondance de nombreuses espèces chimiques de sensibilité très différente à la gravité et à la pression de radiation.

Restes évolutifs des étoiles de faible masse, les naines blanches partagent plusieurs caractéristiques avec les étoiles chimiquement particulières. Si leur magnétisme est en moyenne bien plus intense (typiquement plusieurs dizaines à plusieurs centaines de MG), la structure de leur champ est très similaire, souvent assimilable à un dipôle incliné par rapport à l'axe de rotation. De même que pour les étoiles chimiquement particulières, l'absence apparente de variabilité intrinsèque de leur structure magnétique est interprétée comme une indication de l'origine fossile du champ : on pense aujourd'hui que les naines blanches magnétiques sont les vestiges des étoiles magnétiques de la séquence principale. Enfin, les hétérogénéités d'abondance qu'on croit déceler à leur surface (dues cette fois à une séparation purement gravitationnelle des espèces chimiques par diffusion) semblent aussi reliées à leur structure magnétique. Toutefois, les informations dont on dispose à ce sujet sont encore très fragmentaires ; des études plus approfondies devraient nous permettre de mieux comprendre l'influence du magnétisme sur cette étape ultime de l'évolution.

1.2.3 Autres formes de magnétisme ?

Il y a sans doute un très grand nombre d'autres étoiles magnétiques à travers le diagramme de Hertzsprung-Russell. De nombreuses études se sont attachées à détecter les signatures Zeeman d'étoiles montrant des indices indirects de la présence possible d'un champ magnétique.

Parmi les étoiles chaudes qui perdent de la matière à un taux assez soutenu, certaines ont un vent qui présente une structuration azimutale, que l'on détecte sous la forme d'une modulation rotationnelle (étoiles O, étoiles Wolf-Rayet, étoiles Ae/Be de Herbig, β Céphéides, étoiles Be) ou tout simplement d'une variabilité intrinsèque (supergéantes A et B) des raies de résonance du spectre UV ou des raies d'émission du spectre visible (Kaper et al. 1996 ; St Louis et al. 1996 ; Praderie et al. 1986 ; Henrichs et al. 1993 ; Smith 1989 ; Kaufer et al. 1996). Dans les disques d'accrétion des variables cataclysmiques ou des objets jeunes (de type T Tauri, FU Orionis), les taux d'accrétion observés lors des phases les plus actives impliquent généralement une viscosité anormalement forte à l'intérieur du disque (e.g. Shakura & Sunyaev 1973).

Dans chacun de ces exemples, les phénomènes observés peuvent être imputés à la présence d'un champ magnétique qu'il serait intéressant de détecter, afin d'étudier plus en profondeur les phénomènes physiques associés (confinement magnétique ou structuration en jets lents et rapides d'un vent stellaire, régions d'interaction en corotation, instabilités magnétiques et perte de moment cinétique dans les disques d'accrétion), et éventuellement de mettre en évidence de nouvelles formes de magnétisme stellaire (e.g. dynamo turbulente dans une atmosphère radiative fortement cisaillée, Vigneron et al. 1989 ; Lignières et al. 1996).

1.3 Objectifs de cette nouvelle étude

Le but du travail que je présente ici a été d'essayer de détecter et d'analyser en détail les structures magnétiques de différents types d'étoiles à travers le diagramme de Hertzsprung-Russell, afin d'étudier les conséquences de ce magnétisme sur la physique des atmosphères stellaires et, plus généralement, sur l'évolution stellaire. Il a débuté à l'Observatoire de Meudon dans le cadre de ma thèse de doctorat (Donati 1990), sous l'impulsion scientifique de M. Semel et F. Praderie.

Il a d'abord fallu développer et qualifier de nouvelles méthodes d'analyse (Semel 1989 ; Donati et al. 1989 ; Donati & Semel 1990), les techniques existantes s'étant souvent révélées inadaptées ou trop limitées dans leur diagnostics. Il a ensuite été nécessaire de construire de nouveaux instruments de mesure adaptés aux techniques d'analyse à mettre en œuvre (Semel et al. 1993 ; Donati et al. 1998b). Il a enfin fallu construire les outils de réduction (Donati et al. 1997), d'optimisation (Semel & Li 1995 ; Donati et al. 1997) et de modélisation (Brown et al. 1991 ; Donati et al. 1994 ; Donati & Brown 1997) des nouvelles données accumulées lors de nombreuses campagnes d'observation, nationales et internationales.

Comme je le montre dans ce document et dans les publications jointes, de nombreux résultats originaux ont été obtenus, notamment en ce qui concerne l'étude du magnétisme dynamo et des phénomènes actifs associés dans les enveloppes convectives des étoiles de type solaire (Donati et al. 1992a, 1992b, 1997, 1998a ; Donati & Cameron 1997). Les progrès réalisés dans ce domaine ont encouragé l'extension de ce travail vers les étoiles dont le magnétisme est plutôt de type fossile (les étoiles chimiquement particulières et les naines blanches ; Donati et al. 1998b) et ont aussi motivé un début d'exploration systématique du diagramme de Hertzsprung-Russell (Steeghs et al. 1996 ; Donati et al. 1997 ; Donati & Wade 1998) à la recherche de nouvelles classes d'objets stellaires magnétisés (e.g. les étoiles chaudes ou les disques d'accrétion).

Chapitre 2

Détection et cartographie des topologies magnétiques stellaires

Dans la grande majorité des cas, c'est l'effet Zeeman qui est utilisé pour mettre en évidence de manière irréfutable la présence d'un champ magnétique à la surface d'une étoile. En scindant chaque niveau d'énergie (de nombre quantique de moment cinétique total J) d'un édifice atomique en $2J+1$ sous niveaux (chacun associé à un nombre quantique magnétique M compris entre $-J$ et J), le champ magnétique a pour effet de décomposer chaque raie spectrale en multiples sous composantes, dont l'état de polarisation dépend de la direction du champ magnétique par rapport à la ligne de visée, ainsi que de la quantité ΔM associée à la transition étudiée (égale à 0, -1 ou 1 pour les transitions dipolaires permises par les règles de sélection). La sensibilité magnétique d'une transition est estimée à l'aide d'un paramètre appelé facteur de Landé, et qui chiffre l'intensité plus ou moins grande du clivage magnétique obtenu (voir Mathys 1989 pour une description approfondie de l'effet Zeeman).

C'est généralement à l'aide d'observations spectroscopiques en lumière non polarisée (paramètre de Stokes I), en polarisation circulaire (paramètre de Stokes V) et/ou linéaire (paramètres de Stokes Q pour la polarisation N/S et E/O et U pour la polarisation NE/SO et NO/SE) que l'on étudie l'effet Zeeman sur les raies d'absorption des spectres solaire et stellaires. Tandis que les observations en polarisation circulaire et linéaire donnent respectivement accès à la composante longitudinale (i.e. projetée sur la ligne de visée) et transverse (i.e. perpendiculaire à la ligne de visée) du champ magnétique, les mesures en lumière non polarisée nous renseignent sur le module du champ (e.g. Landstreet 1992).

D'autres signatures indirectes (souvent beaucoup plus ambiguës et/ou difficiles à quantifier) peuvent aussi signaler la présence d'un champ magnétique, comme par exemple le rayonnement cyclotron ou synchrotron qu'émettent les particules ionisées spiralant le long des lignes de champ, ou bien encore l'effet Hanlé (correspondant à une dépolarisation magnétique de la polarisation par diffusion dans le cœur des raies fortes). Je ne discuterai pas ces résultats ici, car il ne permettent généralement pas de qualifier le champ magnétique à la *surface* d'une étoile, sauf dans de très rares cas (celui du Soleil, e.g. Faurobert-Scholl 1993 ; ou des variables cataclysmiques de type AM Her, e.g. Wickramasinghe & Ferrario 1988).

2.1 Techniques de détection

2.1.1 Limitation des méthodes traditionnelles

Jusqu'au début des années 1980, une mesure de champ magnétique stellaire se résume, dans la très grande majorité des cas, à une estimation de la composante longitudinale du champ moyennée sur l'hémisphère visible de l'étoile. Cette mesure peut être réalisée de différentes manières. La première, qui utilise des mesures spectroscopiques, consiste à estimer le décalage moyen entre deux spectres enregistrés dans des états de polarisation orthogonaux (circulaire droite et gauche) : c'est la méthode utilisée à l'origine par Babcock (1947) et reprise par de nombreux auteurs sous des formes de plus en plus sophistiquées (e.g. Brown & Landstreet 1981). La deuxième méthode, beaucoup plus précise et facile à mettre en œuvre, consiste à évaluer, à l'aide d'un polarimètre photoélectrique, la polarisation circulaire dans les ailes d'une raie de Balmer, la plupart du temps Hβ (Angel & Landstreet 1970 ; Landstreet 1980). Ces méthodes ont en particulier permis de détecter et d'étudier grossièrement les structures magnétiques d'une centaine d'étoiles chimiquement particulières. Pour un dixième d'entre elles environ, une modélisation plus raffinée a été rendue possible en utilisant des estimations de la composante transverse du champ, que permettent d'obtenir les mesures de polarisation linéaire en bande large (due à la polarisation linéaire Zeeman résiduelle des raies spectrales individuelles; Leroy 1962 ; Kemp & Wolstencroft 1974 ; Leroy 1995). Aucune de ces techniques n'a pourtant réussi à détecter les structures magnétiques des étoiles froides actives autres que le Soleil, car leur topologie est si fortement multipolaire que les composantes longitudinale et transverse du vecteur champ magnétique moyennées sur le disque stellaire sont quasiment nulles par effet de superposition destructive des contributions individuelles des taches magnétiques de polarités opposées (e.g. Borra et al. 1984 ; Leroy & Leborgne 1989 ; Bedford et al. 1995).

En 1980, Robinson (1980) propose de mesurer le champ de ces étoiles en étudiant le profil des raies spectrales mesurées en lumière non polarisée, et plus particulièrement en analysant leur élargissement en fonction de la sensibilité magnétique de la transition associée. On peut même, dans certains cas rares où le champ est extrêmement intense, observer la subdivision des raies spectrales en multiples sous-composantes Zeeman (Johns-Krull & Valenti 1996). Cette méthode, déjà utilisée une dizaine d'années auparavant dans le cas particulier des étoiles chimiquement particulières (Preston 1971), fournit une estimation de la fraction de surface stellaire occupée par les champs magnétiques, ainsi que de l'intensité moyenne du champ à l'intérieur de ces régions. Cette méthode a permis en particulier de mesurer le module du champ (et non plus uniquement sa composante longitudinale) dans de nombreuses étoiles chimiquement particulières (Mathys et al. 1997), mais aussi et surtout de détecter, pour la première fois, les champs magnétiques d'un large échantillon d'étoiles actives (e.g. Saar 1996). Malheureusement, cette méthode ne peut être utilisée que dans le cas des étoiles en rotation plutôt lente (Saar 1988) ; l'élargissement magnétique recherché est en effet si faible qu'il ne peut être détecté pour les rotateurs rapides (dont l'élargissement rotationnel des raies spectrales est trop intense), alors que ces objets très actifs (du fait même de leur taux de rotation élevé) seraient pourtant les plus intéressants à étudier du point de vue du magnétisme. Enfin, les études les plus récentes (e.g. Valenti et al. 1995 ; Rüedi et al. 1997) convergent sur la conclusion que les erreurs systématiques sur les paramètres magnétiques inhérentes à cette méthode sont en général assez importantes.

Mais, l'inconvénient majeur de toutes ces techniques d'analyse réside essentiellement dans leur inaptitude à caractériser la topologie détaillée des champs magnétiques stellaires, pour la simple et bonne raison qu'elles ne permettent que la mesure de quantités intégrées sur la totalité du disque stellaire, et donc très pauvres en information spatiale sur la structure du champ. Il est en particulier impossible d'avoir accès à la longitude et la latitude des taches à la surface de ces étoiles, à leur mouvement propre dans le référentiel en rotation ou encore à l'orientation des lignes de champ, information sans laquelle il est à peu près impossible de vouloir tester en détail les théories dynamo actuelles (voir Sect. 3.1).

2.1.2 Avantages des méthodes spectropolarimétriques

En analysant le profil des raies spectrales en polarisation circulaire et/ou linéaire (et non plus simplement leurs moments de plus bas degré que sont les composantes longitudinale et transverse du champ), il est possible d'obtenir une information beaucoup plus riche sur la structure magnétique de l'étoile observée. La toute première tentative dans cette direction (restée d'ailleurs sans suite jusqu'à très récemment) est due à Borra & Vaughan (1977), qui parviennent à mesurer les profils d'une raie spectrale dans tous les états de polarisation (paramètres de Stokes I, Q, U et V), pour une des étoiles chimiquement particulières les plus magnétiques. La grande majorité des études observationnelles s'est plutôt concentrée sur l'analyse des profils de raies en polarisation *circulaire* des étoiles chimiquement particulières magnétiques, dont l'amplitude relativement importante (de l'ordre de quelque % du continu) les rend facilement détectables (e.g. Glagolevskij et al. 1985 ; Mathys 1991, 1995).

C'est simplement depuis quelques années que les astronomes se sont attaqués à la détection de ces mêmes signatures dans les étoiles actives (dont l'amplitude relative excède rarement 0.3% ; Donati et al. 1992a ; Donati et al. 1997), ou de leurs analogues en polarisation linéaire dans les étoiles chimiquement particulières magnétiques (d'amplitude très similaire, Donati et al. 1998b ; Wade et al. 1998). Collectées tout au long du cycle rotationnel, de telles données peuvent être utilisées pour contraindre fortement la modélisation de la structure magnétique d'une étoile, et parfois même (dans le cas particulier des étoiles froides en rotation rapide) pour reconstruire les détails de sa topologie (avec l'aide d'un logiciel automatique de reconstruction d'image) sans hypothèse a priori sur sa structure à grande échelle. Cette méthode originale, baptisée imagerie Zeeman-Doppler et dont le principe est décrit en Sect. 2.3, a été proposée par Semel (1989). Initiée sous l'impulsion commune de M. Semel, F. Praderie et P. Gondoin à l'Observatoire de Meudon, cette technique a été étudiée de manière plus détaillée et mise en application dans le cadre de ma thèse de doctorat (Donati 1990). C'est dans cette direction très prometteuse que j'ai continué à investir la majorité de mes efforts.

2.2 Mesure des signatures Zeeman

C'est essentiellement par manque d'instrumentation adéquate sur la grande majorité des télescopes existants que les techniques spectropolarimétriques d'investigation des topologies magnétiques stellaires ne sont encore que faiblement utilisées.

2.2.1 Instrumentation

L'instrumentation requise est un spectrographe haute résolution (typiquement 50 000 ou plus), couplé à un polarimètre permettant une analyse de la lumière stellaire dans les états de polarisation circulaire et linéaires (et incluant donc au moins un cristal biréfringent et une lame quart d'onde orientable en azimut). Une des difficultés majeures vient du fait que, alors que le polarimètre doit être placé avant toute réflexion oblique (i.e. au foyer primaire ou Cassegrain du télescope pour minimiser la polarisation d'origine instrumentale), les spectrographes haute résolution sont, quant à eux, très souvent installés au foyer Coudé (de par leur taille relativement imposante et dans un soucis de meilleure stabilité instrumentale). Pendant longtemps, ces deux contraintes apparemment incompatibles n'ont permis que la réalisation d'instruments peu optimisés, souffrant en particulier de compromis peu satisfaisants, soit sur la stabilité du spectrographe, soit sur la précision de l'analyse polarimétrique. C'est l'introduction progressive des fibres optiques en astronomie qui a permis de réconcilier ces deux impératifs : en utilisant une double fibre optique (une fibre pour chacun des deux états de polarisation orthogonaux), il est en effet possible de relier le foyer Cassegrain (où le polarimètre est fixé) au spectrographe Coudé et de réaliser la combinaison souhaitée.

Cette solution est moins évidente à réaliser sur le plan technique qu'il n'y parait au premier abord ; elle nécessite en particulier une conjugaison optique très précise, stable et efficace des deux fibres (dont le diamètre est souvent inférieur à 0.1 mm) avec le trou d'entrée de l'instrument dupliqué par le cristal biréfringent (utilisé pour réaliser l'analyse polarimétrique de la lumière stellaire). Elle requiert ensuite souvent la mise en œuvre d'un dissecteur d'image, dispositif optique permettant d'injecter la quasi totalité de la lumière en sortie de fibre à travers la fente du spectrographe, dont la largeur est le plus souvent inférieure au diamètre de la fibre (à ouverture de faisceau égale). Enfin, la nécessité de pouvoir mesurer des signatures spectroscopiques d'amplitude aussi faible que quelques 0.01% du continu impose de pouvoir s'affranchir au maximum des erreurs systématiques de mesure (induites par exemple par des problèmes de stabilité instrumentale, ou même simplement par la rotation terrestre ou la variabilité de l'objet observé). Cette précision peut être obtenue avec une procédure d'observation spéciale, qui demande en particulier de pouvoir interchanger les deux états de polarisation à travers toute la chaîne d'acquisition, soit à l'aide d'une lame à retard orientable, soit simplement en tournant l'azimut du polarimètre (dans le cas des polarisations linéaires). Pour la même raison, il est indispensable de s'assurer qu'aucun composant optique (et en particulier les lames à retard) n'introduit des franges dans les spectres enregistrés.

