

Astérosismologie et activité stellaire au Dôme C

François Bouchy, Benoît Mosser, Claude Catala

23 septembre 2005

GROUPE DE TRAVAIL

Thierry Appourchaux	(IAS – thierry.appourchaux@ias.u-psud.fr)
François Bouchy	(OAMP – francois.bouchy@oamp.fr)
Jérôme Bouvier	(LAOG – jerome.bouvier@obs.ujf-grenoble.fr)
Claude Catala	(LESIA – claudc.catala@obspm.fr)
Merieme Chadid	(LUAN – merieme.chadid@unice.fr)
Jean-François Donati	(LAT – jean-francois.donati@ast.obs-mip.fr)
Eric Fossat	(LUAN – eric.fossat@unice.fr)
Benoît Mosser	(LESIA – benoit.mosser@obspm.fr)
Francois-Xavier Schmider	(LUAN – francois-xavier.schmider@unice.fr)
Frédéric Thévenin	(OCA – frederic.thevenin@obs-azur.fr)
Gérard Vauclair	(LAT – gerard.vauclair@ast.obs-mip.fr)

ROLE ET BUTS DU GROUPE DE TRAVAIL

Lors du dernier colloque Dôme C (Toulouse, juin 2004) s'est révélé le besoin de constitution d'un groupe de travail chargé de structurer la communauté physique stellaire pour le Dôme C, de répondre à la concurrence internationale, et de définir la meilleure stratégie et la meilleure instrumentation pour répondre à ces 2 sujets scientifiques. Ce besoin a été réaffirmé par le PNPS suite aux demandes de crédits 2005.

Mandat du groupe

- *Identifier et structurer les programmes scientifiques de physique stellaire qui bénéficient des possibilités d'observation continue au Dôme C*
- *Définir dans un premier temps une stratégie et un calendrier, ensuite des perspectives instrumentales*
- *Positionner ces programmes par rapport au contexte international*

CALENDRIER DU GROUPE DE TRAVAIL

Avril 05	Constitution du groupe de travail
31 Mai 05	Première réunion de travail à Paris
Juin 05	Réalisation d'un premier document
14 Juin 05	Présentation au CS du PNPS
30 Juin 05	Présentation à la SF2A à Strasbourg
Automne 05	Réunion à l'automne 2005 sur le montage d'un projet instrumental (consortium, partenaire, financement, groupe technique, validation et calendrier)

PLAN DU DOCUMENT

- 1 – CONTEXTE SCIENTIFIQUE
- 2 – LE DÔME C
- 3 – ETAT DES LIEUX DES OBSERVATIONS
- 4 – LE DÔME C VERSUS LES PROJETS A VENIR
- 5 – STRATEGIES PHYSIQUE STELLAIRE DÔME C
- 6 – PRESENTATION DE QUELQUES PROJETS POSSIBLES
- 7 – LES CIBLES OBSERVABLES AU DÔME C
- 8 – CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

1 – CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Le besoin d'observations continues sur plusieurs semaines ou plusieurs mois sans les coupures dues à l'alternance jour/nuit est fondamental pour de nombreux programmes de physique stellaire et plus particulièrement pour l'astérosismologie et l'activité stellaire. Une couverture temporelle continue permet une analyse des spectres en fréquence non ambiguë, non polluée par les alias du jour à 11.6 μHz ainsi que l'analyse de phénomènes transitoires liés aux éruptions et protubérances stellaires.

Le Dôme C offre des conditions propices pour les longues observations continues (3 mois de nuits complètes avec un taux de remplissage proche de 90%) et offre de surcroît des conditions de transparence et de seeing exceptionnelles. Un tel site ouvre des perspectives nouvelles qu'un réseau multi-site ne pourrait pas offrir.

Les domaines de la physique stellaire non concernés par le besoin absolu d'observations continues ne sont pas abordés dans ce document, quand bien même leurs interactions avec l'astérosismologie et l'activité stellaire sont fécondes et/ou indispensables. Ce document ne traite donc pas de mesures d'abondance, d'interférométrie....

La communauté française est très bien positionnée en spectropolarimétrie et astérosismologie dans le contexte international, grâce à son implication dans le projet COROT mais aussi grâce aux spectromètres ELODIE, HARPS, ESPADONS et d'ici peu SOPHIE et NARVAL. De surcroît, elle possède de fortes compétences en modélisation et théorie.

Les objectifs fondamentaux mais limités de COROT, et l'absence de projets spatiaux à plus long terme, rendent indispensable de définir une stratégie pour l'astérosismologie au sol.

Sur cette qualité essentielle d'observations continues, le site du Dôme C révolutionne les perspectives dans principalement 2 domaines en physique stellaire : l'astérosismologie et l'activité stellaire

