

# DES JETS MAGNÉTIQUES

Jonathan FERREIRA, Catherine DOUGADOS et Sylvie CABRIT

## La focalisation des jets présents à toutes les étapes de la formation des étoiles résulte du confinement magnétique.

**D**ans les années 1970, les astronomes observent des jets dans des objets lointains. Ces jets fins s'étendent sur des centaines de milliers d'années-lumière, certains sont même plus longs que le diamètre de notre Voie lactée! Dans un environnement aussi ténu que le milieu intergalactique, la pression ne peut maintenir les jets aussi minces. Comment des jets aussi fins persistent-ils sur ces distances fantastiques? Grâce au confinement de leur propre champ magnétique.

En 1976, des théoriciens proposèrent que les jets extragalactiques sont créés par un disque de matière chaude situé autour d'un trou noir. Puis, en 1982, on montra la faisabilité du mécanisme de jet magnétisé. Aussi, lorsque les jets des jeunes étoiles en formation ont été découverts, les astrophysiciens firent naturellement appel à des idées analogues.

Aujourd'hui, les modèles de ces microjets mettent en jeu la partie interne du disque (moins d'une unité astronomique de l'objet central), voire même une interaction entre le disque et la magnétosphère de la protoétoile. Malheureusement, cette région autour de la protoétoile reste pour le moment hors de portée des instruments (*voir l'encadré*). Aussi, des modèles élaborés, nommés «structures magnétiques d'accrétion-éjection» (SMAE), expliquent l'éjection de matière, mais sans doute dans un cadre trop simpliste. Ce faisant, les théoriciens ouvrent un champ d'investigation aux observateurs.

### L'organisation du champ magnétique

Le champ magnétique assure l'équilibre des nuages moléculaires dont sont issues les étoiles. Tant que ce champ reste couplé à la matière, il offre une pression supplémentaire qui s'oppose à l'effondrement. Lors de l'effondrement, la «quantité de rotation» (ou moment cinétique) du nuage est en grande partie conservée et, au

cours de sa chute, le gaz acquiert un mouvement de rotation de plus en plus rapide. Lorsque la force centrifuge compense l'attraction gravitationnelle, la matière ne tombe plus et se trouve, à l'instar de la Terre autour du Soleil, en orbite stable (dite keplerienne) autour de l'objet central. L'étape finale de l'effondrement est un disque avec un objet central dense, la protoétoile, première ébauche d'étoile.

Les nuages moléculaires parents sont suffisamment ténus pour que les rayons cosmiques y pénètrent et ionisent partiellement le gaz, de sorte que la matière et le champ magnétique sont couplés (les particules chargées sont forcées de suivre le champ magnétique). Ainsi, lorsque le nuage s'effondre, le champ magnétique est en partie entraîné par le gaz. Cet entraînement concentre les lignes de champ : la densité d'énergie magnétique augmente.

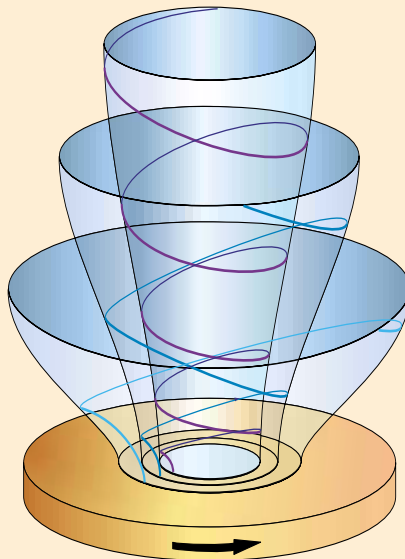
Toutefois, nous ignorons l'ampleur de ce phénomène, car la manière dont le

champ est entraîné par la matière dépend de l'ionisation de cette dernière : plus la matière est ionisée, plus elle est liée au champ magnétique. Pour savoir de combien le champ magnétique est amplifié, il faudrait suivre précisément l'évolution du couplage entre le gaz et le champ magnétique lors de l'effondrement, ce qu'aucun ordinateur ne peut encore faire. En revanche, dans les régions proches de la protoétoile, c'est-à-dire jusqu'à une distance d'une unité astronomique, on estime que la fraction de matière ionisée (donc chargée électriquement) est suffisamment élevée pour maintenir un très bon couplage entre les particules et le champ magnétique. L'ionisation résulterait en partie de l'intense rayonnement X qui est aujourd'hui observé autour des protoétoiles.