Comme on le verra à la Sect. 2.2.3, la détection des signatures Zeeman des raies spectrales peut se faire avec d'autant plus de précision que le nombre de raies observées est important, et donc que le domaine spectral enregistré en une seule pose est étendu. Il est donc important d'utiliser un spectrographe échelle couvrant un domaine aussi large que possible (typiquement plusieurs centaines de nm), ce qui impose du même coup aux différentes pièces optiques du polarimètre (et en particulier aux lames à retard) d'être très achromatiques. Tous ces aspects ont fait l'objet d'études approfondies (Semel et al. 1993 ; Donati et al. 1997 ; Donati et al. 1998b) qui démontrent la faisabilité de la méthode instrumentale.

Après avoir participé, dans le cadre de ma thèse de doctorat, à la mise au point d'un premier prototype utilisé principalement au télescope Canada-France-Hawaii (CFH), je me suis ensuite impliqué dans la qualification et l'utilisation intensive (38 nuits d'observations sur 7 ans) d'un instrument de deuxième génération pour le spectrographe échelle UCLES du télescope Anglo-Australien (AAT) de 3.9 m de diamètre. J'ai enfin étudié, fait réaliser, testé et utilisé (61 nuits d'observation sur deux ans) un polarimètre de principe similaire pour le spectrographe échelle MuSiCoS installé au télescope de 2 m Bernard Lyot (TBL) de l'observatoire du pic du Midi (Donati et al. 1998b). Je suis aujourd'hui responsable scientifique d'un projet de spectropolarimètre pour le télescope CFH.

2.2.2 Extraction optimale des spectres polarisés

L'extraction de spectres stellaires obtenus à l'aide d'un spectrographe échelle est une opération notoirement difficile et fastidieuse. Tout d'abord, la soustraction du fond diffus engendré par le réseau est en général assez délicate, surtout dans le cas où les ordres successifs de l'échellogramme sont très rapprochés. De plus, la forte courbure des ordres propre à ce genre d'instrument rend l'extraction optimale des spectres (Horne 1986) passablement plus compliquée (Marsh 1989). La calibration en longueur d'onde des données est elle aussi assez pénible, car trop souvent manuelle et peu optimisée. Enfin, l'inclinaison éventuelle par rapport aux pixels du détecteur de la projection de la fente du spectrographe sur le plan focal, de même que les irrégularités de sa forme qui résultent de l'utilisation de dissecteurs d'image, sont généralement négligées, ce qui a pour conséquence de dégrader la résolution spectrale et de perturber les procédures d'extraction optimale.

Toutes ces opérations se compliquent encore davantage quand il s'agit de spectres polarisés : en effet, dans ce cas, chaque ordre de l'échellogramme est dédoublé (puisque les deux états de polarisation orthogonaux doivent être enregistrés simultanément), ce qui conduit à une compacité encore accrue de l'information sur le détecteur. De plus, les problèmes liés à la géométrie de la fente projetée sont potentiellement beaucoup plus graves, puisqu'ils peuvent (s'ils ne sont pas correctement pris en compte) engendrer des signatures factices dans les profils polarisés des raies spectrales.

J'ai développé dans le cadre de ce travail un nouvel outil d'extraction optimale et quasi-automatique des spectres polarisés acquis avec le genre d'instruments décrit en Sect. 2.2.1, et qui résout de manière rigoureuse tous les problèmes mentionnés ci-dessus (Donati et al. 1997). Ce logiciel, baptisé ESpRIT, équipe maintenant les stations de travail de plusieurs instituts et observatoires autour du monde (e.g. TBL, AAT, University of St Andrews, University of Southern Queensland), indication claire du fait qu'il comble une lacune dans l'éventail des outils informatiques de l'astronome spectroscopiste.

2.2.3 Extraction statistique des signatures Zeeman

Comme souligné plus haut, la petite taille des signatures magnétiques recherchées rend très souvent difficile et imprécise, voire impossible, toute détection directe de signaux polarimétriques dans les raies spectrales individuelles (mis à part le cas des signatures en polarisation circulaire de la majorité des étoiles chimiquement particulières magnétiques, Mathys 1991, et de quelques étoiles froides très actives parmi les plus brillantes, Donati et al. 1992a). L'idée la plus naturelle est donc d'essayer d'utiliser l'information dans de nombreuses raies spectrales simultanément (e.g. Semel & Li 1995), la plupart d'entre elles engendrant en effet des signatures polarimétriques de forme plus ou moins identique. Moyennant quelques hypothèses assez grossières, il est en effet possible d'exprimer le spectre polarisé comme la convolution d'une signature Zeeman moyenne avec une somme pondérée de fonctions de Dirac représentant la distribution des raies spectrales dans le domaine considéré (Donati et al. 1997). Cette convolution est alors traitée comme un équation matricielle, dont l'inversion au sens des moindres carrés fournit la signature Zeeman moyenne. Baptisée "Déconvolution Moindres-Carrés" ("Least-Squares Deconvolution" ou LSD en anglais), cette nouvelle méthode partage beaucoup de similarités avec les techniques de corrélation classiques (e.g. Mayor 1980).

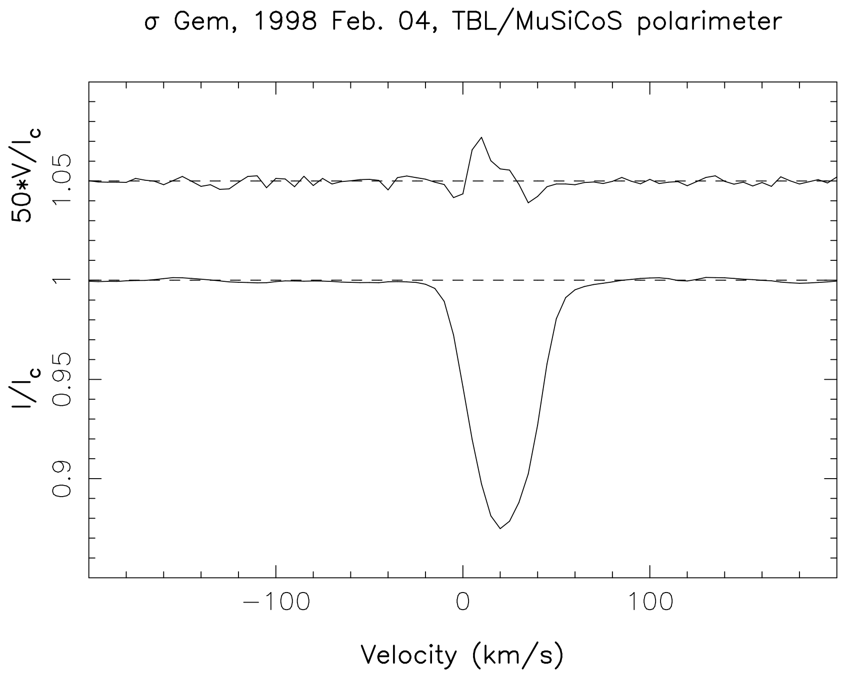

Fig. 2.1: Profils moyens en intensité (bas) et en polarisation circulaire (haut) obtenus par "Déconvolution Moindres-Carrés" sur un spectre du système RS CVn σ Gem obtenu en Février 1998 au TBL avec le spectropolarimètre MuSiCoS et le logiciel ESpRIT. Il s'agit de la première détection directe de champ magnétique sur cet objet. A noter que le spectre en polarisation circulaire a été dilaté d'un facteur 50 et translaté de 1.05 pour les besoins du graphique.

L'avantage le plus évident de cet outil est le gain spectaculaire en efficacité qu'il permet d'obtenir. A partir d'un échellogramme couvrant la totalité du domaine spectral compris entre 460 et 700 nm et dans le cas particulier d'une étoile K1, plus de 2 000 raies peuvent être utilisées simultanément, permettant de réduire le bruit d'un facteur 30 environ par rapport à l'observation d'une raie unique de sensibilité magnétique moyenne (Donati et al. 1997). Ce gain multiplex correspond à un gain en sensibilité de 7.5 magnitudes, soit un facteur 1 000 en flux, ce qui a en particulier permis de détecter les champs magnétiques dans une vingtaine d'étoiles actives (Donati et al. 1997, voir également l'exemple présenté en Fig. 2.1), d'étudier les hétérogénéités à la surface de certaines d'entre elles avec une résolution spatiale inégalée (e.g. Donati & Cameron 1997), ou de reconstruire la cartographie en brillance de deux rotateurs ultra-rapides de l'amas α Per (de magnitude 11 à 12) en utilisant simplement un télescope de 4 m (Barnes et al. 1998) alors qu'une telle performance demandait jusqu'alors un instrument beaucoup plus puissant (Stout-Bathala & Vogt 1996). Le programme informatique qui effectue ces opérations est également disponible sur les sites où ESpRIT est implanté.

2.3 Etude des topologies magnétiques

Bien que les surfaces stellaires, dans la très grande majorité des cas, ne peuvent pas encore être résolues par des moyens d'imagerie directe (e.g. interférométrie, optique adaptative, observations spatiales), il est toutefois possible, dans certains cas particuliers, de reconstruire une information assez précise sur la structure du champ magnétique photosphérique de l'étoile observée. Dans le cadre de ce travail, j'ai étudié deux de ces cas, celui des rotateurs rapides et celui des naines blanches magnétiques.

2.3.1 Les rotateurs rapides

Pour les étoiles dont la vitesse de rotation est grande devant la vitesse de turbulence du plasma photosphérique, il est possible de reconstruire une cartographie approximative des hétérogénéités potentielles qui affectent la surface stellaire (Khokhlova 1975 ; Vogt & Penrod 1983). En effet, pour ces objets, l'effet Doppler associe différentes vitesses radiales à différentes régions de la photosphère, dont les contributions spectrales intrinsèques vont donc être décalées en conséquence par rapport à la vitesse radiale moyenne de l'objet observé. La première conséquence de la rotation est donc d'élargir les raies spectrales de l'étoile concernée, d'un montant total de l'ordre de $\pm v \sin i$ où v et i notent respectivement la vitesse équatoriale de rotation et i l'angle entre l'axe de rotation et la ligne de visée.

La deuxième conséquence, plus intéressante pour le problème qui nous concerne, est que toute hétérogénéité *locale* de surface (affectant la contribution spectrale intrinsèque correspondante), va engendrer une perturbation *locale* du profil global des raies stellaires de l'objet observé, à une position qui correspond à la vitesse radiale de l'hétérogénéité considérée au moment de la mesure. En suivant ces distorsions de profil des raies spectrales tout au long du cycle rotationnel, il est possible de remonter à la position, à la surface de l'étoile, des hétérogénéités de surface dont elles sont la cause : la longitude d'une tache est en effet donnée par la phase du cycle rotationnel à laquelle la distorsion correspondante atteint le centre du profil, tandis que sa latitude est directement déduite de la vitesse à laquelle cette même distorsion traverse le profil des raies. En pratique, cette méthode, baptisée imagerie Doppler, permet de reconstruire automatiquement (à l'aide d'un code de reconstruction d'image par méthode d'inversion itérative ; e.g. Goncharskij et al. 1982 ; Vogt et al. 1987 ; Rice et al. 1989), la distribution à la surface d'une étoile d'une quantité physique donnée (le plus souvent brillance ou abondance d'une espèce chimique), à partir d'un jeu de spectres en lumière non polarisée, obtenus à haute résolution spectrale et offrant un bon échantillonnage du cycle rotationnel.

Initialement proposée par M. Semel, mise en œuvre sous l'impulsion scientifique commune de M. Semel, F. Praderie et P. Gondoin, puis développée dans le cadre de ma thèse de doctorat (Donati 1990), l'imagerie Zeeman-Doppler (Semel 1989) est une généralisation de l'imagerie Doppler aux observations spectroscopiques en lumière polarisée (voir Fig. 2.2 pour un exemple de modulation rotationnelle de signature Zeeman en polarisation circulaire), dans le but de permettre la caractérisation des topologies magnétiques des surfaces stellaires. La première simulation numérique complète publiée sur cette méthode (Brown et al. 1991) démontre en particulier qu'un jeu de spectres en polarisation circulaire (paramètre de Stokes V) suffit généralement pour obtenir une bonne estimation des topologies magnétiques stellaires impliquant des taches aux contours relativement abrupts (comme par exemple celles des étoiles actives, voir Sect. 3.2.1), mais ne permet pas en revanche de reconstruire des distributions plus globales (comme par exemple les structures magnétiques dipolaires des étoiles chimiquement particulières, voir Sect. 4.1), quelque soit l'échantillonnage du cycle rotationnel ou le rapport signal sur bruit des données. Dans le premier cas, des simulations plus récentes (Donati & Brown 1997) décrivent en détail les potentialités et limitations de l'imagerie Zeeman-Doppler ; elles démontrent que non seulement la position des régions magnétiques peut être reconstruite mais aussi, dans certaines limites, l'orientation des lignes de champ à l'intérieur de ces taches ; la méthode d'inversion

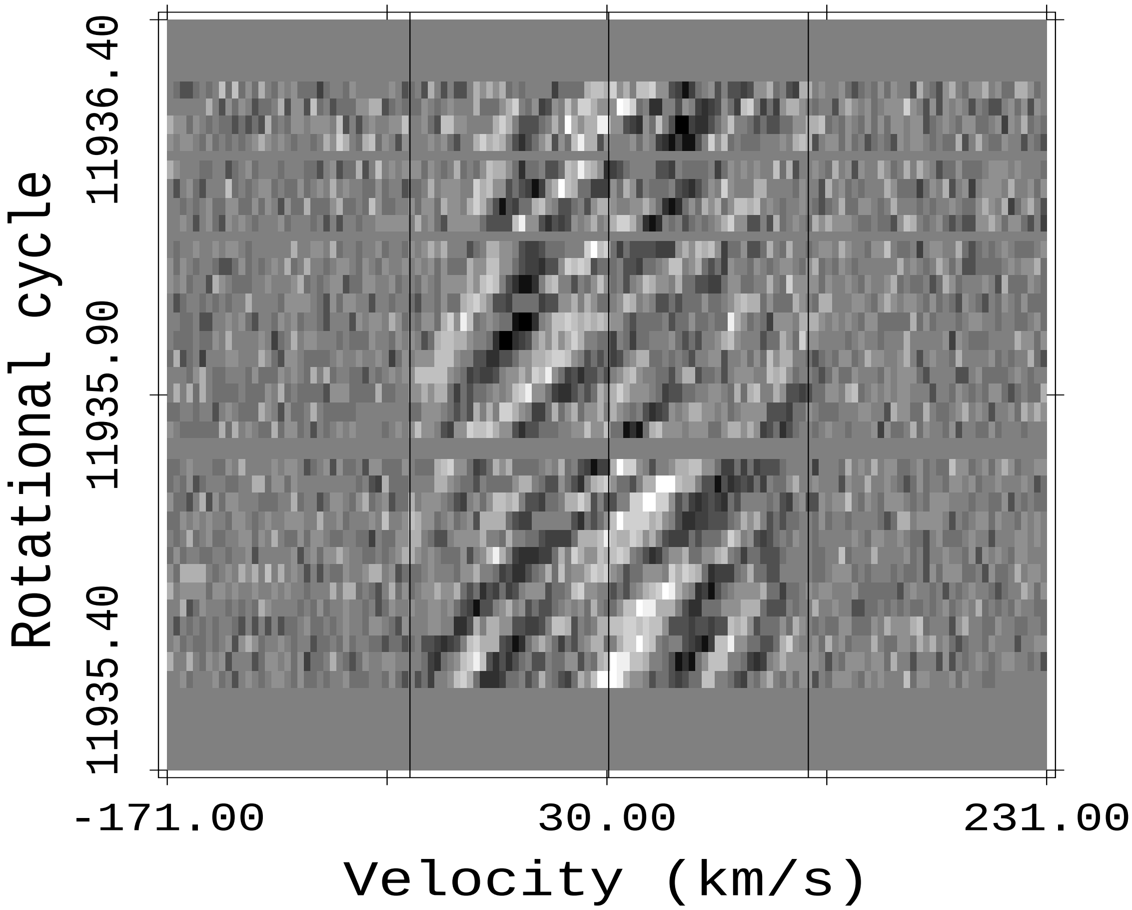

FIG. 2.2: Modulation rotationnelle de la signature Zeeman moyenne en polarisation circulaire (obtenue par "Déconvolution Moindres-Carrés") de l'étoile AB Doradus en Décembre 1996 (Donati et al. 1998a). Les niveaux de gris codent des taux de polarisation circulaire relatifs de ±0.06% maximum. Dans ce diagramme où les trois traits verticaux représentent respectivement la vitesse radiale de l'étoile (au centre) augmentée et diminuée de la vitesse de rotation projetée sur la ligne de visée (de chaque coté), on peut voir les signatures des nombreuses régions magnétiques traverser la raie spectrale moyenne du bleu vers le rouge.

est en effet très performante pour différencier les régions magnétiques de champ azimutal de celles de champ radial ou méridien, même si ces deux dernières orientations peuvent toujours être confondues dans le cas particulier des taches à basse latitude dans les étoiles dont l'axe de rotation est peu incliné sur la ligne de visée.