2 - LE DÔME C

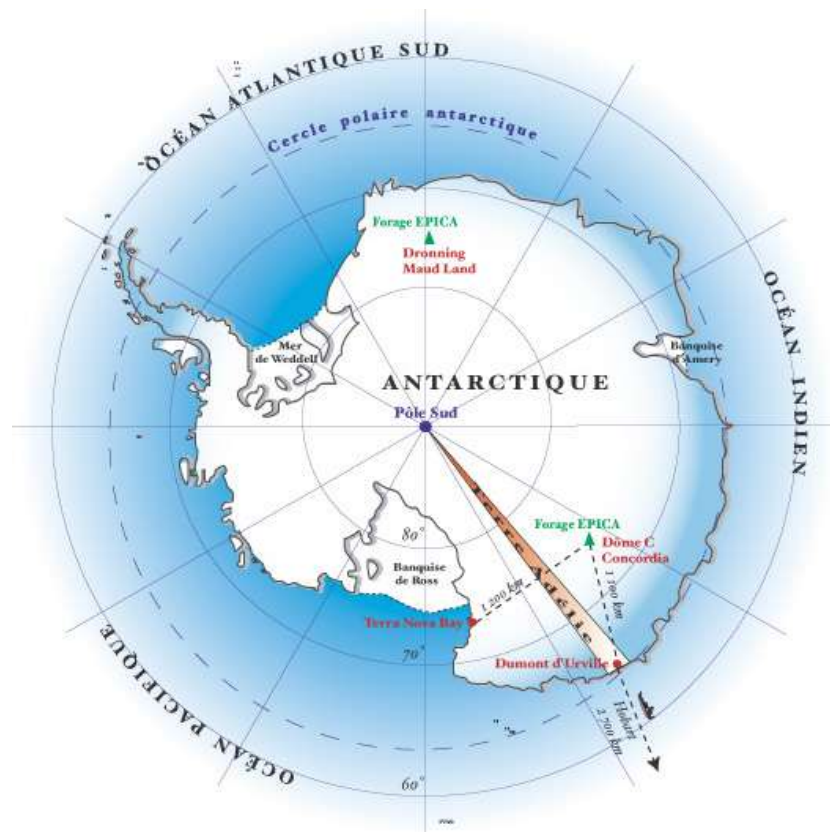
2.1 - Caractéristiques du site

Le Dôme C est situé en Antarctique à 75° de latitude sud et 3200 m d'altitude (voir Fig. 2.1). Les conditions météorologiques sont caractérisées par de très faibles vitesses de vent (2.8 m/s en moyenne), de très rares précipitations neigeuses et de basses températures (-30° en été et -60° en hiver), un air très sec et un ciel coronal. Le transport des personnes et du matériel léger est effectué par avion en été depuis les bases de Terra Nova Bay et Dumont d'Urville (3h). Le transport du matériel est effectué par tracteur (12 jours). Les activités scientifiques du Dôme C s'articulent autour des 5 thématiques suivantes : Glaciologie, Aéronomie, Astrophysique, Géophysique et Biologie. Les premières qualifications du Dôme C montrent le potentiel unique de ce site pour les observations continues sur de longs intervalles de temps et pour les conditions de transparence et de seeing exceptionnelles qui y règnent. Les propriétés du seeing nocturne ne sont néanmoins pas encore complètement déterminées.

Les mesures réalisées à l'aide d'un DIMM indique un seeing exceptionnel (0.2 arcsec) à condition de se placer à plus de 30 m du sol. Une caractérisation complète du seeing

(actuellement réalise par Karim Agabi et l'équipe du LUAN) permettra à la fin du premier hivernage de dimensionner et d'optimiser les instruments futurs (échantillonnage d'un CCD et/ou taille de la fibre optique alimentant un spectromètre). Un seeing de 0.2 arcsec permettrait notamment un gain significatif de l'efficacité de la collecte du flux stellaire par fibre optique et la possibilité de définir un spectromètre plus compact. **Néanmoins un seeing plus standard de 1 à 2 arcsec ne compromet aucunement le retour scientifique en astérosismologie et activité stellaire qui se base principalement sur les possibilités uniques d'observations continues du Dome C.**

Fig. 2.1 –
Localisation



géographique du Dôme C en Antarctique

La latitude du site assure une couverture continue sur toutes les cibles circumpolaires de déclinaison inférieure à -30° avec $\sec z < 4$ ou de déclinaison inférieure à -45° avec $\sec z < 2$. La transparence du ciel assure la possibilité de pointer des cibles brillantes même lorsque le soleil est proche sous l'horizon ce qui laisse envisager la possibilité de suivre de cibles brillantes circumpolaires jusqu'à une durée totale de 6 à 9 mois. Le premier hivernage montre un cycle utile de l'ordre de 90%, comparable à celui obtenu dans l'espace. Quelques aurores polaires sont à signaler, rares et basses sur l'horizon. Il faudrait pouvoir caractériser leurs fréquences, les bandes de longueur d'onde principale où elles émettent et leur luminosité. Le tableau suivant synthétise les deux propriétés du Dôme C qui en font un site unique pour l'astérosismologie et l'activité stellaire.

Propriétés	Avantage par rapport à d'autres sites
------------	---------------------------------------

Seeing	0.2 – 1.5 arcsec	<ul style="list-style-type: none"> - Efficacité de la collecte de photons - Stabilité du centrage/guidage sur fibre - Spectromètre plus compact - Meilleure précision photométrique
Cycle utile	3 mois avec cycle utile de 90 % 5 mois avec cycle utile > 50%	<ul style="list-style-type: none"> - Continuité des observations inaccessible ailleurs sur Terre et aussi bonne que dans l'espace

Table 2.1 – Propriétés du Dôme C pour l'astérosismologie et l'activité stellaire

2.2 - Conditions pratiques du site

Les conditions de température extrême et l'éloignement conditionnent tout projet à installer au Dôme C. Tout instrument se doit d'être très largement autonome, entièrement automatisé ou robotisé. La maintenance ne peut être qu'exceptionnelle, réduite à des tâches simples ou des tâches liées à la survie de l'instrument. Quand bien même le point de fonctionnement nominal d'un instrument sera à température ambiante, il n'est pas exclu qu'il doive supporter des très basses températures : -35°C pendant le transport par chenillettes, voire -80°C en stockage. Ces conditions se rapprochent de celle du spatial et ont une influence sur les coûts des projets instrumentaux. Néanmoins les expériences de qualification du site ont montré qu'il était possible d'adapter aux conditions extrêmes des télescopes du commerce (changement des tubes par des tubes en Invar, boîtier chauffant pour les moteurs d'entraînement, lubrifiant spécial grand froid). Quel que soit le programme scientifique, le traitement des données sera entièrement automatisé, comme il l'est déjà sur HARPS ou l'a été sur le FTS du CFH utilisé en mode sismique. En mode astérosismique, le traitement conduit à la mesure de la vitesse Doppler ou au flux photométrique pour chaque pose. Le volume des données à transférer est alors très faible, puisqu'il peut se limiter au transfert de la série temporelle. Dans le cas de la spectropolarimétrie, le traitement conduit à un profil de raie spectral moyen ; ici encore le flux de données reste limité.