Quelle est l'organisation du champ magnétique dans ces régions? Pour jouer le rôle attendu, c'est-à-dire contenir les flots de matière, le champ doit être dipolaire, comme le champ d'un barreau aimanté. Or, si cette hypothèse facilite le traitement, nous ignorons si elle est justifiée, notamment près de l'étoile, où le disque lui-même pourrait créer un champ magnétique par effet dynamo. Le théoricien retient alors cette hypothèse simplificatrice (champ dipolaire), tout en restant conscient que la topologie réelle du champ dans le disque peut être beaucoup plus complexe. Dans ce cadre, nous pouvons nous attaquer à la question brûlante : par quels mécanismes peut-on expliquer la formation des jets?

Les mécanismes d'éjection sont fondés sur le même principe que les freins électromagnétiques utilisés dans les poids lourds ou dans le TGV : l'induction électromagnétique. Lorsqu'un conducteur électrique se déplace dans un champ magnétique, il est soumis à une force qui s'oppose à son mouvement et ce, d'autant plus efficacement que le mouvement est rapide. L'induction électromagnétique a été mise en évidence de manière spectaculaire par Peter Barlow. Un disque d'accrétion qui émet des jets est la version astrophysique de la roue de Barlow, un montage de physique.

Le «moteur» qui entraîne la rotation du disque est l'attraction gravitationnelle de la protoétoile centrale. Comme l'énergie contenue dans le champ magnétique est de quelques pour cent seulement de l'énergie de la rotation, le disque entraîne le champ magnétique et le torsade. En retour, le champ résiste à cette torsion et exerce une force qui freine le disque. La matière du disque, freinée,



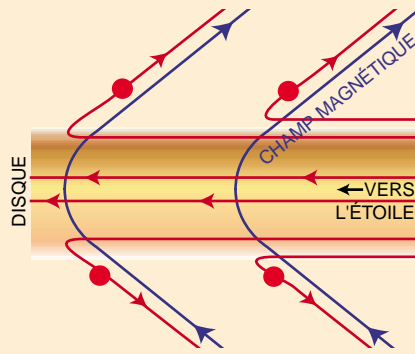
**1. Surfaces magnétiques ancrées sur le disque d'accrétion à différents rayons. Le champ augmente en intensité vers l'intérieur et les lignes de champ sont entraînées par la rotation du disque.**

perd une partie de son moment cinétique, donc de son support contre l'attraction de la protoétoile, et elle tombe alors en suivant une trajectoire en forme de spirale : c'est l'accrétion.

Si le disque était un conducteur parfait, le champ serait complètement «gelé» dans la matière et serait entraîné jusqu'à ce que la densité d'énergie magnétique devienne infinie. Comme ce résultat est impossible, les astrophysiciens imaginent que, très rapidement, en moins d'un tour complet du champ autour de l'astre, une instabilité liée au champ se déclenche dans le disque. Cette instabilité crée de la turbulence qui permet au champ de «diffuser» par rapport à la matière. Pourquoi cette turbulence magnétohydrodynamique se déclenche-t-elle? C'est l'un des grands problèmes théoriques de la physique. Quoi qu'il en soit, elle permet l'établissement d'un régime stationnaire où la diffusion de la matière à travers le champ équilibre l'effet d'entraînement de ce dernier. Notre représentation d'une structure magnétique d'accrétion-éjection est alors une configuration magnétique stationnaire avec des lignes modérément enroulées qui tournent à la vitesse de rotation du disque (voir la figure 1).

## L'éjection

La conversion d'énergie mécanique en énergie magnétique crée un flux d'énergie qui alimente le jet. Il suffit d'y déposer de la matière et elle sera immédiatement accélérée. C'est dans les couches superficielles



**2. Coupe longitudinale du disque. À la surface du disque, le gaz est chaud, ce qui pousse vers le haut les couches superficielles de matière (disques rouges) qui suivent les lignes de champ magnétique.**

peu denses de l'atmosphère du disque que s'opère ce «chargement» en masse des jets.