La mesure des signatures Zeeman en polarisation linéaire (paramètres de Stokes Q et U) tout au long du cycle rotationnel permet bien évidemment de mieux contraindre l'imagerie des topologies magnétiques stellaires en fournissant des informations sur la composante transverse du champ. Toutefois, à cause de leur amplitude très réduite (les signatures Zeeman en polarisation linéaire sont typiquement un ordre de grandeur inférieures à leurs analogues en polarisation circulaire), ces paramètres ne sont accessibles que pour les étoiles chimiquement particulières parmi les plus fortement magnétisées. Si ces nouvelles données semblent toutefois toujours insuffisantes (au vu des premières simulations effectuées) pour reconstruire la distribution magnétique de ces objets sans hypothèse a priori sur sa structure à grande échelle, elles devraient néanmoins permettre de bien mieux contraindre les modèles existants (le plus souvent des expansions multipolaires de bas degré, voir Sect. 4.1) et de décrire de manière plus précise les déviations des structures stellaires par rapport à ces modèles simplistes.

2.3.2 Les naines blanches magnétiques

Dans le cas des naines blanches magnétiques (dont les champs ont une intensité comprise entre 0.3 à 1000 MG environ), le problème est radicalement différent du cas examiné précédemment puisque l'élargissement des raies spectrales est assuré dans sa quasi totalité par le clivage magnétique (de l'ordre de 2 nm/MG), l'élargissement rotationnel (toujours inférieur à 0.1 nm) étant quant à lui pratiquement négligeable. La technique d'inversion proposée en Sect. 2.3.1 est donc totalement inadaptée.

En collaboration avec des astronomes canadiens et australien, j'ai proposé une méthode qui permet de traduire chaque observation spectroscopique en lumière non polarisée et en polarisation circulaire sous la forme d'un graphique illustrant la fraction de surface stellaire couverte par le champ magnétique en fonction de son intensité et de son orientation (Donati et al. 1994). En suivant l'évolution de telles images au cours du cycle rotationnel, il est en principe possible de remonter, non seulement à la structure à grande échelle du champ magnétique, mais aussi éventuellement à des détails plus subtils, comme par exemple la présence additionnelle de taches magnétiques ou d'hétérogénéités d'abondance.

Chapitre 3

Magnétisme dynamo des étoiles froides

3.1 La dynamo solaire

Ce sont les observations du cycle d'activité solaire qui sont à l'origine des premières théories dynamos. Ces modèles invoquent l'action combinée de la convection et de la rotation pour produire un champ magnétique à grande échelle, oscillant entre une structure essentiellement poloïdale et toroïdale (Parker 1955). S'il est probable que ce scénario original soit largement valable dans son principe, un chemin énorme reste à parcourir pour obtenir une explication détaillée et cohérente du processus dynamo dans sa globalité.

Un premier problème vient de la difficulté qu'il y a à modéliser ce mécanisme, que ce soit sur le plan analytique ou numérique. En effet, après avoir longtemps fait illusion (grâce en particulier à leur aptitude à reproduire la migration équatoriale des régions actives au cours du cycle), les premières tentatives de modélisation (baptisées approches cinématiques ; e.g. Steenbeck & Krause 1969) sont maintenant jugées notoirement insuffisantes. En effet, non seulement le champ magnétique n'y joue qu'un rôle essentiellement passif (puisque la rétroaction du champ sur les mouvements du plasma est négligée), mais les différents ingrédients physiques (en particulier la rotation différentielle, la diffusion turbulente et l'amplification dynamo) supposés prendre part au processus sont introduits d'une manière relativement ad'hoc, par le biais de nombreux paramètres libres choisis indépendamment les uns des autres et sans réel soucis de cohérence. Leur succès relatif n'est donc que peu significatif. En revanche, les approches modernes (dites dynamiques) consistent à résoudre numériquement les équations MHD dans un milieu convectif stratifié en présence de rotation. Dans ce contexte, tous les mécanismes physiques responsables de la production du champ magnétique sont calculés de manière cohérente en tant que produits directs de l'interaction convection/rotation et ne font intervenir que très peu de paramètres libres. Ces modèles, bien que physiquement plus corrects que les précédents, conduisent pourtant à des résultats très différents des observations (en particulier en ce qui concerne la longueur du cycle). Ce désaccord est principalement imputable au manque de résolution spatiale des simulations actuelles ; par manque de puissance de calcul, les petites échelles sont toujours sacrifiées, ce qui par exemple ne permet pas d'incorporer correctement les effets de la turbulence.

Un autre problème majeur des modélisations est d'essayer de comprendre comment l'étoile parvient à conserver le champ sur des périodes suffisamment longues. En effet, la force d'Archimède est en principe censée expulser très rapidement les tubes de champ magnétique hors de la zone convective, trop rapidement en particulier pour produire une amplification suffisante du champ. Les théoriciens se sont donc progressivement dirigés vers des modèles où le champ magnétique (sous une orientation principalement azimutale) est stocké dans une région d'interface entre l'intérieur radiatif et l'enveloppe convective (Spiegel & Weiss 1980). Les récentes mesures héliosismologiques semblent confirmer cette version des choses en montrant que les gradients radiaux de vitesse de rotation angulaire (à l'origine de la transformation du champ initialement poloïdal en une structure toroïdale) sont confinés dans cette seule région d'interface (Gizon et al. 1997). Mais les simulations récentes décrivant l'émergence hors de la zone convective de tubes de flux magnétiques indiquent que le champ toroïdal dans cette région de stockage est très intense (de l'ordre de 100 kG environ), si intense qu'il doit inhiber tout mouvement convectif local et donc toute régénération in situ du champ poloïdal (Parker 1993). Le problème devient alors de comprendre où et comment la composante poloïdale du champ est produite (e.g. en couche fine ou à l'intérieur de toute la zone convective), et comment transporter les composantes toroïdale et poloïdale vers leurs régions de transmutation respectives. De très nombreuses hypothèses ont été proposées dans la littérature (e.g. Nordlund et al. 1992 ; Durney et al. 1993 ; Choudhuri et al. 1995 ; MacGregor & Charbonneau 1997), mais aucune ne permet encore aujourd'hui de reproduire les observations magnétiques solaires de manière satisfaisante.

Le rôle des structures magnétiques à petite échelle dans le cycle d'activité est également sujet à de nombreuses spéculations. Il est maintenant admis que ce sont les structures à petite échelle (et en particulier les régions magnétiques à l'intérieur des supergranules, probablement dues à une composante de la dynamo distribuée dans toute la zone convective) plutôt que les régions actives (représentant la composante confinée de la dynamo) qui expulsent la grande majorité du flux magnétique solaire hors de la zone convective, le très grand nombre de ces petites structures l'emportant en effet de très loin devant leur faible surface. En revanche, il n'est pas du tout garanti que ces structures à petite échelle participent efficacement au cycle d'activité : en effet, l'orientation apparemment aléatoire des groupes bipolaires associés ne permet pas de savoir si l'émergence de ces régions contribue notablement à la production d'un champ poloïdal net. Si l'on sait que les régions actives ne sont pas en nombre suffisant pour expliquer le champ poloïdal observé, il n'est pas encore possible d'affirmer si le champ global manquant provient d'une contribution résiduelle des régions à petite échelle.

D'une manière générale, ce sont les rapports entre les processus à petite et grande échelle spatiale (e.g. dynamo confinée ou distribuée pour les mécanismes de production du champ poloïdal, convection ou turbulence pour les mécanismes d'amplification) qui sont aujourd'hui au cœur de tous les débats. Il faudra sans doute attendre l'avènement des instruments solaires de nouvelle génération (et en particulier THÉMIS qui devrait permettre de résoudre des structures spatiales à la surface du Soleil de l'ordre d'une centaine de km) pour progresser dans ce sujet, à moins que l'étude des étoiles actives nous permette de progresser dans ce domaine d'ici là.

3.2 Les dynamos stellaires

Depuis presque 20 ans que les premières détections crédibles de champ magnétique dans les étoiles froides autres que le Soleil ont pu être obtenues (Robinson et al. 1980), on ne sait toujours que très peu de choses sur les mécanismes dynamo qui sont supposés les engendrer, et en particulier sur les différences éventuelles avec la dynamo solaire que l'on souhaiterait interpréter dans un contexte évolutif. Le résultat unique obtenu à ce sujet avec les techniques traditionnelles (voir Sect. 2.1.1) est qu'en première approximation, l'intensité du champ magnétique atteint la valeur d'équipartition (pour laquelle la pression magnétique associée est égale à la pression gazeuse du plasma photosphérique non magnétisé), tandis que la fraction de surface couverte par le champ augmente avec le taux de rotation stellaire (Saar 1996). Toutefois, même ce résultat (qui n'était déjà pas vérifié dans le cas particulier du Soleil, où les champs magnétiques internes aux supergranules sont environ quatre fois moins intenses que ceux des régions actives ; Lin 1995), semble maintenant devoir être remis en cause par des mesures stellaires très récentes obtenues avec la même méthode à partir d'observations dans l'infrarouge, et qui indiquent que l'intensité du champ magnétique peut dépasser très largement la valeur d'équipartition (Johns-Krull & Valenti 1996).

Comme on va le voir, l'imagerie Zeeman-Doppler permet d'aller bien plus loin. Elle fournit tout d'abord une certaine résolution spatiale à la surface des étoiles, même si cette information est loin d'être aussi riche que dans le cas du Soleil. Elle produit ensuite une estimation de l'orientation des lignes de champ dans les régions magnétiques (comme rappelé en Sect. 2.3.1, voir aussi Donati & Brown 1997), ce qui représente une avantage important si l'on souhaite pouvoir interpréter les résultats dans le cadre des théories dynamo.

3.2.1 Topologies magnétiques

Des quelques vingt étoiles actives sur lesquelles le champ magnétique a été détecté (Donati et al. 1992a, 1997), trois ont été observées tout au long du cycle rotationnel ce qui a nous permis de cartographier leur topologie magnétique, et ce à différentes époques (Donati et al. 1992b ; Donati & Cameron 1997 ; Donati 1998 ; Donati et al. 1998a). Il s'agit des étoiles simples AB Dor et LQ Hya, et de la sous géante du système binaire HR 1099, toutes trois de masse proche de celle du Soleil. Si la première n'a pas encore achevé sa phase de contraction vers la séquence principale, la deuxième vient tout juste de la terminer, tandis que la troisième s'en éloigne déjà sensiblement et se dirige vers la branche des géantes rouges. Toutes ont un taux de rotation élevé (respectivement égal à 50, 20 et 10 fois solaire environ), les deux premières à cause de leur relative jeunesse, la troisième grâce aux effets de marée internes au système binaire auquel elle appartient et qui synchronise sa rotation sur son mouvement orbital.

Le premier résultat important est que toutes les topologies reconstruites montrent la présence dans la photosphère de régions magnétiques où le champ a une direction essentiellement azimutale (voir par exemple Fig. 3.1). La première conséquence est donc que les mécanismes dynamo sous-jacents comportent une composante distribuée dans toute la zone convective. Il est en effet difficilement imaginable qu'un champ confiné à la base de la zone convective (comme celui du Soleil) puisse apparaître sous la forme de régions de champ azimutal au niveau photosphérique. De plus, les simulations numériques récentes (Schüssler 1996 ; De Luca et al. 1997) indiquent que, pour les rotateurs rapides, l'émergence des tubes de flux en provenance de la base de la zone convective doit se faire exclusivement à haute latitude. L'observation régulière de régions magnétiques à basse latitude renforce la conclusion que le champ correspondant est produit à l'intérieur de la zone convective, i.e. par une dynamo distribuée. C'est la première mise en évidence directe d'une dynamo stellaire distribuée.

Le second résultat intéressant est que, sur chaque étoile, les régions de champ azimutal

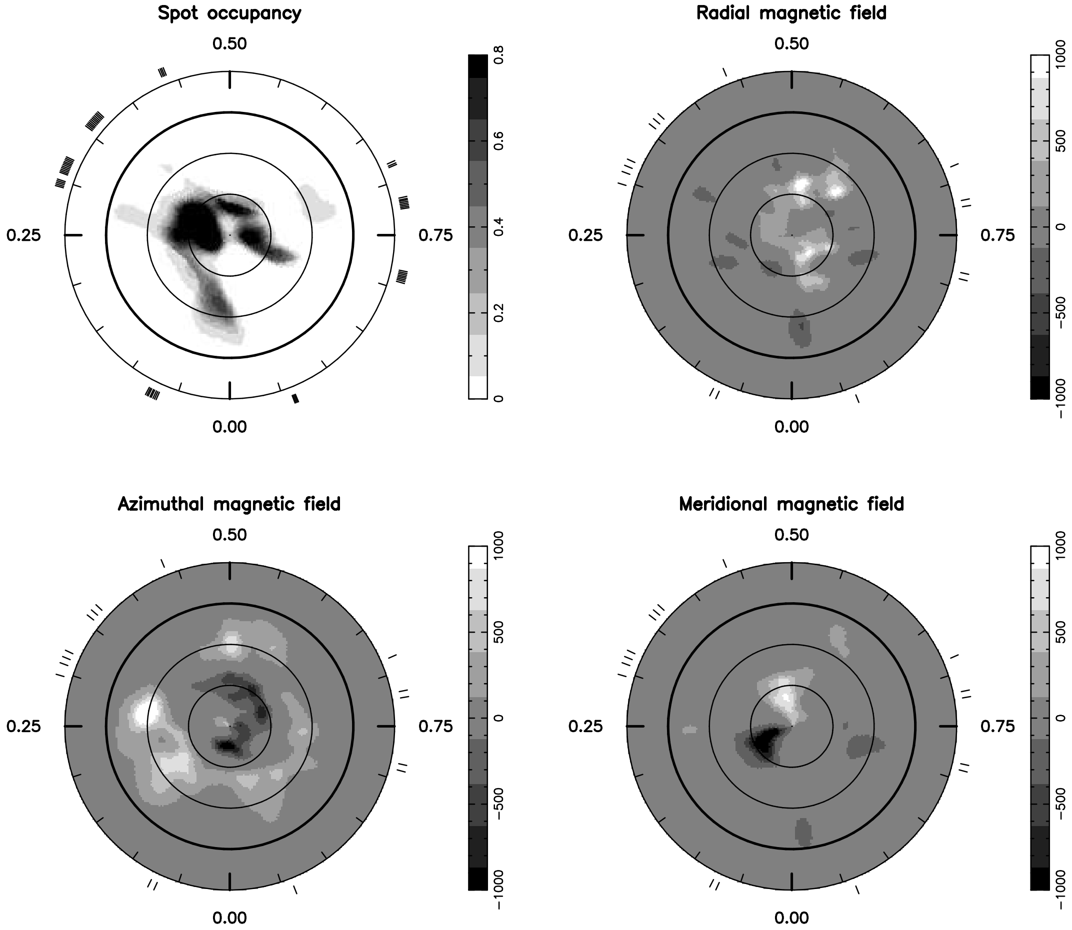

FIG. 3.1: Cartographies en brillance et champ magnétique (composantes radiale, azimutale et méridienne) de la surface de la sous-géante K1 du système RS CVn HR 1099 en Décembre 1995, obtenues par imagerie Zeeman-Doppler (Donati 1998). Ces images sont des représentations polaires, dans lesquelles les cercles concentriques en traits gras et fins représentent l'équateur et les parallèles de latitude 30° et 60° respectivement (les phases d'observation étant indiquées par une série de traits radiaux disposés autour de chaque image). On notera en particulier la structure en anneaux de la distribution de champ azimutal.

ont une polarité qui dépend essentiellement de la latitude, mais très peu de la longitude. Les cartographies d'une même étoile à différentes époques relativement rapprochées dans le temps indiquent une variabilité de la distribution du champ magnétique, mais pas d'évolution à courte échelle de la relation entre polarité du champ azimutal et latitude. La conclusion la plus naturelle est donc que la topologie détectée représente la partie émergée de la composante toroïdale du champ à grande échelle. Pour deux de ces étoiles (LQ Hya et HR 1099), on obtient le même genre de résultat en ce qui concerne les cartographies de la composante radiale du champ, que l'on interprète par un raisonnement analogue comme la signature de la composante poloïdale du champ à grande échelle (Donati 1998). La troisième étoile (AB Dor) montre une topologie de champ radial beaucoup plus complexe, avec de nombreuses taches de polarités opposées, sans corrélation apparente avec la latitude (Donati & Cameron 1997 ; Donati et al. 1998a). La raison pour laquelle cette composante fortement multipolaire de la distribution magnétique n'est pas détectée dans les deux autres étoiles n'est pas encore très claire. Il est en particulier possible que cette différence soit réelle et corresponde à un autre type de dynamo ou à une autre phase du cycle d'activité, ou bien reflète tout simplement des conditions observationnelles plus favorables (e.g. meilleure couverture du cycle rotationnel, pouvoir résolvant supérieur dû à une vitesse de rotation accrue).