3 – ETAT DES LIEUX DES OBSERVATIONS

3.1 – Astérosismologie

3.1.1 – Photométrie versus spectroscopie

Les récents résultats d'astérosismologie au sol ont montré la nette supériorité des mesures de spectroscopie Doppler par rapport aux mesures photométriques pour les oscillations de type solaire. La précision nécessaire pour la photométrie des étoiles de type solaire de quelques ppm s'avère impossible à atteindre depuis le sol, même au Dôme C. Néanmoins, pour certaines autres classes d'étoiles pulsantes, la spectroscopie Doppler n'est pas adaptée (les étoiles chaudes, les rotateurs rapides et les étoiles ayant un nombre insuffisant de raies spectrales). Les performances photométriques attendues du Dôme C en font un lieu privilégié pour l'étude photométrique des cibles de la bande d'instabilité telles que les δ Scuti, γ Dor, ρ Ap, ainsi que les étoiles en fin d'évolution (naines blanches, SdB, ...).

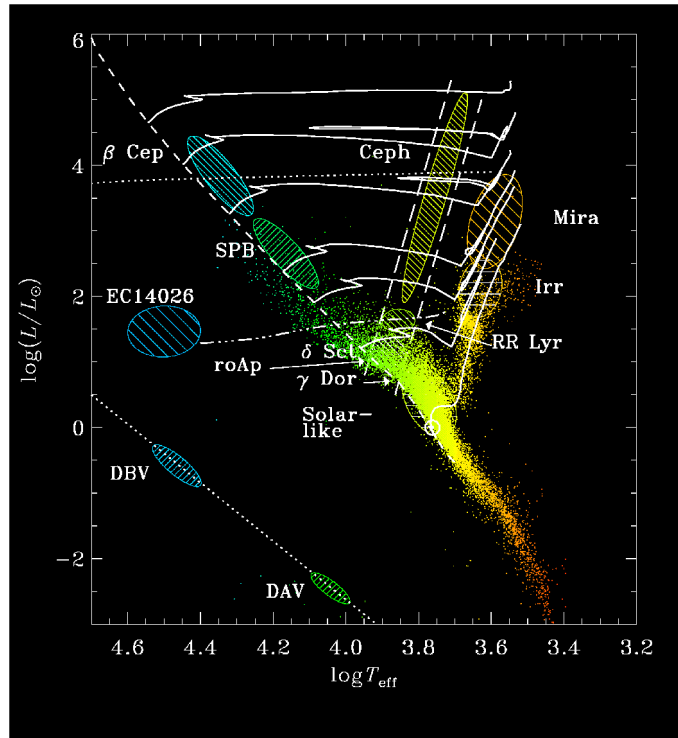


Fig. 3.1- Les différentes classes d'étoiles pulsantes dans le diagramme HR.

3.1.2 – Astérosismologie des étoiles de type solaire

Les récentes améliorations des mesures de vitesses radiales, illustrées en grande partie par les spectromètres ELODIE, CORALIE et HARPS, ont conduit ces dernières années à des résultats importants dans la détection et caractérisation des modes d'oscillations acoustiques dans les étoiles de type solaire (Bouchy & Carrier 2003). Il est désormais possible de détecter depuis le sol des modes p d'amplitude de quelques dizaines de cm/s en seulement quelques nuits d'observations avec HARPS (Mayor et al. 2003).

Parmi les résultats marquants de HARPS en astérosismologie de type solaire on peut citer :

- La détection dans la série temporelle des modes p sur Procyon (F5IV/mv=0.4) avec un niveau de bruit dans le spectre d'amplitude de 9 cm/s après 5 heures de mesures (Bouchy et al. 2004).
- La détection dans la série temporelle des modes p sur α Cen B (K1V/mv=1.4) avec un niveau de bruit dans le spectre d'amplitude de 2.9 cm/s après 7 heures de mesures (Bouchy 2005).
- La détection de modes p sur mu Arae (G3V/mv=5.1) avec un niveau de bruit dans le spectre d'amplitude de 4.5 cm/s après 80 heures de mesures (Bouchy et al. 2005).
- La détection de modes p sur HD49933 (F5V/mv=5.8) avec un niveau de bruit dans le spectre d'amplitude de 11 cm/s après 57 heures de mesures (Mosser et al. 2005).

Néanmoins le spectromètre HARPS ne permet pas de mener de longues campagnes d'observations à cause de la forte pression sur cet instrument. Une à deux campagnes de 5 à 9 nuits par semestre sont actuellement le maximum que l'on peut espérer obtenir sur HARPS pour l'astérosismologie des étoiles de type solaire. HARPS est de plus fortement pénalisé par sa couverture temporelle incomplète due à l'alternance jour/nuit, et n'a pas d'équivalent pour mener des campagnes multi-sites.

3.2 – Activité stellaire

Les récents progrès en spectropolarimétrie ont conduit au développement d'ESPADONS (3.6-m CFHT). Le suivi continu de phénomènes variables en spectropolarimétrie permet de mesurer les champs magnétiques des étoiles et donc d'étudier de manière quantitative un grand nombre de phénomènes physiques associés à la présence de ce champ magnétique, qui s'avèrent souvent cruciaux dans de multiples phases évolutives de la vie d'une étoile. Plus spécifiquement, on peut mentionner les études suivantes, qui apparaissent les plus prometteuses :

- magnétisme des disques d'accrétion et contraintes sur les modèles structures magnétisés d'accrétion/éjection conduisant aux jets confinés observés près des étoiles jeunes (des AGNs et des binaires X),
- accrétion magnétosphérique et couplage magnétique entre étoile et disque dans les objets jeunes, afin de mieux comprendre l'évolution rotationnelle d'une étoile de faible masse dans les toutes premières phases de son évolution,
- structuration azimuthale et radiale des disques d'accrétion et étude des phénomènes liés à la formation et à la migration des systèmes planétaires,
- rotation différentielle et circulation méridienne dans les zones convective des étoiles froides,
- mécanismes dynamos dans les étoiles complètement convectives (pour lesquelles les mécanismes invoqués pour le soleil, opérant dans une tachocline, ne peuvent être invoqués),
- protubérances, couronne, chauffage coronal et éjections de masse coronale dans les étoiles actives de type solaire, en particulier dans les étoiles jeunes (ZMAS) qui n'ont pas encore dissipé leur moment angulaire
- couplages entre le champ magnétique et les pulsations dans les étoiles de type solaire et caractérisation de l'activité magnétique et de la rotation différentielle des étoiles pulsantes (eg cibles Corot)
- vents magnétiquement confinés et disques d'excrétion circumstellaires des étoiles chaudes (Be/B/O/CP) pour étudier notamment le rôle du champ magnétique sur la perte de masse des étoiles très massives.