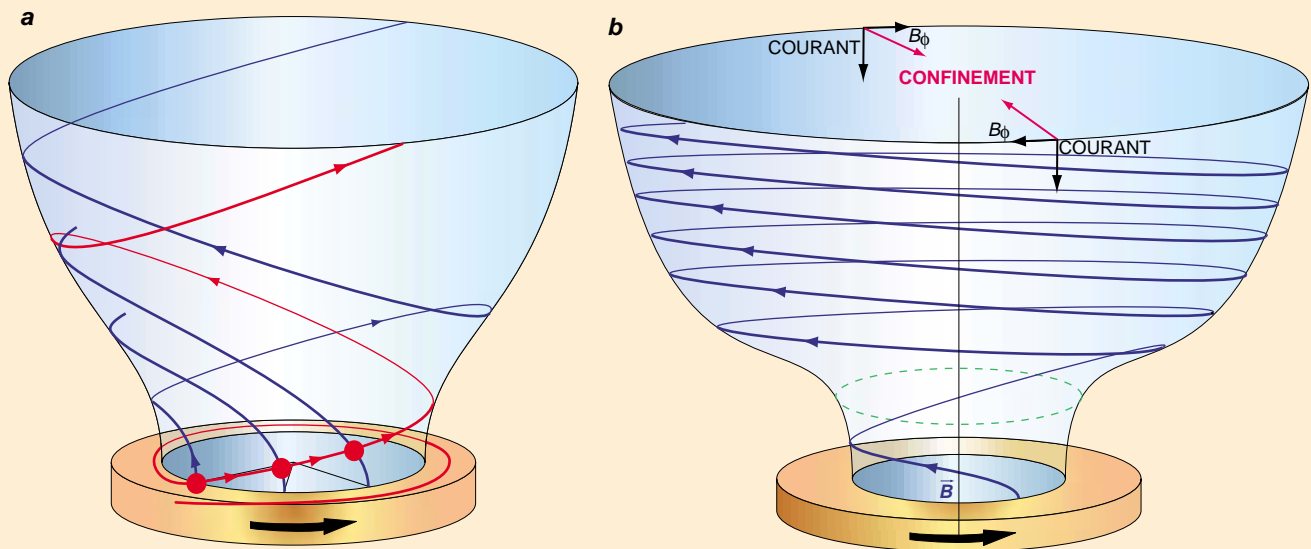
Si l'on fait une coupe longitudinale du disque, on s'aperçoit que celui-ci est presque à l'équilibre radialement entre attraction gravitationnelle et force centrifuge d'une part, et, verticalement, entre compressions magnétique et gravitationnelle d'autre part. La matière possède néanmoins un faible mouvement d'accrétion qui courbe les lignes de champ magnétique (voir la figure 2). La turbulence, qui permet à la matière de traverser ces lignes de champ, n'est cependant maintenue que dans le disque et devient pratiquement inexistante à sa surface. Aussi, lorsque du gaz provenant d'une région externe arrive en un rayon donné à la surface du disque, il n'y a

plus de diffusion et il reste «gelé» dans le champ. Or, celui-ci est ancré à un rayon plus interne que le gaz et donc en rotation plus rapide que lui! Du coup, au lieu de freiner la matière, le champ magnétique accélère le gaz à la surface du disque.

Par ailleurs, la compression verticale exercée par le champ sur le disque diminue dans ces couches supérieures. Il n'en faut pas moins à la pression thermique du gaz pour soulever la matière et permettre ainsi aux couches superficielles d'échapper au mouvement global d'accrétion : un jet est né.

Soufflée hors du disque avec une vitesse verticale très faible et une vitesse tangentielle élevée, la matière accélère rapidement à plusieurs milliers de kilomètres par seconde (jusqu'à dix fois la vitesse de rotation du disque), grâce à la conversion de l'énergie magnétique fournie par le disque. La trajectoire suivie par le gaz est alors plus ou moins hélicoïdale autour de l'axe de rotation du disque. Le champ magnétique, quant à lui, résiste à la rotation que lui impose le disque : il a donc également une forme hélicoïdale, mais de sens contraire.

Cette rotation inverse semble impossible, car la matière devrait suivre les lignes de champ (le champ est gelé dans la matière). Toutefois, comme les lignes de champ tournent plus rapidement que la matière éjectée, on s'aperçoit que la matière reste toujours accrochée à une ligne de champ le long de laquelle elle monte en sens inverse de l'enroulement du champ (voir la figure 3a).