La composante poloïdale du champ à grande échelle est au moins deux ordres de grandeur plus intense que celle du Soleil, conséquence directe du fort taux de rotation de ces objets. De plus, la composante azimutale du champ à grande échelle est d'une intensité comparable, ou légèrement plus grande que celle de la composante poloïdale, contrairement au cas solaire ou le rapport entre composantes poloïdale et toroïdale est de l'ordre de $1 \div 10\,000$. Enfin, la structure des composantes poloïdales et toroïdales semble également plus complexe que dans le cas solaire, avec plusieurs changements de polarité entre le pôle et l'équateur (voir Fig. 3.1 dans le cas particulier de HR 1099). Cette caractéristique est probablement encore une conséquence du fort taux de rotation de ces objets, comme prévu par Schatzman (1991).

3.2.2 Cycles magnétiques

En suivant l'évolution des topologies magnétiques au cours du temps, je compte mettre en évidence les cycles d'activité magnétique de ces objets, et détecter certains signes caractéristiques (e.g. changement de polarité global de la structure azimutale, déphasage entre composante toroïdale et poloïdale) qui permettront de préciser le type de dynamo qui opère dans ces étoiles. Les séquences temporelles obtenues aujourd'hui pour chaque objet couvrent une période de 2, 6 et 7 ans pour AB Dor, LQ Hya et HR 1099 respectivement. Si aucun changement radical des distributions magnétiques n'a encore été observé, les signes de cette évolution à long terme sont déjà clairement visibles. On peut noter en particulier l'évolution de la topologie magnétique de HR 1099 d'une structure purement toroïdale à une structure mixte, présentant un nombre à peu prés égal de régions de champ azimutal et radial. On peut également remarquer l'apparition d'une nouvelle polarité de champ azimutal à haute latitude sur l'étoile LQ Hya, préfigurant peut-être un prochain changement global de polarité du champ. Il est en tous les cas clair que nous n'avons pas encore observé plus de la moitié d'un cycle magnétique de l'une quelconque des trois étoiles, ce qui implique en particulier des cycles de période supérieure à 12 et 14 ans pour LQ Hya et HR 1099 respectivement (Donati 1998).

Il est également intéressant de noter que les régions magnétiques détectées sur ces étoiles ne partagent que très peu de caractéristiques avec les régions actives solaires. En effet, ces régions ne semblent pas être associées spatialement avec des hétérogénéités en brillance, ne sont pas confinées à un intervalle restreint en latitude et sont associées à une production du champ à l'intérieur de la zone convective, ce qui les rapproche plutôt des régions magnétiques que l'on trouve à l'intérieur des supergranules solaires (Donati 1998). Si ce parallèle se confirme, il impliquerait en particulier que les régions magnétiques solaires à petite échelle spatiale (telles les régions magnétiques internes aux supergranules) participent effectivement à la production du champ à grande échelle (comme le font visiblement leurs analogues stellaires) et donc au cycle d'activité. Il en résulterait alors une vision nouvelle de la dynamo solaire dans son ensemble.

3.3 Autres phénomènes actifs

Si l'observation des champs magnétiques stellaires constitue bien sûr le moyen le plus direct d'étudier les mécanismes dynamo dans les étoiles froides, il existe aussi bien d'autres moyens s'appuyant sur l'étude des phénomènes actifs en général (e.g. distributions des hétérogénéités en brillance dans la photosphère), qui permettent en particulier d'accéder à des informations sur les processus dynamo très complémentaires de celles que fournissent les observations de champs magnétiques.

3.3.1 Rotation différentielle de surface

La rotation différentielle, qui résulte de l'interaction entre la convection et la rotation dans une étoile, est un ingrédient majeur pour les processus dynamo. Notre connaissance actuelle de ce mécanisme est assez sommaire ; on le décrit essentiellement comme résultat d'une compétition entre viscosité (qui tend à homogénéiser la rotation angulaire sur des couches sphériques) et circulation méridienne (qui tend à l'homogénéiser sur des couches cylindriques). Les étoiles à taux de rotation élevé (et pour lesquelles la circulation méridienne est très intense) sont supposées posséder un champ de vitesse de rotation angulaire très différent de celui du Soleil (que l'on connaît depuis peu grâce aux expériences d'héliosismologie), mais aucune mesure astérosismologique n'existe à ce jour pour vérifier cette prédiction. De plus, l'influence rétroactive éventuelle du champ magnétique sur la rotation différentielle n'est pas du tout connue, ni même discutée.

Les nombreuses études sur la rotation différentielle du Soleil, bien que très documentées, ne peuvent répondre à toutes les questions. En particulier, le Soleil ne représentant qu'un point de l'espace des paramètres stellaires fondamentaux, il est difficile de comprendre l'influence de ces paramètres (et surtout de la rotation) sur la rotation différentielle, ce qui rend du coup beaucoup plus arbitraire toute tentative d'analyse des processus physiques qui la régissent. De plus, l'activité du Soleil étant assez faible, il est très difficile de savoir si les champs magnétiques ont une influence sur cette rotation différentielle (e.g. Ribes & Nesme-Ribes 1994). Les études de rotation différentielle dans les étoiles froides autres que le Soleil sont donc importantes pour contraindre les modèles hydrodynamiques de zone convective (e.g. Kitchatinov & Rüdiger 1995) et étudier l'effet rétroactif du magnétisme sur la rotation angulaire interne des étoiles.

Deux types de méthodes de mesure de la rotation différentielle stellaire existent actuellement dans la littérature. Les mesures photométriques indiquent que la période moyenne de modulation rotationnelle de l'intensité émise par l'étoile dans une large bande passante fluctue légèrement, avec une dispersion relative proportionnelle (en première approximation) à la période moyenne de la modulation (e.g. Hall 1991). On interprète le plus souvent cette modulation par la variabilité de la distribution des hétérogénéités de brillance à la surface de l'étoile (et plus particulièrement du barycentre en latitude de cette distribution) en présence de rotation différentielle (qui affecte une période de rotation différente à chaque latitude). Ces fluctuations peuvent aussi être causées par une modification de la rotation de surface au cours du cycle d'activité. Toutefois, cette interprétation reste assez spéculative car difficile à tester. Cette méthode ne permet pas non plus d'étudier facilement le signe de la rotation différentielle de surface ou son évolution au cours du cycle d'activité.

Avec des observations spectroscopiques de la modulation rotationnelle, il est possible de reconstruire, à l'aide de techniques d'imagerie des surfaces stellaires, la distribution des hétérogénéités de brillance photosphériques, et son évolution à court terme. En comparant deux images obtenues typiquement à une semaine d'intervalle (par corrélation croisée des anneaux à latitude constante de ces images), il est possible de mesurer cette évolution et de la traduire en terme de rotation différentielle, d'une manière très similaire à celle que Galilée a employée il y a maintenant 350 ans environ pour le Soleil. Une telle étude demande toutefois un jeu de données qui échantillonne parfaitement le cycle rotationnel, à chacune des deux époques d'observation. Nous avons pu réaliser de telles observations dans le cas de l'étoile pré-séquence principale AB Dor (dont la période de rotation de 0.51479 j est suffisamment courte pour permettre d'observer la quasi totalité d'un cycle rotationnel en une seule nuit). Elles ont permis d'obtenir la première mesure directe de rotation différentielle dans une étoile active (Donati & Cameron 1997 ; Donati et al. 1998a), qui montre que AB Dor, bien que tournant 50 fois plus vite que le Soleil, subit un cisaillement en latitude très similaire à celui du Soleil, avec un équateur qui accomplit une révolution de plus que le pôle tous les 4 mois environ (voir Fig. 3.2). D'autres essais similaires ont été tentés, sans succès pour le moment, sur des étoiles d'amas (Barnes et al. 1998) et seront bientôt renouvelés sur des étoiles du champ très similaires à AB Dor et sur d'autres étoiles pré-séquence principale. Toutes les autres études que l'on peut trouver dans la littérature sur ce sujet (e.g. Vogt & Hatzes 1991 ; Weber & Strassmeier 1998 ; Vogt et al. 1998 ; Hatzes 1998) sont quant à elles fortement sujettes à caution, puisqu'elles s'appuient sur des images obtenues à plusieurs mois (voire plusieurs années) d'intervalle, tandis que la durée de vie typique d'une distribution de brillance est très probablement inférieure à un mois (Barnes et al. 1998 ; Donati et al. 1998a).

Plusieurs signes indiquent que la rotation différentielle d'une étoile est modulée avec le cycle d'activité. Dans les systèmes binaires serrés en particulier, on observe que la présence d'une étoile possédant une zone convective épaisse est très souvent reliée à des petites fluctuations (d'une amplitude relative de quelques dizaines de millionièmes) de la période orbitale du système (Hall 1990), sur des échelles de temps de quelques décennies. On ne connaît aujourd'hui qu'un seul scénario qui permette d'expliquer ces observations ; dans ce modèle, les variations de période orbitale sont attribuées à une modulation du moment quadrupolaire (et donc du champ gravitationnel) de l'étoile la plus active du système (e.g. Applegate 1992). C'est le cycle d'activité de l'étoile qui est probablement à l'origine de cette modulation du moment quadrupolaire, à travers l'échange périodique entre énergie magnétique et énergie cinétique au sein de la zone convective (Lanza et al. 1998) qui engendre une modification de la distribution interne des vitesses de rotation angulaire et donc de la rotation différentielle. J'ai détecté cet effet de manière spectroscopique dans le cas particulier du système HR 1099, et vérifié que le modèle de Lanza et al. (1998) est à peu près compatible avec les observations photométriques de rotation différentielle et les observations de champs magnétiques de surface (Donati 1998). Nos observations permettent de plus d'établir que ces variations internes de rotation angulaire (et donc les processus dynamos qui la produisent) ne peuvent être confinées dans une couche à la base de la zone convective, car la contribution maximale de cette région d'interface à la variation de moment quadrupolaire est trop faible d'environ trois ordres de grandeur. Ceci confirme en particulier la conclusion atteinte en Sect. 3.2.1 concernant la nature distribuée des mécanismes dynamo dans les enveloppes convectives de ces étoiles très actives.

Une mesure directe de la rotation différentielle à la surface de cette étoile, ainsi que de son éventuelle variation au cours du cycle d'activité, devrait permettre tout d'abord de valider ce modèle, mais aussi et surtout de faire progresser notre compréhension des processus MHD (et plus particulièrement des mécanismes dynamo et de la rotation différentielle)

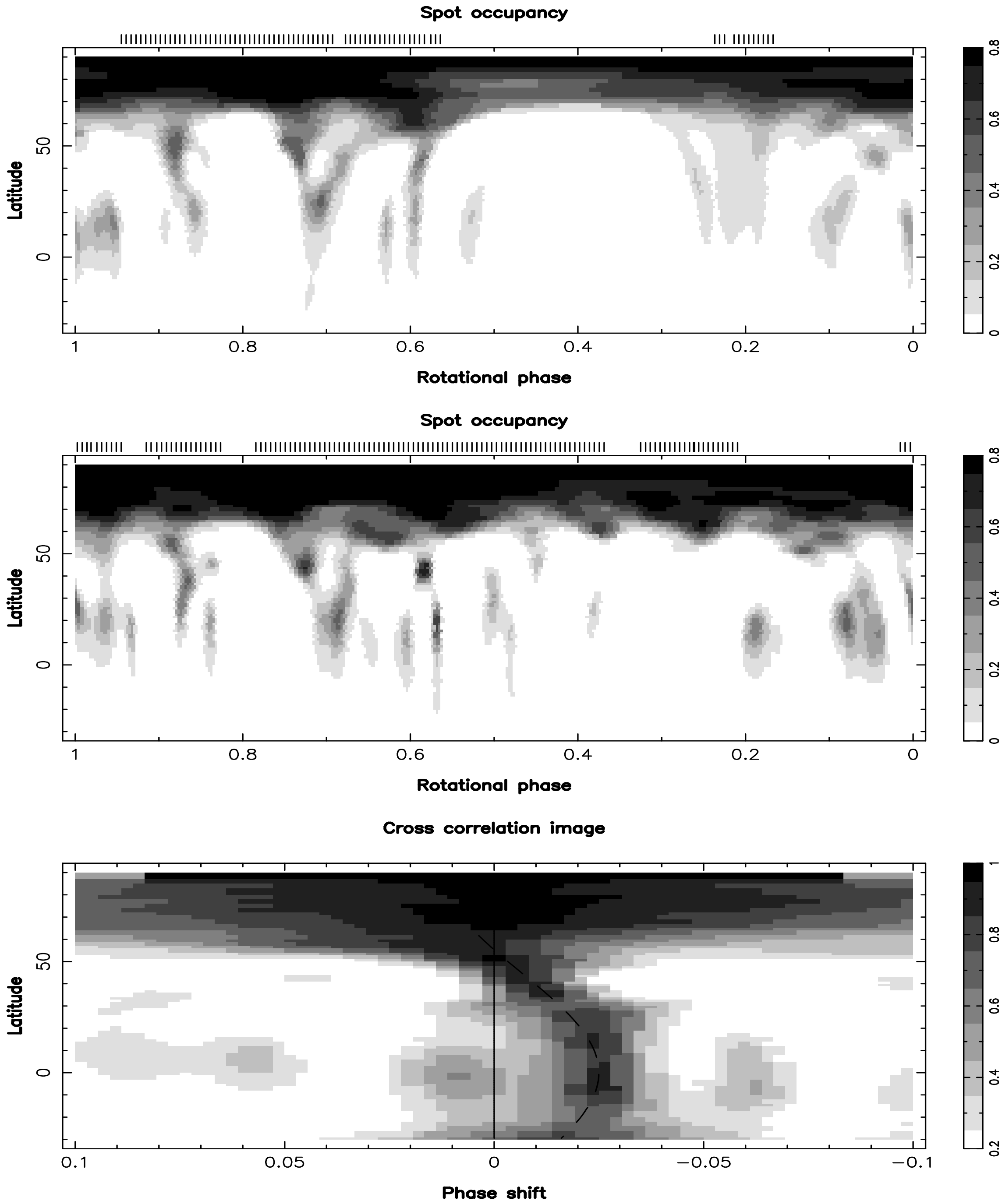

Fig. 3.2: En comparant les cartographies en brillance (présentées ici en projection rectangulaire) de la surface de AB Doradus obtenues respectivement le 7 (image supérieure) et 11 Décembre 1995 (image centrale), il est possible d'obtenir (par corrélation croisée des anneaux de même latitude entre les deux images) une estimation précise de la rotation différentielle de surface (image inférieure), qui pour cette étoile, est très similaire à celle du Soleil avec un équateur qui accomplit une révolution de plus que le pôle tous les 4 mois environ (Donati & Cameron 1997). Notons que cette corrélation n'a été réalisée que sur la moitié gauche des images, seule partie du cycle rotationnel à avoir été observée de manière continue à chacune des deux époques (les phases d'observation étant représentées par les traits verticaux portés au dessus de chaque image).

dans les zones convectives stellaires.

3.3.2 Evolution du moment cinétique

La perte de masse en présence de champ magnétique engendre une perte de moment cinétique, les particules chargées étant contraintes de suivre les lignes de champ jusqu'au rayon d'Alfvèn (e.g. Mestel 1994). Ce phénomène, baptisé freinage magnétique, agit en particulier sur les étoiles actives de type solaire et conditionne fortement leur évolution dans les phases pré-séquence principale pour les étoiles simples, mais aussi dans les phases plus évoluées pour les membres des systèmes binaires serrés (le moment cinétique orbital entretenant, par le biais des effets de marée, un taux de rotation élevé pour chaque composante froide du système, Zahn 1989). L'étude du freinage magnétique renseigne donc directement sur les conséquences évolutives qu'engendre l'activité magnétique.