Malgré son installation très récente, ESPaDOnS a déjà permis d'effectuer des percées dans la plupart de ces domaines en détectant les champs magnétiques dans un échantillon d'objets représentatifs de ces différentes classes, et en démontrant du même coup la faisabilité de ces programmes. A noter que plusieurs de ces programmes sont aujourd'hui des programmes clés sur les satellites X Chandra et XMM et sont donc, à ce titre, des programmes de pointe de la recherche astrophysique internationale.

Une particularité commune à tous les programmes observationnels mentionnés ci-dessus est qu'il convient d'observer la variabilité associée (qu'elle soit due à une modulation rotationnelle ou à un phénomène épisodique) de manière quasi continue pour obtenir un bon échantillonnage temporel de la variation, condition cruciale pour modéliser en détail le phénomène observé. Cette variabilité intervenant sur des échelles de temps très différentes (quelques minutes à quelques heures pour les éruptions et les phénomènes d'accrétion magnétosphériques, plusieurs heures à plusieurs jours pour la modulation rotationnelle des étoiles et des disques, plusieurs semaines pour l'évolution des topologies magnétiques à la surface des étoiles), il n'y a pas d'autre alternative que d'étudier tous ces phénomènes de variabilité (le plus souvent superposés les uns aux autres) de manière continue afin de pouvoir séparer leurs contributions respectives et d'étudier en détail leurs effets.

En utilisant un spectromètre échelle à haute résolution ($> 50,000$) et forte efficacité ($> 10\%$ tout compris) sur un design similaire à HARPS (montage double pupille, plongé dans une enceinte évacuée et avec un contrôle thermique), mais simplifié sur différents aspects et incluant une bonnette polarimétrique de type ESPaDOnS (donnant accès à des études spectropolarimétriques), il serait possible de mener l'ensemble des programmes listés plus haut (astérosismologie, activité stellaire, étude des atmosphères exoplanétaires), avec une précision encore jamais obtenue sur aucun autre télescope au monde.

3.3 – Retombées en exoplanétologie

Des observations de longues durées réalisées en continu pourraient également s'avérer très fructueuses dans le domaine des exoplanètes. En effet, si les programmes de recherche d'exoplanètes par vélocimétrie n'ont pas un besoin crucial d'observations temporelles continues, ceux par transits photométriques (voir par anti-transits) nécessitent un suivi permanent des objets. De plus la recherche photométrique ou mieux spectropolarimétrique (offrant ainsi un meilleur contraste) de la lumière réfléchie des Jupiters chauds (permettant d'investiguer la composition chimique de leur atmosphère) nécessite aussi un grand nombre d'observations continues pour atteindre le seuil de détectabilité requis. Dans ces deux cas, et étant données les périodes orbitales des exoplanètes concernées (typiquement quelques jours), il est quasiment impossible d'observer de nombreux transits successifs à partir d'un site unique. Des observations en continu depuis le Dome C s'avèreraient donc particulièrement prometteuses. Ajoutons qu'un programme d'astérosismologie intensif et de longue durée sur une étoile de type solaire permet d'atteindre des niveaux de précision vélocimétrique pouvant conduire à la détection d'exoplanètes de seulement quelques masses terrestres (voir Bouchy et al., 2005).

4 – LE DÔME C VERSUS LES PROJETS A VENIR

4.1 – Mono-site

Pour bénéficier de l'analyse sismique et traduire les observables sismiques en résultats de structure interne, un cycle utile supérieur à 80% s'impose. Le meilleur sismomètre actuel, HARPS, ne peut pas dépasser un cycle utile de 45% , et ne peut apporter les longues campagnes d'observations nécessaires à la haute résolution en fréquence.

4.2 – Réseaux sols

Les réseaux sols existent pour des instruments simples (photométrie) et des télescopes de taille réduite. La sismologie des oscillations de type solaire nécessite, pour atteindre les performances du Dôme C à performance en magnitude équivalente, un réseau de 4 à 6 télescopes. Ceci est actuellement irréalisable et l'étude des coûts montre que la solution Antarctique est moins chère. Les premières estimations montrent que le cycle utile au Dôme C peut atteindre 90% alors que les meilleures campagnes du réseau WET et du réseau MUSICOS n'atteignent que très ponctuellement un cycle utile de l'ordre de 70% . De plus le raccordement des données et la gestion des différents sites s'avèrent souvent difficiles et peu efficaces.

4.3 – Spatial

MOST : Le satellite canadien MOST, dédié aux mesures de photométrie précise, a récemment montré qu'il n'avait pas la précision suffisante pour déceler les modes-p sur Procyon, malgré plus de 30 jours d'observation continue, alors que quelques heures ont suffi avec HARPS depuis le sol pour les observer (Bouchy et al., 2004). MOST connaît de sérieuses difficultés pour la détection et l'analyse des oscillations de type solaire, et les observations qu'il fournit ne répondent que partiellement aux besoins des études de l'activité stellaire.

COROT : Le satellite COROT conduira à des avancées considérables en observant pendant 5 mois continus 5 ou 6 champs comprenant une étoile principale (type solaire ou δ Scuti) ainsi que 8 à 9 étoiles secondaires. Néanmoins COROT ne parviendra pas à couvrir intégralement le diagramme HR (de par son nombre limité de cibles, et l'absence de cibles moins massives que G0V). Au-delà de COROT (fin 2009), il n'existe pas de projets spatiaux d'astérosismologie, le projet Eddington de l'ESA ayant été annulé.

L'astérosismologie au Dôme C permet de compléter et d'approfondir le programme de COROT en menant des études sur des cibles identiques à celles de Corot (les cibles Corot ne sont observables depuis le Dôme C) et surtout en complétant le diagramme HR et en augmentant l'échantillon d'étoiles étudiées. On peut citer notamment les études suivantes :

- étude des cibles plus froides que le Soleil,
- étude des cibles dévoilées par le programme secondaire de COROT mais non étudiées en détail,
- étude des variations à long terme des fréquences et amplitudes,
- analyse des variations de profil de raies des pulsateurs classiques,
- comparaison des observables spectrométrique et photométrique, permettant une étude des mécanismes d'excitation des oscillations,
- étude et caractérisation de l'activité magnétique,
- mesure de la rotation et de la rotation différentielle de surface.