**3. Soufflée hors du disque, la matière est ensuite accélérée par le champ magnétique. Le champ étant entraîné par la rotation du disque (le pied des lignes de champ sont ancrées dans le disque), la matière (en rouge) monte en sens inverse de l'enroulement du champ, comme une perle enfilée sur un fil (a). Au-delà d'une altitude limite, la «tuyère magné-**

**tique» s'évase (b), de sorte que les lignes de champ s'enroulent davantage (la matière tourne plus lentement que le champ). Le champ tangentiel  $B_\phi$  augmente et il se crée une force de Laplace qui maintient le jet cylindrique (en raison de la rotation du disque conducteur dans le champ magnétique).**

## MICROJETS : L'ÉPREUVE DES FAITS

Les éjections de matière les plus spectaculaires se rencontrent alors que la future étoile est encore au berceau, pudiquement enfouie dans un cocon de gaz et de poussière qui absorbe la majorité du rayonnement de la proto-étoile a des longueurs d'onde inférieures au micromètre. Ainsi, pour les plus jeunes étoiles en gestation connues, à peine âgées de 10 000 ans, nous observons le rayonnement dans le domaine submillimétrique.

Dans cette phase initiale de leur vie, les étoiles perdent de la masse sous forme de flots de gaz moléculaire qui s'étendent sur quelques dixièmes d'années-lumière. Ces flots sont détectés principalement grâce à l'émission radio de la molécule de monoxyde de carbone (voir *La structure des nuages*, par Françoise Combes, dans ce dossier). La partie rapide de ces flots est fortement focalisée. Elle est entourée d'une coquille de matière plus lente qui est de la matière ambiante repoussée sur les côtés par la tête du jet; on nomme ce genre de structure un choc d'étrave, par analogie avec la proue d'un navire qui fend l'eau.

Alors que l'enveloppe se dissipe, le proche environnement de la protoétoile devient progressivement transparent aux longueurs d'onde infrarouges. La jeune étoile est alors âgée de 100 000 ans. À cette époque apparaissent des jets de gaz atomique qui rayonnent dans le visible grâce à l'émission de raies «interdites» d'atomes faiblement ionisés, également observées dans le milieu ténu des aurores boréales terrestres.

Ces jets de Herbig-Haro, (voir *Fontaines de jeunesse*, par Thomas Ray, dans ce dossier) sont plus focalisés et plus rapides que les jets moléculaires de la phase antérieure (plusieurs centaines de kilomètres par seconde); ils s'étendent sur plusieurs années-lumière, la distance typique entre deux étoiles de notre Galaxie. L'une des caractéristiques des jets de Herbig-Haro est leur structure spatiale très hétérogène: l'émission est dominée par des nœuds, chocs internes qui résulteraient de la variabilité du mécanisme d'éjection (voir *la figure*). Par exemple, si la vitesse d'éjection du gaz est

modulée avec le temps, une surface de choc sera engendrée dans le corps du jet lorsque du gaz rapide rattrape le gaz plus lent éjecté précédemment. La conversion d'énergie cinétique en énergie thermique dans ces chocs maintiendrait les hautes températures observées.

Lorsque la jeune étoile quitte enfin son berceau, vers l'âge d'un million d'années, l'enveloppe qui l'entoure est désormais si ténue que l'étoile apparaît dans le visible: c'est une étoile T Tauri.

Depuis 1987, les astronomes ont montré l'existence de jets miniatures autour des étoiles T Tauri. La partie brillante de ces jets s'étend à peine sur quelques centaines d'unités astronomiques, ce qui leur a valu le surnom de microjets. Entourées d'un disque d'accrétion aux paramètres relativement bien déterminés, les étoiles T Tauri ont permis la première étude quantitative de la filiation entre accrétion et éjection. Par exemple, les astronomes ont trouvé que le débit massique de matière transporté par le disque était proportionnel au débit de matière éjecté.

Quelles sont les échelles d'accélération et de focalisation du gaz? Le vent prend-il sa source à la surface de l'étoile, du disque ou d'une région d'interaction entre les deux? Comment les caractéristiques observées des jets se comparent-elles aux prédictions des modèles? Comme les étoiles T Tauri ont évacué la majorité de leur nuage parent, donnant directement accès aux régions internes du vent, l'étude des microjets autour des étoiles T Tauri nous a permis de progresser sur ces questions.

L'observateur est toutefois confronté à une difficulté de taille: l'étoile centrale est 10 000 fois plus lumineuse que l'émission dans les jets et masque donc cette dernière. Pour circonvenir cette difficulté, on utilise la spectroscopie (qui permet d'isoler les raies interdites atomiques émises par le jet du spectre continu émis par l'étoile) et des techniques d'imagerie à haute résolution spatiale (qui concentrent la lumière éblouissante de l'étoile dans une plus petite zone) et, depuis quelques années, une combinaison des deux techniques, la spectro-imagerie à haute résolution spatiale, sur le télescope CFH à Hawaï et sur le télescope spatial *Hubble*.