Sur ce sujet particulier, le système binaire de type RS CVn λ And (qui inclue en particulier une géante K1) est un bon candidat. En effet, cet objet possède une orbite circulaire et une période rotationnelle (54 j environ) 2.6 fois plus grande que sa période orbitale (égale à 20.6 j), en forte contradiction avec la théorie des marées qui prévoit qu'un système binaire serré doit synchroniser sa rotation sur son mouvement orbital *avant* de circulariser son orbite. Une des explications les plus naturelles est d'invoquer un freinage magnétique suffisamment intense pour empêcher la synchronisation de s'établir. Par une étude spectroscopique approfondie, j'ai pu d'abord calculer les paramètres fondamentaux de l'étoile primaire et démontrer que le compagnon non visible est une naine brune massive (ou une étoile de très faible masse). J'ai pu ensuite, à partir de ces paramètres, évaluer le temps caractéristique de synchronisation (de l'ordre de 1 million d'années) et vérifier qu'un champ dipolaire de 30 G environ (i.e. 10 fois plus intense que celui du Soleil, mais très comparable aux champs d'autres objets similaires, e.g. Donati 1998) est suffisant pour empêcher le système de se synchroniser (Donati et al. 1995).

3.3.3 Champs de vitesse dans les taches

Cette même étude a également permis d'établir que les régions actives de ce type d'étoiles sont associées à des champs de vitesse à grande échelle environ deux fois plus intense que ceux de la photosphère calme. Ce résultat confirme en particulier les conclusions identiques obtenues sur une étoile similaire par Toner & Gray (1988). Une interprétation possible est que ces champs de vitesse représentent un analogue stellaire des écoulements tangentiels de matière observés dans la pénombre des taches solaires (Evershed 1909 ; Toner & LaBonte 1991).

3.3.4 Protubérances coronales

La haute atmosphère des étoiles actives (chromosphère, région de transition, couronne) est également une source d'information très riche sur les champs magnétiques dynamo qui lui ont donné naissance. En particulier, l'étude des protubérances coronales stellaires (détectées par les signatures spectroscopiques en absorption qu'elles impriment dans la plupart des raies fortes du spectre, et en particulier les raies de l'hydrogène de la série de Balmer) nous renseigne sur la topologie du champ magnétique à grande échelle. Ces protubérances sont observables dans le cas particulier de l'étoile AB Dor (e.g. Cameron & Robinson 1989), pour laquelle j'ai pu par ailleurs étudier le champ magnétique photosphérique (Donati & Cameron 1997 ; Donati et al. 1998a). Il a été possible de confirmer que la période de rotation de ces protubérances (déduite de l'intervalle de temps séparant deux passages successifs sur la ligne de visée) est toujours compatible avec la période d'au moins une latitude à la surface de l'étoile, ce qui confirme que ces structures sont bien ancrées dans la photosphère, très probablement par le champ magnétique. L'étape suivante consiste à essayer d'extrapoler vers la couronne le champ photosphérique reconstruit grâce aux techniques d'imagerie de surface (voir Sects. 2.3.1 et 3.2.1) et confronter le résultat obtenu aux distributions de protubérances, afin de pouvoir identifier les points d'ancrage des boucles magnétiques qui confinent ces structures coronales.

Chapitre 4

Magnétisme fossile des étoiles chaudes

4.1 Topologies magnétiques

4.1.1 Prédictions théoriques

Depuis longtemps, les théoriciens (e.g. Cowling 1945) ont prédit que certaines étoiles doivent conserver un vestige magnétique (baptisé champ fossile) d'une phase évolutive antérieure. Si le magnétisme de type dynamo est souvent considéré comme une des particularités des étoiles froides (puisqu'il nécessite en principe la présence d'une zone convective profonde, caractéristique des types spectraux tardifs), le magnétisme de type fossile ne se rencontre généralement que dans les étoiles chaudes, pour lesquelles les temps caractéristiques de dissipation ohmique d'un champ magnétique de structure à grande échelle relativement simple sont comparables ou supérieurs à la durée de vie de l'étoile (principalement à cause de l'absence de convection, facteur qui augmente considérablement – par plusieurs ordres de grandeurs – la vitesse de dissipation de ces champs magnétiques).

Une première propriété de ces champs fossiles est que leur structure photosphérique est relativement simple. En effet, la durée de vie d'une des composantes multipolaires du champ (exprimé sous la forme d'un développement en harmoniques sphériques) est d'autant plus grande que le degré de cette composante est plus bas. La configuration dominante d'une topologie fossile est donc en principe la structure magnétique la plus simple, i.e. le dipôle. C'est tout le contraire des champs magnétiques de type dynamo, dont la structure photosphérique est toujours extrêmement complexe (voir Sect. 3.2.2). Une deuxième caractéristique des champs fossiles est qu'ils ne montrent pas en principe de variabilité intrinsèque à court et moyen terme (i.e. sur des périodes allant jusqu'à typiquement plusieurs siècles), mis à part bien sûr les phénomènes de modulation rotationnelle dus à l'inclinaison de la structure magnétique par rapport à l'axe de rotation de l'étoile. Encore une fois, ce comportement est très différent de celui des structures magnétiques produites par effet dynamo, qui fluctuent considérablement sur des périodes de quelques jours à plusieurs décennies (e.g. cycle d'activité). Notons quand même qu'une évolution des structures magnétiques fossiles peut se produire sur des échelles de temps très longues, suite par exemple à la dissipation ohmique des courants induits, à l'advection des lignes de champ par les écoulements de plasma à grande échelle à l'intérieur de l'étoile (e.g. circulation méridienne induite par la rotation), ou par une transformation de la structure interne de l'étoile (e.g. expansion de l'enveloppe). Enfin, si les théories prévoient une forte dépendance des topologies magnétiques dynamo avec le taux de rotation stellaire (tant pour leur intensité que pour leur structure à grande échelle), ce n'est pas le cas pour les champs de type fossile.

4.1.2 Observations

Cette hypothèse du champ fossile est aujourd'hui l'explication la plus crédible du magnétisme des étoiles chaudes de la séquence principale (étoiles chimiquement particulières magnétiques baptisées Ap magnétiques), ou de celui des naines blanches. Tandis que le champ des étoiles Ap magnétiques proviendrait d'une parcelle du champ galactique emprisonnée par le nuage progéniteur lors de la phase d'effondrement gravitationnel et amplifiée au cours de la contraction de la protoétoile vers la séquence principale, celui des naines blanches magnétiques représenterait le vestige évolutif du champ des étoiles Ap magnétiques qui ont atteint la phase ultime de leur existence. Les observations menées jusqu'à présent indiquent en effet que la structure magnétique de ces étoiles est le plus souvent dipolaire, constante sur des échelles de temps de plusieurs décennies (modulation rotationnelle mise à part) et indépendante du taux de rotation.

Nous sommes pourtant encore loin de pouvoir confirmer définitivement que le champ magnétique de ces étoiles est bien un champ fossile (e.g. Thomas et al. 1995). En effet, les observations magnétiques les plus récentes (e.g. Leroy et al. 1994 ; Wade et al. 1996 ; Schmidt et al. 1986) indiquent que les topologies de ces objets diffèrent souvent d'une expansion multipolaire de bas degré, et comportent très souvent des structurations à petite échelle spatiale. Certains auteurs affirment même que les étoiles Am (qui sont aussi des étoiles chimiquement particulières, plus froides que les étoiles Ap, et pour lesquelles les analyses magnétiques conventionnelles se sont toujours révélées négatives), posséderaient en fait une structure magnétique très complexe, similaire à celle des étoiles de type solaire (Mathys & Lanz 1990). En résolvant les petites échelles à la surface de ces différents types d'étoiles, il devrait être possible d'analyser en détail leur topologie magnétique et d'essayer de tester en profondeur cette hypothèse évolutive qu'est le modèle du champ fossile.

Dans ce but, nous avons très récemment obtenu, avec le spectropolarimètre MuSiCoS au TBL (voir Sect. 2.2.1), des mesures de signatures Zeeman en polarisation circulaire et/ou linéaire avec un très bon échantillonnage du cycle rotationnel (8 phases ou plus) pour 5 étoiles Ap magnétiques parmi les plus étudiées (53 Cam, 49 Cam, α^2 CVn, 78 Vir et β CrB), ainsi que des observations plus fragmentaires pour 7 autres objets (Donati et al. 1998b ; Wade et al. 1998). Il est tout d'abord rassurant de constater que ces nouvelles données sont en bon accord avec les mesures de la composante longitudinale du champ et de la polarisation linéaire en bande large déjà publiées dans la littérature, comme illustré en Fig. 4.1 dans le cas particulier de l'étoile β CrB. Ces deux quantités, produits directs des méthodes traditionnelles de mesure de champ magnétiques (voir Sect. 2.1.1), peuvent en effet être facilement estimées à partir des moments de plus bas degré des signatures Zeeman mesurées avec notre instrument.

Notons qu'il s'agit du premier effort de mesure systématique de la modulation rotationnelle des signatures Zeeman polarisées linéairement et circulairement depuis le travail exploratoire de Borra & Vaughan (1977) resté sans suite. Contrairement à nos espérances premières, il semblerait qu'il ne soit toujours pas possible de reconstruire les topologies magnétiques de ces objets sans hypothèse a priori sur leur structure à grande échelle, même si l'on dispose de mesures précises des signatures Zeeman dans tous les états de polarisation (voir Sect. 2.3.1). Ces données devraient toutefois nous permettre de contraindre

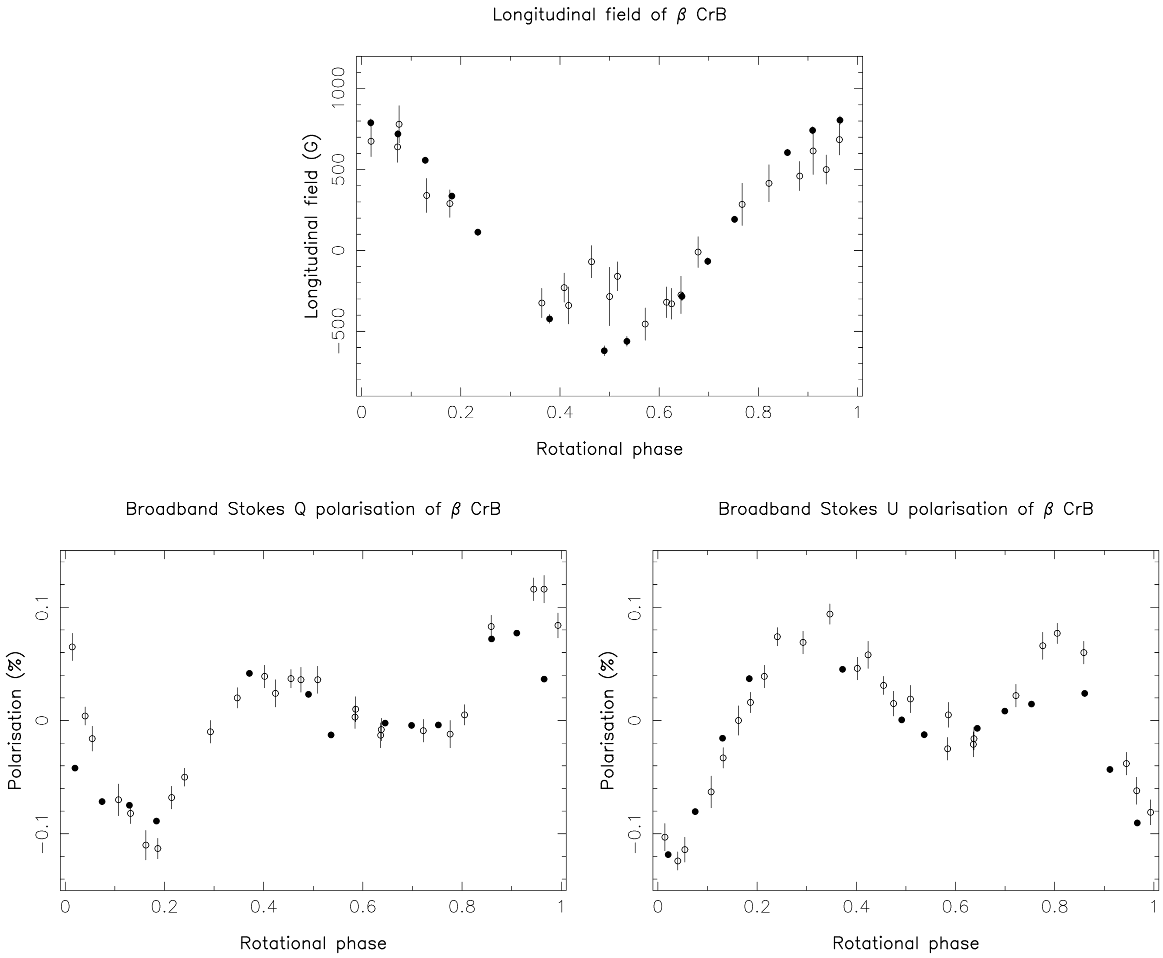

FIG. 4.1: Composante longitudinale du champ magnétique (en haut) et polarisation linéaire en bande large (en bas à gauche : paramètre de Stokes Q ; en bas à droite : paramètre de Stokes U) de l'étoile Ap magnétique β CrB. Les mesures obtenues par les techniques traditionnelles et publiées dans la littérature (cercles blancs, Leroy 1995; Borra & Landstreet 1980) sont en bon accord avec les estimations déduites des signatures Zeeman collectées à l'aide du spectropolarimètre MuSiCoS (cercles noirs). Les écarts qui subsistent sont très probablement imputables aux différences entre les techniques de mesure.

cette structure à grande échelle (et en particulier d'étudier ses déviations par rapport à une expansion multipolaire de bas degré) bien mieux que par le passé. On peut en effet s'en convaincre dès maintenant en observant la forme des signatures Zeeman mesurées, par exemple celles de l'étoile Ap magnétique 53 Cam pour laquelle la totalité des observations collectées est présentée Fig. 4.2. On peut noter en particulier que les signatures Zeeman en polarisation linéaire (paramètres de Stokes Q et U) au voisinage de la phase 0.85, bien que de moyenne nulle sur la largeur du profil (en accord avec les mesures polarimétriques en bande large de Leroy 1995), ont une forme très complexe et probablement riche en information sur la structure spatiale du champ magnétique de cette étoile. L'analyse et la modélisation détaillées de ces observations sont actuellement en cours.