Le Dôme C est non seulement la meilleure solution pratique pour répondre aux objectifs scientifiques, mais de plus représente l'option actuellement la plus prometteuse pour l'après-COROT

5 – STRATEGIE PHYSIQUE STELLAIRE DÔME C

5.1 – Stratégie court terme (2007-2010)

La mise en œuvre rapide d'un instrument pour la physique stellaire au Dôme C consisterait soit à utiliser le télescope italien IRAIT (80-cm) qui sera installé au Dôme C en 2007 soit à adapter un petit télescope de 40-cm. Pour un tel collecteur de petit diamètre, deux stratégies complémentaires sont envisagées :

- 1) photométrie CCD
- 2) spectromètre par Transformée de Fourier

La solution photométrie CCD permettrait sur un télescope de petite dimension (40 à 80-cm) d'étudier les étoiles pulsantes situées sur la bande d'instabilité ainsi que les naines blanches et SdB. Un tel programme pourrait probablement être compatible avec le programme de recherche d'exoplanète par transits photométriques (projet A-STEP).

La spectrométrie par TF permettrait de s'attaquer aux étoiles de type solaire. Un spectromètre par TF de type SIAMOIS (Mosser & Maillard, 2005) utilisé avec un petit collecteur dédié de 40cm permettrait d'étudier au minimum les oscillations de α Cen A et B et d'une poignée de sous-géantes (β Hydri, δ Pav, et χ Eri) et géantes, tirant ainsi le meilleur parti des premiers hivernages. Une adaptation aux cibles stellaires du sismomètre par TF SYMPA (Schmider et al., 2002, 2003) dédié à l'étude sismique de Jupiter n'est pas directement envisageable, le passage d'une cible étendue à une cible ponctuelle demandant un important remaniement du concept instrumental.

L'installation d'un spectromètre par TF derrière le 80-cm IRAIT donnerait accès à un plus grand nombre de cibles, offrant la possibilité d'une meilleure couverture du diagramme HR. Il faudrait néanmoins s'assurer que ce télescope pourra dédier une large fraction de son temps d'observation aux programmes d'astérosismologie.

Cette stratégie à court terme, basée sur une extension de projets existants, pourrait et devrait être réalisée rapidement. Même si elle ne permet pas de couvrir l'ensemble des études de sismologie et d'activité stellaire, elle offre l'avantage de pouvoir démarrer très rapidement et d'aboutir très vite à une exploitation efficace du dôme C. Elle peut être menée dans le cadre d'une opération française ou d'une collaboration franco-italienne.

5.2 – Stratégie pour 2010-2012

La stratégie qui semble se dégager pour l'horizon 2010-2012 (l'après Corot) serait de développer un instrument offrant à la fois la possibilité de mener :

- des mesures de spectroscopie Doppler de très haute précision pour la sismologie des étoiles de type solaire,
- des mesures de spectroscopie haute résolution ($R > 50000$) pour la sismologie des pulsateurs classiques,
- des mesures de spectropolarimétrie pour l'étude et la caractérisation de l'activité et des champs magnétiques.

Il s'agirait donc d'un spectromètre échelle basé sur le concept de HARPS ou SOPHIE auquel s'ajouterait le mode polarimétrique de ESPADONS ou NARVAL. Le but serait de coupler cet instrument à un télescope de 2-m dédié.

Un tel instrument pourrait ainsi mener des campagnes de plusieurs semaines, voire plusieurs mois, sur un seul objet pour mesurer à la fois :

- son spectre acoustique Doppler,
- ses variations de profil de raies,
- son champ magnétique et ses variations,
- son taux de rotation et sa rotation différentielle de surface
- ses abondances spectroscopiques.

Un mois de mesure permettrait d'atteindre une résolution en fréquence de l'ordre de 0.3 μ Hz, résolution suffisante pour caractériser les fréquences individuelles, les séparations, la levée de dégénérescence rotationnelle, et la durée de vie des modes. Plusieurs semaines d'observation continue permettrait de couvrir la rotation stellaire et de mesurer la rotation différentielle et de distinguer la modulation rotationnelle de la variabilité intrinsèque.

Un tel instrument aurait aussi des retombées en exoplanétologie que ce soit dans les mesures de vitesses radiales ou dans la recherche de la signature polarimétrique de la réflectivité des atmosphères planétaires.

Une telle stratégie nécessite une collaboration internationale compte tenu des coûts impliqués (1 Meuros pour le spectromètre et 4-5 Meuros pour le télescope). Parmi les partenaires intéressés identifiés, on peut citer les Italiens, Australiens, Belges, et Danois.

On note que l'observation des étoiles de type solaire dans des amas ouverts visibles depuis l'Antarctique nécessiterait un collecteur d'au-moins 4-m de diamètre, ce qui semble difficilement réalisable à l'horizon 2010-2012.

6 – PRESENTATION DE QUELQUES PROJETS POSSIBLES

6.1 - Photométrie

La stratégie serait ici d'utiliser les retombées du projet A-STEP (Fressin et al. 2005) ou du projet de photomètre CCD de G. Grec (OCA). A-STEP consiste en une caméra CCD placée sur un télescope de 40-cm pour la recherche d'exoplanètes par transit photométrique. Le but est d'observer de manière continue et sur une longue période (plusieurs semaines) un même champ, suffisamment dense, pour détecter et caractériser des transits de Jupiters chauds. Le domaine de magnitude visée pour la recherche de transits s'échelonne de $m_v=10$ à $m_v=15$ sur un champ de quelques dizaines de minutes d'arc. Le but de cet instrument est avant tout de montrer sa capacité à atteindre sur une longue durée une précision photométrique de 1 mmag dans la série temporelle, pour une cadence d'échantillonnage de l'ordre de la minute. Un tel instrument serait tout à fait compatible avec l'observation d'une ou plusieurs étoiles pulsantes. Le coût de A-STEP est estimé à 100 keuros.