Nous avons également collecté des observations en polarisation circulaire à très fort rapport signal sur bruit pour une dizaine d'étoiles Am de vitesse de rotation comprise entre 2 et 60 $\mathrm{km\,s^{-1}}$. Aucune détection n'a été obtenue jusqu'à une limite de champ longitudinal

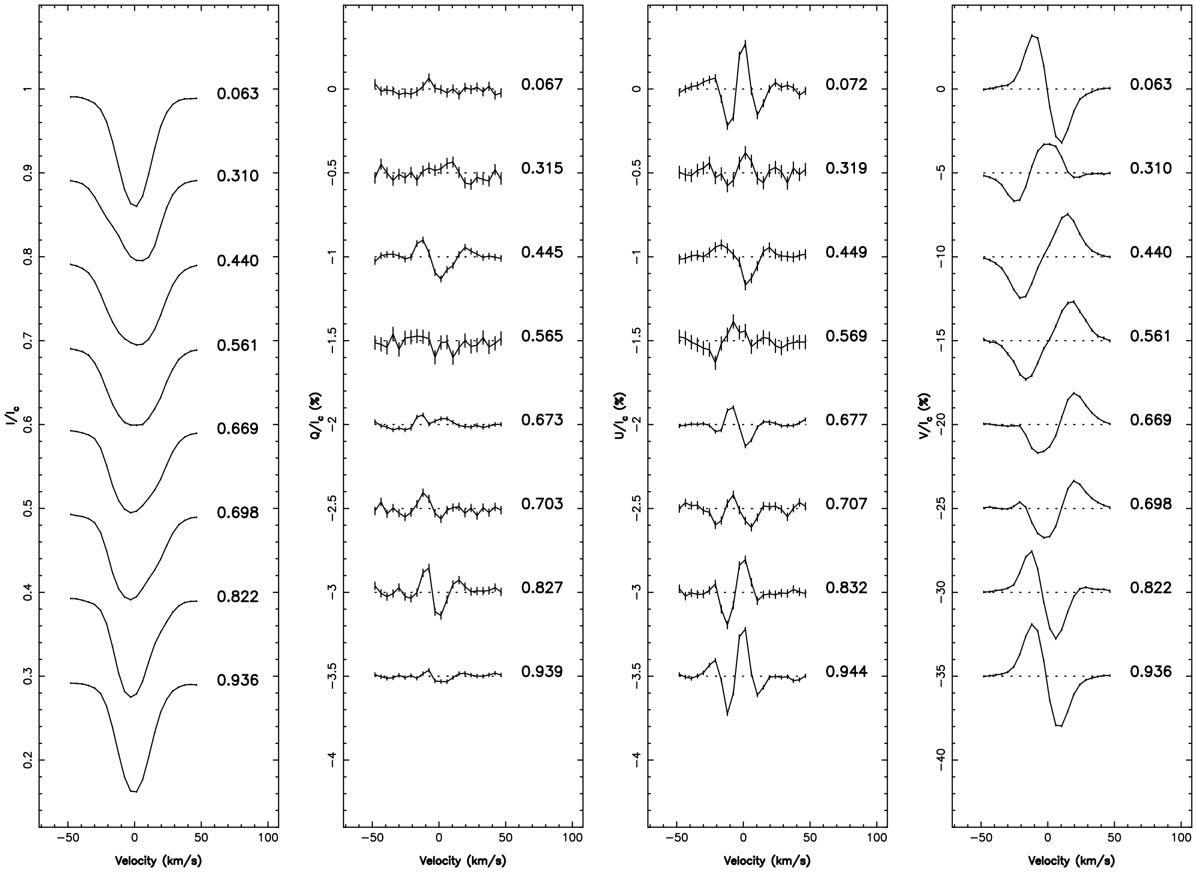

FIG. 4.2: Observations spectropolarimétriques de l'étoile Ap magnétique 53 Cam. De gauche à droite, la figure présente le profil moyen des raies spectrales en lumière non polarisée (paramètre de Stokes I), en polarisation linéaire (paramètres de Stokes Q et U) et en polarisation circulaire (paramètre de Stokes V), dans des phases successives du cycle rotationnel (la phase associée à chaque observation étant indiquée à droite du profil correspondant). On notera que l'échelle de l'axe vertical est différente pour chaque graphique.

de quelques G seulement, ce qui indique en tous cas que les champs de ces objets, s'ils existent réellement, doivent avoir une structure très différente de ceux des étoiles Ap ou des étoiles de type solaire (car nos observations les auraient alors détectés), mettant en jeu de nombreuses régions magnétiques bipolaires d'échelle spatiale extrêmement réduite.

Nous avons enfin observé plusieurs naines blanches magnétiques au cours d'une mission d'observation à l'AAT dont nous avons pu suivre les variations spectroscopiques tout au long du cycle rotationnel, en lumière non polarisée et en polarisation circulaire. Ces données sont encore en cours de modélisation avec la méthode développée dans ce but et présentée en Sect. 2.3.2.

4.2 Phénomènes physiques associés

Les étoiles possédant une structure magnétique de type fossile sont souvent de très bons laboratoires physiques pour l'étude de différents phénomènes sur lesquelles l'influence du champ magnétique est encore mal comprise bien qu'apparemment indubitable. Mentionnons en particulier la diffusion microscopique sous l'effet de la gravité (naines blanches) ou sous l'action combinée de la gravité et de la force radiative (étoiles chimiquement particulières), à l'étude de laquelle j'ai contribué de différentes manières. On pourrait aussi citer les pulsations stellaires et les vents poussés par rayonnement, auxquels je ne me suis pas encore attaché mais sur lesquels je reviendrai brièvement au Chapitre 5.

4.2.1 Diffusion microscopique

Il semble maintenant clair que les anomalies d'abondance observées dans les étoiles chimiquement particulières (et aussi, mais à un degré moins extrême, dans toutes les étoiles chaudes de la séquence principale) sont dues à la diffusion d'espèces chimiques minoritaires dans les régions supérieures des enveloppes stellaires. Dans le cas des naines blanches, cette diffusion opère principalement sous l'effet de la gravité, conduisant à des atmosphères dans les profondeurs desquelles tous les éléments chimiques plus lourds que l'hydrogène coulent. Ce n'est pas du tout le cas des étoiles de la séquence principale pour lesquelles la force radiative intervient de manière importante dans le processus, comme suggéré par Michaud (1970). C'est ainsi que certains éléments peu abondants en moyenne mais dont le spectre est très riche (comme par exemple les terres rares) peuvent subir une force de radiation qui excède la gravité et diffuser progressivement vers les couches superficielles de l'étoile, tandis que d'autres dont le spectre est très pauvre (comme par exemple l'hélium) vont plutôt couler dans les régions profondes de l'enveloppe.

La détection, à la surface des étoiles Ap magnétiques et des naines blanches d'hétérogénéités d'abondance de certaines espèces chimiques dont la répartition spatiale reflète souvent la topologie magnétique, indique clairement que le champ a une influence importante sur le processus de diffusion. Malgré les quelques travaux théoriques plus ou moins approfondis sur le sujet (Mégessier 1984 ; Babel & Michaud 1991), cette interaction entre diffusion et champ magnétique est encore mal comprise, puisqu'elle ne permet en général pas de reproduire en détail les hétérogénéités d'abondance observées à la surface de ces objets (e.g. Babel 1992).

La détection et la mesure du champ magnétique de l'étoile Ap ϵ UMa (dont l'intensité au pôle est de l'ordre de 200 G ; Donati et al. 1990b) ont permis tout d'abord de montrer qu'un champ aussi faible que le champ d'équipartition peut influencer la diffusion (puisque cette étoile possède des hétérogénéités d'abondance très contrastées à sa surface). Les cartographies de ces hétérogénéités pour plusieurs espèces chimiques (O, Ca, Al, Fe, Cr et Ti, Babel et al. 1995) ont également confirmé que la théorie actuelle de la diffusion microscopique en présence de champ magnétique est insuffisante et ne parvient pas à expliquer les observations quand celles ci sont suffisamment précises et disponibles pour de nombreuses espèces chimiques simultanément.

Chapitre 5

Début d'exploration systématique du diagramme HR

Fort des résultats obtenus sur les étoiles froides et Ap magnétiques (dont les champs ont été découverts il y a maintenant près de 20 et 50 ans respectivement), j'ai débuté une nouvelle phase de ce programme de recherche, axée sur l'exploration d'autres classes d'étoiles pour lesquelles existent des indices indirects de la présence d'un champ magnétique. Le but de cette étude est de bien appréhender tous les mécanismes par lesquels le champ magnétique peut influer sur l'évolution stellaire, et éventuellement de mettre en évidence de nouvelles formes de magnétisme stellaire. Parmi les nombreuses classes d'objets à explorer, je me suis pour le moment concentré sur deux, les étoiles chaudes possédant un vent intense et les objets entourés de disques d'accrétion.

5.1 Structuration/confinement du vent des étoiles chaudes

La première de ces classes est formée des étoiles chaudes dont le rayonnement est si intense qu'il parvient à expulser une fraction importante du plasma atmosphérique (de 10^{-8} à 10^{-5} $M_\odot\,\mathrm{yr}^{-1}$ suivant le type spectral). Dans ces étoiles, on observe très souvent une variabilité (et parfois même une modulation rotationnelle) des raies spectrales formées dans le vent (raies d'émission du spectre visible, raies du spectre UV). Cette variabilité est considérée comme un indice de la structuration azimutale du vent en jets lents et rapides alternant successivement sur la ligne de visée. La présence d'un champ magnétique à la surface de ces étoiles est une des explications les plus plausibles de cette structuration.

L'exemple le plus évident est celui des étoiles riches ou pauvres en He, dont le champ magnétique (d'origine probablement fossile) est relativement intense (Bohlender et al. 1993) et confine le vent dans une magnétosphère fermée. La modulation rotationnelle est due au fait que l'axe de la structure magnétique est incliné par rapport à l'axe de rotation, comme dans le cas des étoiles Ap magnétiques ou des naines blanches (voir Sect. 4.1). Le modèle le plus récent qui essaye d'expliquer l'ensemble des observations de manière cohérente est celui de Babel & Montmerle (1997a), qui spécule que la matière ionisée s'échappant le long des lignes de champ rentre en collision avec elle même dans un disque circumstellaire aligné sur l'équateur magnétique. Dans ces étoiles, la modulation rotationnelle que l'on observe est extrêmement stable sur des périodes d'au moins plusieurs décennies, indiquant que la magnétosphère elle même ne semble pas sujette à des épisodes de variabilité intrinsèque. D'autres étoiles chaudes exhibent les mêmes caractéristiques de variabilité spectrale, et en particulier l'étoile O θ^1 Ori C (Stahl et al. 1996), et les étoiles B pulsantes de type β Cep (Henrichs et al. 1993) pour lesquelles aucune détection crédible de champ magnétique n'a encore été obtenue. Nous avons essayé de détecter le champ dans le cas de θ^1 Ori C (Donati & Wade 1998) en utilisant le spectropolarimètre MuSiCoS au TBL, mais la précision des mesures en champ longitudinal que nous avons pu obtenir est de 250 G ($1\,\sigma$) dans le meilleur des cas, ce qui implique que l'intensité magnétique au pôle de la structure dipolaire est inférieure à 1.6 kG environ. Cette mesure n'est pas encore très contraignante du point de vue théorique, puisque le modèle de Babel & Montmerle (1997b) n'invoque qu'un champ dipolaire de l'ordre de 300 G pour expliquer l'émission X de cette étoile (due à la collision des vents en provenance des deux hémisphères magnétiques). De nouvelles mesures, utilisant notamment l'instrument mis au point pour l'AAT (voir Sect. 2.1.1) dont l'efficacité totale est plus de 10 fois supérieure à celle du spectropolarimètre MuSiCoS au TBL (grâce au plus grand pouvoir collecteur du télescope et à la meilleure transmission du spectrographe), devraient permettre de progresser très bientôt sur cette question.

Un deuxième exemple est celui des supergéantes massives (de type spectral O et B) dont les vents, pense t'on, sont simplement structurés en jets lents et rapides (d'après la modulation rotationnelle que l'on observe dans les raies spectrales UV ; Howarth et al. 1995 ; Kaper et al. 1996) sans être réellement confinés par le champ magnétique (puisque la variabilité observée n'est pas stable sur plus de quelques mois, Prinja et al. 1995). Il existe maintenant de nombreuses preuves observationnelles que les structures en corotation dans le vent de ces étoiles qui résultent de l'interaction entre jets lents et jets rapides (une sorte d'analogue stellaire des régions d'interaction en corotation que l'on observe dans le vent solaire, Mullan 1986) trouvent leur origine dans des hétérogénéités photosphériques (Owocki et al. 1995 ; Kaper et al. 1997). La présence d'un faible champ magnétique de surface (quelques dizaines de G tout au plus) est une des explications les plus souvent invoquées, bien qu'il ne soit pas encore vraiment clair quel type de topologie ce champ doit avoir (expansion multipolaire de bas degré comme sur les étoiles riches ou pauvres en Hélium, ou plutôt très complexe et intrinsèquement chaotique pour expliquer la perte de cohérence de la variabilité à long terme). Aucune détection n'a à ce jour pu être obtenue jusqu'à un niveau de précision ($1\,\sigma$) en champ longitudinal de l'ordre de 70 G (Henrichs et al. 1995). J'ai participé moi-même à une des tentatives les plus récentes sans parvenir pour le moment à abaisser notablement cette limite supérieure (Henrichs et al. 1998). Il doit néanmoins être possible d'accroître à court terme la précision de ces mesures d'un ordre de grandeur environ en utilisant l'instrumentation disponible à l'AAT sur quelques uns des plus brillants prototypes de cette classe.

Une phénoménologie similaire est observée pour plusieurs autres classes d'objets, notamment les étoiles Be (e.g. Smith 1989), les étoiles pré-séquence principale Ae/Be de Herbig (Praderie et al. 1986), les supergéantes A et B (Kaufer et al. 1996) et les étoiles Wolf-Rayet (St-Louis et al. 1995). Si aucun champ magnétique n'a pu être mis en évidence pour les étoiles Be (Barker et al. 1985) ni pour les supergéantes A et B (la mesure de Gerth et al. 1991 sur ν Cep n'ayant jamais été confirmée) ou les étoiles Wolf-Rayet, la détection marginale obtenue sur l'étoile Ae de Herbig HD 104237 (Donati et al. 1997) et très récemment confirmée par de nouvelles observations (voir Fig. 5.1) est très encourageante et prometteuse. Cette détection permet d'ores et déjà d'accréditer l'hypothèse de l'origine magnétique de la structuration observée dans le vent de ces objets. Des observations renouvelées de cette étoile devraient en particulier permettre de préciser la structure du champ et donc de faire avancer le débat sur l'origine de ce magnétisme. Il est tou-

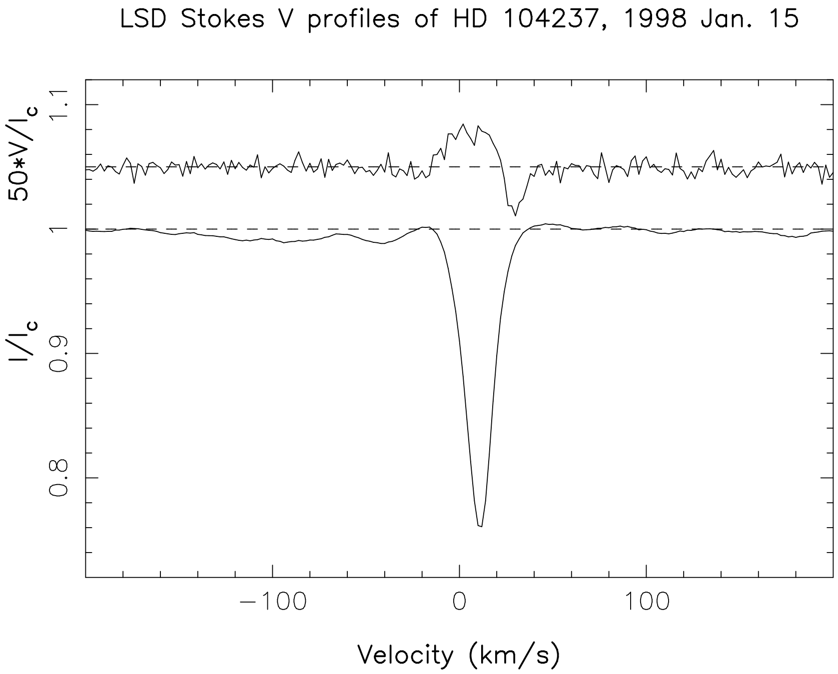

FIG. 5.1: Profils moyens en intensité (bas) et en polarisation circulaire (haut) obtenus par "Déconvolution Moindres-Carrés" sur un spectre de l'étoile Ae de Herbig HD 104237 en Janvier 1998 à l'AAT. Cette détection magnétique claire (correspondant à un champ longitudinal de 50 G environ) confirme la détection marginale obtenue plusieurs années auparavant (Donati et al. 1997). A noter que le spectre en polarisation circulaire a été dilaté d'un facteur 50 et translaté de 1.05 pour les besoins du graphique.

tefois assez peu probable que ce champ soit d'origine fossile ; en effet, cette hypothèse impliquerait (étant donnée l'intensité du champ détecté, voir Fig. 5.1) un confinement magnétosphérique du vent et donc une modulation rotationnelle extrêmement stable et régulière des raies spectrales (comme dans le cas de θ^1 *OriC* par exemple), en contradiction avec les observations de HD 104237 qui indiquent un niveau important de variabilité intrinsèque (i.e. non interprétable en terme de modulation rotationnelle). Si l'hypothèse d'un champ d'origine dynamo au sens solaire du terme peut être tout de suite exclue (cette étoile étant trop chaude pour engendrer dans son enveloppe une convection suffisamment vigoureuse), il est en revanche possible d'invoquer un type de dynamo plus exotique, par exemple une dynamo turbulente dans une enveloppe radiative fortement cisaillée comme proposé récemment dans la littérature par Vigneron et al. 1989, puis par Lignières et al. 1996).

5.2 Accrétion magnétisée dans les objets jeunes et les variables cataclysmiques

Pour les étoiles de faible masse, la phase de formation est une étape évolutive pendant laquelle les champs magnétiques sont supposés jouer un rôle important bien qu'encore mal compris. Si des champs magnétiques ont maintenant été détectés à la surface de plusieurs étoiles T Tauri à raies d'émission peu intenses (Basri et al. 1992 ; Donati et al. 1997), il n'existe que des détections marginales en ce qui concerne les étoiles T Tauri dites classiques

(Unruh et al. 1998). Ce sont pourtant sur ces dernières que le magnétisme doit avoir l'effet évolutif le plus significatif, à travers notamment les phénomènes d'échange de matière et de moment cinétique entre l'objet central et le disque d'accrétion (e.g. Shu et al. 1988 ; Ferreira & Pelletier 1993 ; Cameron & Campbell 1993). En détectant les signatures Zeeman de telles étoiles et en suivant leur modulation rotationnelle en même temps que celle des raies de l'hydrogène (série de Balmer) et de l'hélium (qui nous informent sur les processus d'éjection et d'accrétion de matière), il devrait être possible de contraindre les modèles théoriques proposés sur ce sujet.