6.2 – Spectrométrie par TF : SIAMOIS

Le principe du projet SIAMOIS (Sismomètre Interférentiel A Mesurer les Oscillations des Intérieurs Stellaires) (Mosser & Maillard 2005) est basé sur la spectrométrie par transformée de Fourier qui conduit à un instrument plus compact qu'un spectromètre échelle. Un instrument tel HARPS est intrinsèquement 50% plus efficace que SIAMOIS, comme le montrent les performances théoriques, limitées par le seul bruit de photons (Mosser et al. 2003). Néanmoins dupliquer HARPS ou bien son équivalent SOPHIE n'a de sens qu'à plus long terme, lorsque le site d'observation en Antarctique pourra accueillir un collecteur de grand diamètre (2-m). Pour préparer cette échéance, un projet tel que SIAMOIS s'avère bien placé. Il s'agit d'un instrument dédié à un seul objectif scientifique : cette qualité est nécessaire au Dôme C, dans un environnement très contraint, où toute versatilité est source de complexité ingérable à court terme. Par ailleurs, SIAMOIS est un instrument compact : sa pièce centrale, un interféromètre, est moins sensible aux perturbations qu'un spectromètre à réseau : l'équivalent de la haute résolution spectrale est en effet obtenu pratiquement par une lame de verre assurant la différence de marche de travail, fixe, et un miroir à échelons assurant le balayage statique d'une frange d'interférence. L'alimentation par simple fibre assure le brouillage nécessaire ; par principe, un spectromètre par TF s'accommode d'un seeing moyen.

Quelques autres points de dimensionnement permettent de mesurer les différences entre SIAMOIS et un spectromètre échelle : un CCD de 1024x256 pixels suffit pour

l'enregistrement de l'information, contre 4096x2048 pour un spectro échelle ; le montage optique occupe un volume 8 fois moindre. Le principe de l'interféromètre, sans pièce mobile, monobloc par adhérence moléculaire, est conçu pour une intégration en laboratoire et une installation à poste avec un minimum de réglages. L'automatisation de l'instrument, la réduction des données fournissent également des arguments en faveur de SIAMOIS. SIAMOIS permet donc d'envisager la sismologie au sol à un coût moindre et probablement plus simple opérationnellement qu'avec un spectromètre à réseau.

Les spécifications scientifiques de SIAMOIS assurent l'observation, à partir du Dôme-C, de plus de 20 cibles, étoiles F à K de magnitude $V < 5$ et $v \sin i < 20$ km/s, avec un collecteur de 2-m, de 11 cibles avec un collecteur de 80-cm (IRAIT), et d'encore 6 cibles avec un collecteur de 40-cm. L'échantillon de cibles potentielles est plus que doublé lorsque l'on considère les étoiles géantes rouges présentant des modes de pression, ainsi que d'autres cibles potentielles telles les δ -Scuti.

Un précurseur de SIAMOIS a été le Fourier Transform Spectrometer du CFH utilisé en mode astérosismique. Avec ce mode, l'amplitude et la grande séparation de Procyon ont clairement été identifiées dès 1998 (Mosser et al A&A 340, 457), avec un niveau de bruit limité à 2 fois le bruit de photons.

Le coût de SIAMOIS est estimé à 500 keuros pour l'instrument seul, sans la bonnette, développé dans une version pour l'Antarctique. Son délai de réalisation est estimé inférieur à 2 ans. Le coût d'un petit collecteur de 40-cm dédié avoisine les 70 keuros.

6.4 – Spectromètre échelle de type SOPHIE / NARVAL

Le spectromètre SOPHIE, en cours de réalisation à l'OHP, sera installé fin 2005 sur le télescope de 193-cm. Avec une résolution spectrale de 70'000 et couvrant tout le domaine visible de 380 à 680 nm, SOPHIE permettra un gain en efficacité de 2 mag par rapport à ELODIE et se situera typiquement 1.5 magnitudes en dessous de HARPS. SOPHIE vise une précision Doppler comparable à celle de HARPS. Son coût effectif est de 550 keuros sans la bonnette. Sa durée d'étude et réalisation aura été de 3 ans. On note qu'une réplique pourrait prendre nettement moins de temps mais il faut l'adapter au Dôme C.

Pour comparaison, le spectromètre HARPS a coûté 1850 keuros et a été étudié et réalisé en 3 ans. Le spectromètre ESPADONS a lui coûté 750 keuros.

Par conséquent un spectromètre échelle stabilisé de type SOPHIE/ESPADONS avec une bonnette offrant un mode polarimétrique et intégrant les contraintes liées au Dôme C coûterait de l'ordre de 1 Meuro. Le coût d'un collecteur dédié de 2-m avoisinerait les 4-5 Meuros.

Un télescope dédié de 2-m associé à un spectromètre efficace (10-15% tout compris) et de haute précision (1 m/s) permettrait de mener des études d'astérosismologie sur des étoiles de type solaire jusqu'à la magnitude 6 permettant ainsi l'accès à un large échantillon (~50 cibles). Un tel instrument aurait typiquement la même sensibilité que HARPS sachant que HARPS sur le télescope de 3.6-m n'a que 4% d'efficacité lumineuse totale. En se basant sur les performances de HARPS, on s'attendrait à avoir un niveau de bruit de photons de 1 m/s en 1 mn de pose sur une naine K de magnitude 6. En accumulant 4500 mesures sur 5 jours (avec un cycle utile de 95%), on s'attendrait à un niveau de bruit dans le spectre d'amplitude de 3

cm/s ; 45 jours de campagne permettrait d'atteindre le cm/s et une résolution en fréquence de l'ordre de 0.25 μ Hz.

En se basant sur l'expérience des projets HARPS/SOPHIE et ESPADONS/NARVAL, une équipe de 3 à 5 personnes pendant 15 jours est nécessaire au réglage final du spectromètre et à son couplage avec le télescope.