Un deuxième enjeu d'importance est la détection des champs magnétiques engendrés au sein des disques d'accrétion que l'on trouve autour des étoiles jeunes de faible masse (T Tauri classiques, FU Ori) ou des objets compacts (variables cataclysmiques). Les indices observationnels indirects de la présence de ces champs magnétiques (viscosité anormalement élevée, émission de type chromosphérique dans les raies de l'hydrogène et de l'hélium, Horne & Saar 1991) sont d'autant plus convaincants que les ingrédients physiques ne manquent pas dans ce type d'objets pour engendrer une dynamo vigoureuse (e.g. Stepinski 1991). Les meilleurs candidats sont sans doute les objets de type FU Ori, que l'on pense aujourd'hui être des disques d'accrétion très massifs et optiquement épais, dont la luminosité intrinsèque (dans leurs phases éruptives) est bien supérieure à celle de l'étoile T Tauri centrale (Hartmann & Kenyon 1985). Les variables cataclysmiques (composées d'une naine blanche accrétant de la matière depuis un compagnon moins évolué remplissant son lobe de Roche) possèdent également des disques anormalement visqueux et sont donc également d'excellents candidats pour cette exploration. Je me suis impliqué dans quelques tentatives de détection de tels champs (Steeghs et al. 1996 ; Donati et al. 1997), qui n'ont pour l'instant donné aucun résultat positif.

Chapitre 6

Conclusion

6.1 Bilan

Au cours des dix dernières années, j'ai concentré mes activités de recherche sur une étude observationnelle du magnétisme stellaire. Le but ultime de cette étude est d'essayer de comprendre l'impact du magnétisme sur les processus physiques opérant dans les enveloppes stellaires, et donc sur l'évolution à moyen et long terme (e.g. cycle d'activité, freinage rotationnel, évolution chimique) des objets magnétisés.

J'ai tout d'abord participé à la définition d'une nouvelle méthode de mesure des champs magnétiques stellaires puis à ses multiples améliorations successives, tant au niveau des instruments, que des procédures d'observation et des logiciels de dépouillement, d'optimisation et de modélisation du signal. Ces progrès nous ont permis en particulier de détecter les champs magnétiques d'une vingtaine d'étoiles de différents états évolutifs (notons qu'il s'agit des premières détections *directes* de champs magnétiques dans des étoiles actives autres que le Soleil). Pour trois de ces objets, des cartographies magnétiques ont été réalisées (il s'agit une fois encore des premières images magnétiques d'étoiles autres que le Soleil). Nous avons également réussi à mesurer les signatures Zeeman en polarisation linéaire d'une douzaine d'étoiles chimiquement particulières magnétiques, et à suivre, pour quelques unes d'entre elles, la modulation rotationnelle de ces signatures. Nous avons enfin obtenu la première détection de champ magnétique dans une nouvelle classe d'étoiles, les étoiles Ae/Be de Herbig.

Les implications de ce travail sont multiples. Dans le domaine des techniques astrophysiques, nous avons montré que les outils de corrélation permettent d'accroître la sensibilité des méthodes d'imagerie des surfaces stellaires de près d'un facteur 1000 en flux et de permettre un accès facile à toute une classe d'objets réservée jusque là aux plus grands télescopes. Appliqué au domaine des champs magnétiques des étoiles actives, cet outil apporte une information tout à fait inédite, en démontrant en particulier pour la première fois que les structures magnétiques stellaires à grande échelle peuvent être cent fois plus intenses que dans le Soleil, et que les processus dynamo qui les engendrent sont distribués dans toute la zone convective et non pas confinés dans une fine couche d'interface avec la zone radiative comme c'est le cas pour le Soleil. Utilisée pour l'observation des hétérogénéités de brillance à la surface de ces mêmes étoiles, cette technique nous a permis de mesurer de manière précise et indiscutable la rotation différentielle dans une étoile froide dont la période de rotation est 50 fois solaire et d'y observer que le cisaillement atmosphérique induit par cette rotation différentielle est similaire à celui du Soleil, avec un équateur qui effectue une rotation de plus que le pôle tous les quatre mois environ.

En observant les étoiles chimiquement particulières magnétiques, nous avons pu observer qu'un champ magnétique proche de l'équipartition est suffisant pour donner naissance à des hétérogénéités d'abondance très fortement contrastées pour de nombreuses espèces chimiques, ce que la théorie de la diffusion microscopique ne permet pas aujourd'hui d'expliquer de manière quantitative. Enfin, la détection d'un champ dans une étoile Ae de Herbig démontre l'origine magnétique de la structuration observée dans le vent de ces objets.

6.2 Perspectives

Les prolongements potentiels de ce travail sont extrêmement nombreux. A très court terme, il convient d'analyser et de modéliser les nombreuses observations obtenues lors des récentes campagnes d'observation au TBL. Ces données devraient en particulier permettre de reconstruire les cartographies magnétiques de trois nouvelles étoiles évoluées (II Peg, UX Ari et σ Gem), et d'étudier la rotation différentielle et la durée de vie des taches photosphériques à la surface de deux étoiles actives (UX Ari et HR 1099). Ces deux objets étant membres de systèmes binaires serrés, il sera particulièrement intéressant d'étudier comment la binarité influe sur la rotation différentielle, et de comparer nos résultats à ceux fortement controversés de Vogt & Hatzes (1991) et Vogt et al. (1998) qui prétendent que ces objets auraient une rotation différentielle antisolaire. Comme annoncé plus haut, les données en polarisation linéaire collectées au TBL sur les étoiles chimiquement particulières magnétiques devraient nous permettre de quantifier les déviations des topologies magnétiques de ces objets par rapport à une expansion multipolaire de bas degré. De nouvelles observations à l'AAT (en Mai, Juillet et Décembre 1998) devraient également nous permettre de mesurer la rotation différentielle de plusieurs étoiles actives depuis la phase T Tauri jusqu'à la séquence principale, de poursuivre le suivi de l'évolution des topologies magnétiques (cycle d'activité) des étoiles froides déjà cartographiées (pour confirmer en particulier le changement de polarité du champ amorcé pour LQ Hya) et d'étudier la structure et l'origine du champ magnétique récemment détecté sur une étoile Ae de Herbig.

A plus long terme, il s'agit d'amplifier le programme de suivi de l'évolution temporelle des cartographies magnétiques stellaires, pour un petit échantillon d'étoiles froides d'états évolutifs variés échelonnant régulièrement l'intervalle compris entre la phase T Tauri et la phase géante rouge. Le but de cette étude est d'analyser le fonctionnement des mécanismes dynamo dans un contexte aussi large que possible, et d'évaluer l'impact du champ magnétique sur la dynamique des zones convectives et sur l'évolution des étoiles de faible masse. Dans ce contexte, l'étude des étoiles entièrement convectives, pour lesquelles la théorie dynamo classique invoquée dans le cas du Soleil (qui requiert en principe la présence d'une zone d'interface entre l'enveloppe convective et l'intérieur radiatif) ne s'applique plus, devrait se révéler particulièrement instructive. A terme, il s'agit de jeter les fondements d'une nouvelle théorie dynamo dont le champ d'application serait beaucoup plus large et qui permettrait d'expliquer à la fois les observations solaires et stellaires. Il faut noter qu'un tel programme d'observation doit pouvoir être mené, comme son analogue solaire, sur une durée égale ou supérieure à celle des cycles d'activité des objets observés (soit typiquement plusieurs décennies), ce qui demande en pratique d'y impliquer rapidement de nouvelles personnes afin d'intensifier les observations et d'assurer leur continuité. Il s'agit ensuite d'enrichir notre bibliothèque de données spectropolarimétriques d'étoiles chimiquement particulières (étoiles Ap magnétiques, naines blanches, mais aussi étoiles

Am et Ap HgMn) pour tester de manière très approfondie l'hypothèse fossile de l'origine des champs magnétiques de cette classe d'étoiles. Ces données nous permettront également de reconstruire, pour quelques étoiles Ap magnétiques, les cartographies des hétérogénéités d'abondance pour de nombreuses espèces chimiques simultanément et donc d'étudier l'impact, encore mal compris sur le plan théorique, du champ magnétique sur les processus de diffusion. J'envisage enfin de donner toute sa dimension au programme d'exploration systématique du diagramme de Hertzsprung-Russell que je viens juste de commencer, à la recherche de nouvelles classes d'objets magnétisés et éventuellement de nouveaux types de magnétisme stellaire. Une des premières étapes sera en particulier de tenter de détecter les champs magnétiques des étoiles chaudes ne présentant pas d'anomalie d'abondance, ou ceux des objets jeunes pour lesquels le champ magnétique est supposé avoir un impact important sur les processus d'accrétion de matière ou de perte de masse.

Si les télescopes de 2 m peuvent sans doute jouer un rôle significatif pour les deux premiers objectifs, le troisième nécessitera impérativement la puissance collectrice de grands télescopes dotés d'instruments efficaces. Un nouveau pas dans cette direction devrait être bientôt réalisé avec la construction d'un nouvel instrument optimisé pour ce genre de programmes, le spectropolarimètre ESPaDOnS construit pour le télescope CFH, de principe très similaire à celui utilisé au TBL ou à l'AAT mais avec une performance accrue (donnant accès en particulier à un plus grand domaine spectral avec une meilleure efficacité). Cet instrument devrait en particulier permettre l'observation des champs magnétiques des étoiles jeunes, des étoiles chaudes et des étoiles de quelques amas ouverts jeunes parmi les plus proches. Il faut noter que l'accroissement des performances instrumentales ne profite pas exclusivement à l'observation des classes d'étoiles intrinsèquement faibles, mais apporte également de nouvelles possibilités d'études toujours plus approfondies des objets plus brillants, en permettant par exemple d'examiner la manière dont les signatures Zeeman varient entre différents groupes de raies spectrales de caractéristiques atomiques (e.g. espèce chimique, décomposition Zeeman, potentiel d'excitation, degré d'ionisation, intensité relative, longueur d'onde) différentes. Une continuation logique de cet effort pourrait être la réalisation d'un instrument similaire pour les télescopes géants (instrument de deuxième génération pour le VLT, ou pour le nouveau télescope espagnol Grantecan) dans le but d'étendre notre exploration aussi loin que possible.

Références bibliographiques

Angel J.R.P., Landstreet J.D., 1970, ApJ 160, L147

Applegate J.H., 1992, ApJ 385, 621

Babcock H.W., 1947, ApJ 105, 105

Babel J., 1992, A&A 258, 449

Babel J., Donati J.-F., Gonzalez J.-F., 1995, in : Strassmeier K.G. (ed.), IAU Symp. 176, "Stellar Surface Structure". Poster proceedings, p. 129

Babel J., Michaud G., 1991, A&A 241, 493

Babel J., Montmerle T., 1997a, A&A 323, 121

Babel J., Montmerle T., 1997b, ApJ 485, L29

Barker P.K., Marlborough J.M., Landstreet J.D., Thompson I.B., 1985, ApJ 288, 741

Barnes J.R., Cameron A.C., Unruh Y.C., Donati J.-F., Hussain G.A.J., 1998, MNRAS, sous presse

Basri G., Marcy G.W., Valenti J.A., 1992, ApJ, 390, 622

Bedford D.K., Chaplin W.J., Davies A.R., et al., 1995, A&A 293, 377

Bohlender D.A., Landstreet J.D., Thompson I.B., 1993, A&A 269, 355

Borra E.F., Edwards G., Mayor M., 1984, ApJ 284, 211

Borra E.F., Vaughan A.H., 1977, ApJ 216, 462

Brown D.N., Landstreet J.D., 1981, ApJ 246, 899

Brown S.F., Donati J.-F., Rees D.E., Semel M., 1991, A&A 250, 463

Cameron A.C., Campbell C.G., 1993, A&A 274, 309

Cameron A.C., Robinson R.D., 1989, MNRAS 236, 57

Choudhuri A.R., Schüssler M., Dikpati M., 1995, A&A 303, L29

Cowling T.G., 1945, MNRAS 105, 166

DeLuca E.E., Fan Y., Saar S.H., 1997, ApJ 481, 369

Donati J.-F., 1990, thèse de doctorat, université Paris VII

Donati J.-F., 1998, MNRAS, sous presse (voir App. B.8)

Donati J.-F., Achilleos N., Matthews J.M., Wesemael F., 1994, A&A 285, 285 (voir App. B.3)

Donati J.-F., Brown S.F., 1997, A&A 326, 1135 (voir App. B.7)

Donati J.-F., Brown S.F., Semel M., et al., 1992b, A&A 265, 682 (voir App. B.2)

Donati J.-F., Cameron A.C., 1997, MNRAS 291, 1 (voir App. B.5)

Donati J.-F., Cameron A.C., Hussain G.A.J., Semel M., 1998a, MNRAS, sous presse (voir App. B.9)

Donati J.-F., Catala C., Wade G.A., et al., 1998b, A&A, sous presse (voir App. B.10)

Donati J.-F., Henry G.W., Hall D.S., 1995, 293, 107 (voir App. B.4)

Donati J.-F., Semel M., Praderie F., 1989, A&A 225, 467

Donati J.-F., Semel M., 1990, Solar Phys. 128, 227

Donati J.-F., Semel M., Carter B.D., Rees D.E., Cameron A.C., 1997, MNRAS 291, 658

(voir App. B.6)
Donati J.-F., Semel M., del Toro Iniesta J.C., 1990b, A&A 233, L17
Donati J.-F., Semel M., Rees D.E., 1992a, A&A 265, 669 (voir App. B.1)
Donati J.-F., Semel M., Rees D.E., Taylor K., Robinson R.D., 1990a, A&A 232, L1
Donati J.-F., Wade G.A., 1998, A&A, soumis (voir App. B.11)
Durney B.R., De Young D.S., Roxburgh I.W., 1993, Solar Phys. 145, 207
Evershed J., 1909, MNRAS, 69, 454
Faurobert-Scholl M., 1993, A&A 268, 765
Ferreira J., Pelletier G., 1993, A&A 276, 625
Gerth E., Scholz G., Glagolevskij I.V., Romaniuk I., 1991, AN 312, 107
Gizon L., Fossat E., Lazrek M., et al., 1997, A&A 317, L71
Glagolevskij Y.V., Piskunov N.E., Khokhlova V.L., 1985, Pis'ma AZh 11, 371
Goncharskij A.V., Stepanov V.V., Khokhlova V.L., Yagola A.G., 1982, AZh 59, 1146
Hale G.E., 1908, ApJ 28, 315
Hall D.S., 1991, in : Tuominen I., Moss D., Rüdiger G. (eds.), IAU Coll. 130, "The Sun and Cool Stars : Activity, Magnetism, Dynamos". Springer, Berlin, p. 353
Hall D.S., 1990, in : Ibanoglu C. (ed.), "Active Close Binaries". Kluwer, Dordrecht, p. 95
Hartmann L., Kenyon S.J., 1985, ApJ 299, 462
Hatzes A.P., 1998, A&A 330, 541
Henrichs H.F., Bauer F., Hill G.M., et al., 1993, in : IAU Coll. 139. CUP, p. 186
Henrichs H.F., Kaper L., Nichols J.S., et al., 1995, in : Strassmeier K.G. (ed.), IAU Symp. 176, "Stellar Surface Structure". Poster proceedings, p. 229
Horne K., 1986, PASP 98, 609
Horne K., Saar S.H., 1991, ApJ 374, L55
Howarth I.D., Prinja R.K., Massa D., 1995, ApJ 452, L65
Johns-Krull C.M., Valenti J.A., 1996, ApJ 459, L95
Kaper L., Henrichs H.F., Fullerton A.W., et al., 1997, A&A 327, 281
Kaper L., Henrichs H.F., Nichols J.S., et al., 1996, A&AS 116, 257
Kaufer A., Stahl O., Wolf B., et al., 1996, A&A 305, 887
Kemp J.C., Wolstencroft R.D., 1974, MNRAS 166, 1
Khokhlova,V.L., 1975, AZh 52, 950
Kitchatinov L.L., Rüdiger G., 1995, A&A 299, 446
Landstreet J.D., 1980, AJ 85, 611
Landstreet J.D., 1992, A&AR 4, 35
Lanza A.F., Rodonò M., Rosner R., 1998, MNRAS 296, 893
Leroy J.L., 1962, Ann. Ap. 25, 127
Leroy J.L., 1995, A&AS 114, 79
Leroy J.L., Landstreet J.D., Bagnulo S., 1994, A&A 284, 491
Leroy J.L., Leborgne J.F., 1989, A&A 223, 336
Lignières F., Catala C., Mangeney A., 1996, A&A 314, 465
Lin H., 1995, ApJ 446, 421
MacGregor K.B., Charbonneau P., 1997, ApJ 486, 484
Marsh T.R., 1989, PASP 101, 1032
Mathys G., 1989, Fund. Cos. Phys. 13, 143
Mathys G., 1991, A&AS 89, 121
Mathys G., 1995, A&A 293, 733
Mathys G., Hubrig S., Landstreet J.D., Lanz T., Manfroid J., 1997, A&AS 123, 353
Mathys G., Lanz T., 1990, A&A 230, L21