7 – LES CIBLES OBSERVABLES DEPUIS LE DOME C

7.1 – Les étoiles de type solaire

Projet	Cibles de classe IV + V	Remarque	Durée min/max du programme, en hivernage
Spectro TF 40 cm	3 + 3	Le champ sur le ciel permet de s'affranchir de toute considération de seeing ; les cibles α Cen A et B sont séparées et observables séparément ; elles présentent un rapport signal à bruit estimé à 36 et 12 respectivement.	2 / 3
Spectro TF 80 cm	4 + 7	Passer de 40 cm à 80 cm permet d'avoir accès à des cibles F, de doubler le rapport signal/bruit pour une meilleure détermination des fréquences propres les moins excitées.	3 / 5
Spectro Echelle 200 cm	~ 50	La réalisation du programme scientifique nécessite un télescope automatique dédié, prévu à l'horizon 2010-2012.	5 / 10

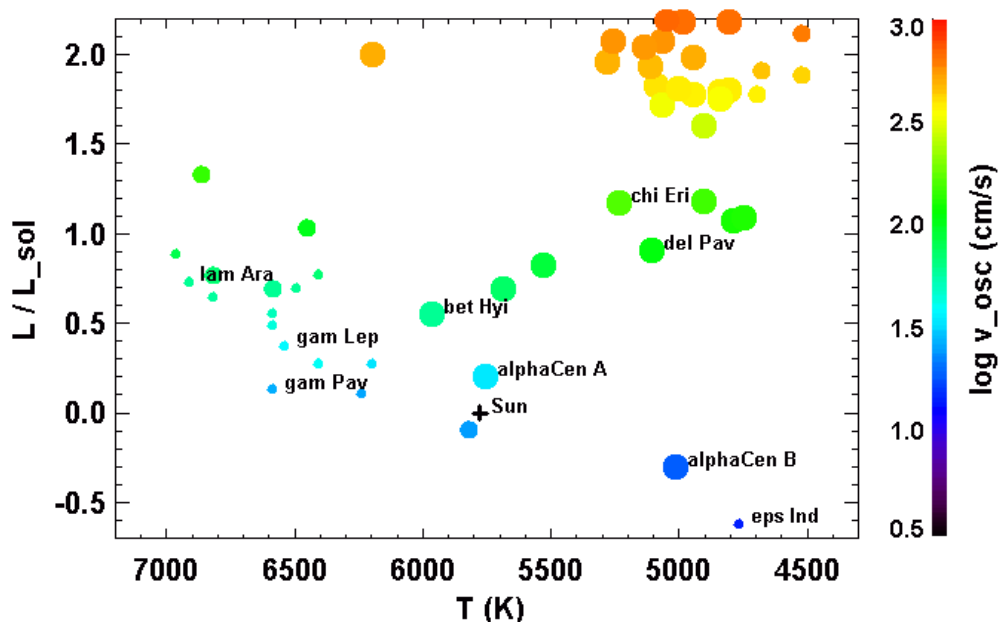


Fig. 7.1- Cibles observables au Dôme-C avec un spectromètre tel SIAMOIS, avec un rapport signal-à-bruit meilleur que 6. La taille du symbole est inversement proportionnelle au diamètre du collecteur : les cibles indiquées par un grand rond sont observables avec un collecteur de 40 cm, un rond moyen correspond à 80 cm, un petit rond à 2 m. Les amplitudes sont calculées d'après Samadi et al. 2004 (avec extrapolation pour les étoiles géantes).

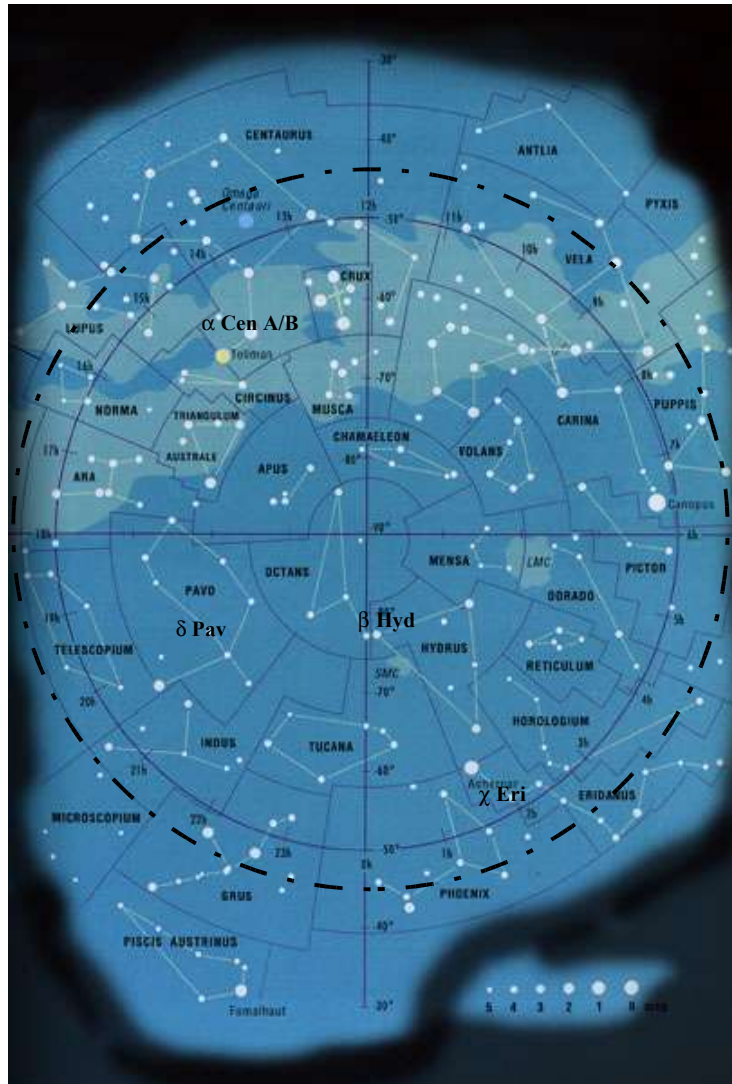


Fig. 7 – Hémisphère sud de la voûte céleste. La ligne pointillée représente la limite de déclinaison -45° permettant d'observer une cible continûment avec $\text{secz} < 2$. Les 5 cibles de type solaire les plus brillantes sont représentées.

7.2 – Les étoiles actives

Etude détaillée du magnétisme de type solaire

Ce programme a pour but essentiel de préciser la topologie magnétique et ses variations le long des cycles d'activité, pour des étoiles froides à différents stades d'évolution, depuis la phase T Tauri jusqu'à celle des géantes rouges.

étoiles	T_{eff} (K)	âge (Man)	m_v	$v \sin i$ (km/s)	P_{rot} (j)
T Tauri	3500-5400	1-10	11-13	10-50	3-10
post TTS/ZAMS	4000-5400	10-30	11-13	10-150	0.3-10
FUor	3000-8000	1-10	9-13	30-100	1-5
amas jeunes	4000-7000	30-100	9-13	10-150	0.5-10
champ	4000-7000	1000-5000	6-13	10-20	5-10
RS CVn/ FK Com	4000-6000	10000	6-10	10-100	1-20

Etude détaillée du magnétisme fossile

Ce programme a pour but essentiel de préciser la topologie magnétique dans les étoiles non dégénérées dont le champ est d'origine fossile (étoiles Ap, étoiles b Cep, certaines étoiles O).

étoiles	T_{eff}	âge (Man)	m_v	vsini (km/s)	P_{rot} (j)
étoiles Cp	8000-20000	10-100	2-10	10-50	3-20
étoiles β Cep	25000	10	3-10	20-200	5-15
Ae/Be de Herbig	7000-20000	1-5	7-11	30-150	1-10
étoiles Be classiques	10000-26000		4-9	60-250	1-5
étoiles O/B	25000-45000	1-10	2-10	5-300	5-100

7.3 – Les étoiles de la bande d'instabilité

Cette rubrique regroupe les étoiles de type δ Scuti, γ Dor, roAp, ainsi que les étoiles en fin d'évolution (naines blanches, SdB, ...). Plusieurs dizaines de naines blanches variables et de SdB plus brillantes que mv=16.5 sont observables depuis le Dôme C avec un photomètre couplé à un petit télescope (40-80 cm).

8 – CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Il apparaît clairement que l'astérosismologie apporte un programme scientifique de pointe, bénéficiant de la continuité des observations sur les cibles circumpolaires observables au Dôme C, et peut constituer une première étape pour la montée en puissance de ce site unique pour l'astronomie.

Vu les contraintes de calendrier pour les futurs projets au Dôme C et l'avancement de COROT, les ambitions de tout projet d'astérosismologie est à dimensionner dans la suite de ce projet spatial. Après COROT, il n'y aura plus lieu de rechercher les oscillations de telle ou telle cible, mais de prolonger l'astérosismologie observationnelle des oscillations de type solaire dans plusieurs directions :

- vers les cibles non explorées par COROT, parmi lesquelles les étoiles froides,
- vers les cibles relevées par le programme secondaire COROT mais non étudiées en détail.
- vers de très longues séquences d'observation (plusieurs mois) inaccessibles en un autre site.

La stratégie préconisée par le groupe propose 2 étapes :

- ***A court terme (2007-2010), développement d'un instrument de type photomètre pour les pulsateurs classiques et d'un spectromètre par TF basé sur un télescope de 40-cm ou sur le télescope IRAIT de 80-cm, pour l'étude sismique des étoiles de type solaire.***
- ***A moyen terme après Corot (2010-2012), développement d'un spectromètre échelle avec mode vitesses radiales et mode polarimétrie basé sur un télescope dédié de 2-m, pour des objectifs d'astérosismologie et d'activité stellaire.***

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bouchy, F., Pepe, F., & Queloz, D., 2001, *A&A*, 374, 733 ``Fundamental photon noise limit to radial velocity measurements''
- Bouchy, F., & Carrier, F., 2003, *Ap&SS*, 284, 21 ``*Present Observational status of solar-type stars*''
- Bouchy, F., Maeder, A., Mayor, M., et al., 2004, *Nature*, 432(7015), 2 ``*Oscillations on the star Procyon*''
- Bouchy, F., 2005, in *Dome C Astronomy/Astrophysics Meeting*, EDP Sciences, EAS Publications Series, Vol. 14, 127 ``*Doppler asteroseismology from Dome C: goals and prospects*''
- Bouchy, F., Bazot, M., Santos, N.C., et al., 2005, *A&A*, 440, 609 ``*Asteroseismology of the planet-hosting star mu Arae. I. The acoustic spectrum*''
- Donati, J.-F., Semel, M., Carter, B.D., et al., 1997, *MNRAS*, 291, 658, ``Spectropolarimetric observations of active stars''
- Donati, J.-F., Catala, C., Wade, G.A., et al., 1999, *A&AS*, 134, 149, ``A dedicated polarimeter for the MuSiCoS echelle spectrograph''
- Fressin, F., et al., 2005, in *Dome C Astronomy/Astrophysics Meeting*, EDP Sciences, EAS Publications Series, Vol. 14, 133
- Mayor, M., Pepe, F., Queloz, D., Bouchy, F., et al. 2003, *Messenger*, 114, 20 ``*Setting New Standards with HARPS*''
- Mosser, B., Maillard, J.P., Mekarnia, D., Gay, J., 1998, *A&A*, 340, 457, ``New limit on the p-mode oscillations of Procyon obtained by Fourier transform seismometry''
- Mosser, B.; Maillard, J. P.; Bouchy, F., 2003, *PASP*, 115, 990 ``Photon noise limited Doppler asteroseismology with a Fourier transform seismometer : I. Fundamental performances''
- Mosser, B., Bouchy, F., Catala, C., et al., 2005, *A&A*, 431, L13 ``Seismology and activity of the F type star HD49933''
- Mosser, B.; Maillard, J. P., 2005, in *Dome C Astronomy/Astrophysics Meeting*, EDP Sciences, EAS Publications Series, Vol. 14, 133 ``SIAMOIS : a Doppler asteroseismometer for Dome C''
- Schmider, F.X., Gay, J., Jacob, C., et al., 2003, in *Asteroseismology across the HR diagram*, Porto, Portugal, 1-5 July 2002, Eds M.J. Thompson, M.S. Cunha, M.J. Monteiro, *Ap&SS*, 248, 449 ``SYMPA: a dedicated instrument and a network for seismology of giant planets''
- Schmider, F.X., Gay, J., Jacob, C., et al., 2002, in *SF2A-2002*, meeting held in Paris, France, 24-29 June 2002, Eds F. Combes & D. Barret, EDP-Sciences Conf. Series, 611 ``SYMPA: a specified instrument and a dedicated network for giant planets' seismology''