Mayor M., 1980, A&A 87, L1
Mégessier C., 1984, A&A 138, 267
Mestel L., 1994, in : Lynden-Bell D. (ed.), NATO Advanced Research Workshop, "Cosmical Magnetism", Kluwer, Dordrecht, 181
Michaud G., 1970, ApJ 160, 641
Mullan D.J., 1986, A&A 165, 157
Nordlund Å., Brandenburg A., Jennings R.L., et al., 1992, ApJ 392, 647
Owocki S.P., Cranmer S.R., Fullerton A.W., 1995, ApJ 453, L37
Parker E.N., 1955, ApJ 122, 293
Parker E.N., 1993, ApJ 408, 707
Praderie F., Simon T., Catala C., Boesgaard A.M., 1986, ApJ 303, 311
Preston G.W., 1971, ApJ 164, 309
Prinja R.K., Massa D., Fullerton A.W., 1995, ApJ 452, L61
Ribes J.C., Nesme-Ribes E., 1994, A&A 281, 968
Rice J.B., Wehlau W.H., Khokhlova V.L., 1989, A&A 208, 179
Robinson R.D., 1980, ApJ 239, 961
Robinson R.D., Worden S.P., Harvey J.W., 1980, ApJ 236, L155
Rüedi I., Solanki S.K., Mathys G., Saar S.H., 1997, A&A 318, 429
Saar S.H., 1988, ApJ 324, 441
Saar S.H., 1996, in : Strassmeier K.G., Linsky J.L. (eds.), IAU Symp. 176, "Stellar Surface Structure". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 237
Schatzman E., 1991, in : Cox A.N., Livingston W.C., Matthews M.S. (eds.), "Solar Interior and Atmosphere". University of Arizona Press, p. 192
Schmidt G.D., West S.C., Liebert J., Green R.F., Stockman H.S., 1986, ApJ 309, 218
Schüssler M., 1996, in : Strassmeier K.G., Linsky J.L. (eds.), IAU Symp. 176, "Stellar Surface Structure". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 267
Semel M., 1989, A&A 225, 456
Semel M., Donati J.-F., Rees D.E., 1993, A&A 278, 231
Semel M., Li J., 1995, Solar Phys. 164, 417
Shu F.H., Lizano S., Ruden S.P., Najita J., 1988, ApJ 328, L19
Smith M.A., 1989, ApJ 71, 357
Spiegel E.A., Weiss N.O., 1980, Nature 287, 616
St-Louis N., Dalton M.J., Marchenko S.V., Moffat A.F.J., Willis A.J., 1995, ApJ 452, L57
Stahl O., Kaufer A., Rivinius T., et al., 1996, A&A 312, 539
Steeghs D., Horne K., Marsh T.R., Donati J.-F., 1996, MNRAS 281, 626
Steenbeck M., Krause F., 1969, AN 291, 49
Stenflo J.O., 1989, A&AR 1, 3
Stepinsky T.F., 1991, PASP 103, 777
Stout-Batalha N.M., Vogt S.S., 1996, in : Strassmeier K.G., Linsky J.L. (eds.), IAU Symp. 176, "Stellar Surface Structure". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 337
Thomas J.H., Markiel J.A., Van Horn H.M., 1995, ApJ 453, 403
Toner C.G., Gray D.F., 1988, ApJ 334, 1008
Toner C.G., LaBonte B.J., 1991, ApJ 368, 633
Unruh Y.C., Donati J.-F., and the MuSiCoS collaboration, 1998, in : Kaper L., Fullerton A. (eds.), ESO workshop on "Cyclical variability in stellar winds", sous presse
Valenti J.A., Marcy G.W., Basri G., 1995, ApJ 439, 939
Vigneron C., Mangeney A., Catala C., Schatzman E., 1990, Solar Phys. 128, 287
Vogt S.S., Hatzes A.P., 1991, in : Tuominen I., Moss D., Rüdiger G. (eds.), IAU Coll.

130, "The Sun and Cool Stars : Activity, Magnetism, Dynamos". Springer, Berlin, p. 297
Vogt S.S., Hatzes A.P., Misch A.A., Kürster M., 1998, ApJS, soumis
Vogt S.S., Penrod G.D., 1983, PASP 95, 565
Vogt S.S., Penrod G.D., Hatzes A.P., 1987, ApJ 321, 496
Wade G.A., Donati J.-F., Mathys G., Piskunov N.E., 1998, in : Ziznovsky J., North P. (eds.), 26th European Working Group on CP stars, sous presse
Wade G.A., Elkin V.G., Landstreet J.D., et al., 1996, A&A 313, 209
Weber M., Strassmeier K.G., 1998, A&A 330, 1029
Wickramasinghe D., Ferrario L., 1988, ApJ 334, 412
Zahn J.-P., 1989, A&A 220, 112

Appendice A

Liste complète de publications

A.1 Publications dans des journaux à comité de lecture

Donati J.-F., Semel M., Praderie F., 1989, A&A 225, 467
"Zeeman-Doppler Imaging of active stars II. Numerical simulation and first observational results"

Donati J.-F., Semel M., 1990, Solar Phys. 128, 227
"Zeeman-Doppler Imaging : a new option for magnetic field study of Ap and solar-type stars"

Donati J.-F., Semel M., Rees D.E., Taylor K., Robinson R.D., 1990a, A&A 232, L1
"Detection of a magnetic region on HR 1099"

Donati J.-F., Semel M., del Toro Iniesta J.C., 1990b, A&A 233, L17
"The magnetic field of the Ap star ϵ UMa"

Brown S.F., **Donati J.-F.**, Rees D.E., Semel M., 1991 A&A 250, 463
"Zeeman-Doppler Imaging of solar-type and Ap stars IV. Maximum entropy reconstruction of 2D magnetic topologies"

Donati J.-F., Semel M., Rees D.E., 1992a, A&A 265, 669 (voir App. B.1)
"Circularly polarised spectroscopic observations of RS CVn systems"

Donati J.-F., Brown S.F., Semel M., et al., 1992b, A&A 265, 682 (voir App. B.2)
"Photospheric imaging of the RS CVn system HR 1099"

Donati J.-F., Catala C., 1993, A&A 277, 123
"Simulated imaging of the upper atmosphere of active stars"

Catala C., Böhm T., **Donati J.-F.**, Semel M., 1993, A&A 278, 187
"Circular polarisation and variability in the spectra of the Herbig Ae/Be stars I. The Fe II 5018 Å and the He I 5876 Å lines of AB Aurigae"

Semel M., **Donati J.-F.**, Rees D.E., 1993, A&A 278, 231
"Zeeman-Doppler Imaging of active stars III. Instrumental and technical considerations"

Donati J.-F., Achilleos N., Matthews J.M., Wesemael F., 1994, A&A 285, 285 (voir App. B.3)
"ZEBRA : ZEeman BRoadening Analysis of magnetic white dwarfs I. Maximum entropy reconstruction of Hα profiles"

Catala C., Böhm T., **Donati J.-F.**, et al., 1994, Solar Phys. 155, 185
"Azimuthal structures in the wind and chromosphere of the Herbig Ae star AB Aur. Preliminary results from the MuSiCoS '92 campaign"

Donati J.-F., Henry G.W., Hall D.S., 1995, A&A 293, 107 (voir App. B.4)
"Activity, rotation and evolution of the RS CVn system λ And"

Steeghs D., Horne K., Marsh T.R., **Donati J.-F.**, 1996, MNRAS 281, 626
"Slingshot prominences during dwarf nova outbursts ?"

Böhm T., Catala C., **Donati J.-F.**, et al., 1996, A&AS 120, 431
"Azimuthal structures in the wind and chromosphere of the Herbig Ae star AB Aur. Results from the MuSiCoS '92 campaign"

Carter B., Brown S.F., **Donati J.-F.**, Rees D.E., Semel M., 1996, PASA 13, 150
"Zeeman Doppler Imaging of stars with the AAT"

Catala C., Böhm T., **Donati J.-F.**, et al., 1997, A&A 319, 176
"Short-term variability of photospheric lines in the pre-main sequence Herbig Ae star AB Aur from the MuSiCoS '92 campaign"

Donati J.-F., Cameron A.C., 1997, MNRAS 291, 1 (voir App. B.5)
"Differential rotation and magnetic polarity patterns on AB Doradus"

Donati J.-F., Semel M., Carter B.D., Rees D.E., Cameron A.C., 1997, MNRAS 291, 658 (voir App. B.6)
"Spectropolarimetric observations of active stars"

Donati J.-F., Brown S.F., 1997, A&A 326, 1135 (voir App. B.7)
Zeeman-Doppler imaging of active stars V. Sensitivity of maximum entropy maps to field orientation"

Barnes J.R., Cameron A.C., Unruh Y.C., **Donati J.-F.**, Hussain G.A.J., 1998, MNRAS sous presse
"Doppler images from Least-Squares Deconvolved, low SN spectra of two G dwarfs in the α Persei cluster"

Donati J.-F., 1998a, MNRAS sous presse, (voir App. B.8)
"Magnetic cycles of HR 1099 and LQ Hydrae"

Donati J.-F., Cameron A.C., Hussain G.A.J., Semel M., 1998a, MNRAS sous presse (voir App. B.9)
"Magnetic topology and prominence patterns on AB Doradus"

Donati J.-F., Catala C., Wade G.A., et al., 1998b, A&A sous presse (voir App. B.10)
"A dedicated polarimeter for the MuSiCoS échelle spectrograph"

Donati J.-F., Wade G.A., 1998, A&A soumis (voir App. B.11)
"On the magnetic field and circumstellar environment of the young O7 star θ^1 Orionis C"

Catala C., **Donati J.-F.**, Böhm T., et al., 1998a, A&A soumis
"Short-term spectroscopic variability in Herbig Ae star AB Aurigae during the MuSiCoS 1996 campaign"

A.2 Mémoires

Donati J.-F., 1990, Thèse de doctorat, Université Paris VII
"Contribution à l'étude des structures magnétiques des atmosphères stellaires"

A.3 Exposés invités de type revue lors de colloques internationaux

Donati J.-F., 1993, in : Weiss W.W., Baglin A. (eds.), IAU Coll. 137, Inside the Stars.

ASP Conf. Series 40, 136.
"Temperature, abundance and magnetic mapping of stellar atmospheres"

Donati J.-F., 1996a, in : Strassmeier K.G., Linsky J.L. (eds.), IAU Symp. 176, p. 53
"Stellar magnetic imaging from spectropolarimetric data"

Donati J.-F., 1998b, in : Kaper L., Fullerton A. (eds.), proc. of the ESO workshop on "Cyclical variability in stellar winds" (sous presse).
"Surface magnetic fields of non-degenerate stars"

A.4 Autres contributions lors de colloques internationaux

Donati J.-F., Semel M., 1990, in : Tuominen I., Moss D., Rüdiger G. (eds.), IAU Coll. 130, The Sun and Cool Stars : Activity, Magnetism, Dynamos. Springer, Berlin, p. 321.
Contributed paper "Towards magnetic images of rapidly rotating late-type stars"

Brown S.F., **Donati J.-F.**, 1991, in : Byrne P.B., Mullan D.J. (eds.), Armagh Obs. Coll. : Surface Inhomogeneities on Late-Type Stars.
Contributed paper "Mapping magnetic fields on rapidly rotating stars"

Donati J.-F., Brown S.F., Semel M., Rees D.E., 1992, in : Giampapa M.S., Bookbinder J. (eds.), 7th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun. ASP Conf. Series 26, 353.
Contributed paper "Mapping magnetic fields on rapidly rotating stars. Application to the RS CVn system HR 1099"

Donati J.-F., 1994, in : Lynden Bell D. (ed.), NATO workshop, Cosmical Magnetism, p. 53.
Contributed paper "Mapping magnetic fields on rapidly rotating stars. Application to the RS CVn system HR 1099"

Jankov S., **Donati J.-F.**, 1995, in : Huang L., Zhai D.S., Catala C., Foing B.H. (eds.), proc. of the fourth MuSiCoS workshop, p. 143.
"Indirect surface imaging of HR 1099 from MuSiCoS '89 and '92 data"

Donati J.-F., 1995a, in : Huang L., Zhai D.S., Catala C., Foing B.H. (eds.), proc. of the fourth MuSiCoS workshop, p. 317.
"Spectropolarimetry with MuSiCoS"

Semel M., Carter B., **Donati J.-F.**, Rees D.E., Brown S.F., Li J., Thatcher J., 1995, in : Mein N., Sahal-Bréchot S. (eds.), atelier GdR : la polarimétrie, outil pour l'étude de l'activité magnétique solaire et stellaire, p. 137
"Zeeman-Doppler imaging at the AAT"

Donati J.-F., 1995b, in : Mein N., Sahal-Bréchot S. (eds.), atelier GdR : la polarimétrie, outil pour l'étude de l'activité magnétique solaire et stellaire, p. 149
"Spectropolarimetry with MuSiCoS"

Catala C., **Donati J.-F.**, 1995, in : Azzopardi M. (ed.), proc. of the fourth CFHT users' meeting, p. 245
"A fiber-fed echelle spectropolarimeter at CFHT"

Babel J., **Donati J.-F.**, Gonzalez J.-F., 1995, in : Strassmeier K.G. (ed.), IAU Symp. 176, poster proceedings, p. 129
"Multi-element abundance imaging of the Ap star ϵ UMa"

Donati J.-F., 1996b, in : Donati J.-F. (ed.), proc. of the AFCOP meeting on solar & stellar dynamos, p. 83
"Surface imaging of cool stars"

Semel M., Carter B.D., **Donati J.-F.**, Rees D.E., Thatcher J.D., 1996, in : Donati J.-F.

(ed.), proc. of the AFCOP meeting on solar & stellar dynamos, p. 73
"Zeeman Doppler Imaging at the Anglo-Australian Telescope"

Donati J.-F., Cameron A.C., Hussain G.A.J., Semel M., 1998c, in : Donahue B. (ed.), proc. of the 10th workshop on Cool Stars, Stellar System and the Sun (sous presse)
"Differential rotation and magnetic polarity patterns on AB Doradus"

Hussain G.A.J., Cameron A.C., **Donati J.-F.**, 1998, in : Donahue B. (ed.), proc. of the 10th workshop on Cool Stars, Stellar System and the Sun (sous presse)
"Surface imaging of magnetic fields : simulation and results"

Unruh Y.C., **Donati J.-F.**, et al., 1998a, in : Donahue B. (ed.), proc. of the 10th workshop on Cool Stars, Stellar System and the Sun (sous presse)
"MuSiCoS observations of SU Aurigae"

Unruh Y.C., **Donati J.-F.**, et al., 1998b, in : Kaper L., Fullerton A. (eds.), proc. of the ESO workshop on "Cyclical variability in stellar winds" (sous presse).
"MuSiCoS observations of SU Aurigae"

Catala C., **Donati J.-F.**, Böhm T., et al., 1998b, in : Kaper L., Fullerton A. (eds.), proc. of the ESO workshop on "Cyclical variability in stellar winds" (sous presse).
"MuSiCoS observations of AB Aurigae"

Henrichs H., de Jong J., Catala C., **Donati J.-F.**, et al., 1998, in : Kaper L., Fullerton A. (eds.), proc. of the ESO workshop on "Cyclical variability in stellar winds" (sous presse).
"First results of the November 1996 MuSiCoS campaign on the O7.5III star ξ Persei"

Wade G.A., **Donati J.-F.**, Mathys G., Piskunov N.E., 1998, in : Ziznovsky J., North P. (eds.), proc. of the 26th European Working Group on CP stars (sous presse)
"Linear spectropolarimetry of Ap stars : a new degree of constraint on magnetic structure"

A.5 Edition de compte rendu de colloque

Proceedings of the AFCOP meeting on solar & stellar dynamos, held in Toulouse on 1995 Sept. 18 to 20