Ainsi, l'utilisation de ces méthodes de l'espace ou du sol a fourni de nouvelles informations sur la structure des microjets. Leur morphologie rappelle à s'y méprendre celle des jets Herbig-Haro observés autour d'étoiles plus jeunes, avec la présence de nœuds d'émission en forme de choc d'étrave (voir *la figure*). Ensuite, les études en spectro-imagerie ont confirmé que le mécanisme de chauffage dans ces zones est entièrement dominé par des chocs. Ces chocs résultent vraisemblablement d'une variabilité de la vitesse d'éjection dont l'échelle, déduite de l'espacement des nœuds, est d'environ dix ans. Cette durée, bien supérieure à la période orbitale des parties internes du disque d'où provient le jet, évoque un cycle magnétique, analogue au cycle solaire. Cependant, aucune indication d'un tel cycle n'a encore été trouvée dans les étoiles T Tauri.

Par ailleurs, sur les images à haute résolution, les microjets apparaissent focalisés dès que l'on se trouve à plus de 50 unités astronomiques de la source, avec un diamètre apparent de 30 unités astronomiques. Ces échelles sont en accord avec les prédictions des modèles de jets magnétiques. Toutefois, la discrimination entre les modèles requiert une étude approfondie de ces 50 unités astronomiques centrales, principal lieu des mécanismes de focalisation et d'accélération du jet. À la limite de résolution pour les instruments actuels, ces régions seront accessibles grâce à l'instrumentation de seconde génération prévue pour le VLT.



**Un jet de Herbig-Haro à grande échelle issu d'une source infrarouge très jeune (en haut) et un microjet émis par une étoile T Tauri (en bas). Tous deux ont des nœuds de forme arquée, vraisemblablement des chocs d'étrave où une éruption rapide rattrape du gaz plus lent.**

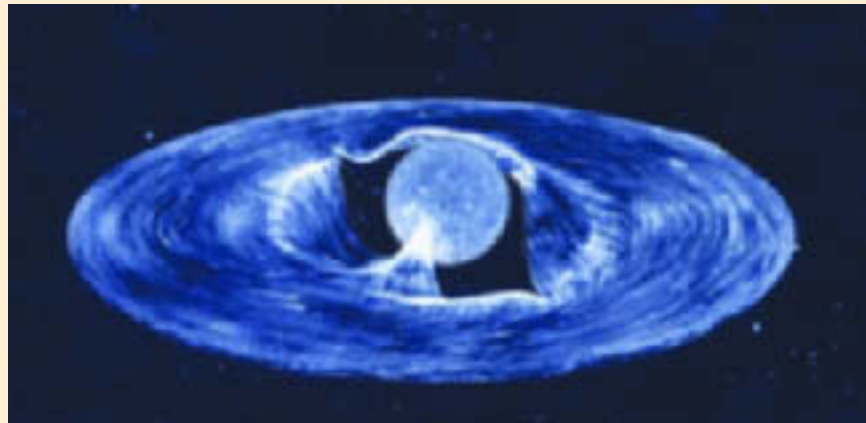
La matière monte donc le long des lignes de champ issues d'un même anneau du disque, une «tuyère magnétique». Au-delà d'une certaine altitude au-dessus du disque, la force centrifuge de la matière, toujours en rotation, dépasse la résistance de la tuyère magnétique : celle-ci se déforme brusquement et s'évase.

Le gel entre matière et champ se maintenant, la ligne de champ s'étire et le pas de l'hélice magnétique diminue, de sorte que le champ magnétique se comprime : la composante tangentielle du champ magnétique devient donc la composante dominante (voir la figure 3b). Ceci a une conséquence immédiate : le champ magnétique résiste à cette ouverture due au déplacement de matière en engendrant une force dirigée vers l'axe. C'est cette force magnétique, intrinsèque au jet, qui le confine et qui explique le haut degré de focalisation des jets observés.

## Vers la protoétoile

S'il explique l'éjection de matière, le modèle présenté ne traite pas de la manière dont le disque ou le jet sont reliés à la protoétoile. Dans les années 1980, on imaginait que le disque se prolongeait tout simplement jusqu'à la surface de la jeune étoile qu'elle rencontrait dans une couche limite (voir la figure 4). Durant toute la phase d'accrétion, la protoétoile continue à se contracter lentement et, à moins d'un freinage extérieur, sa vitesse de rotation sur elle-même ne cesse d'augmenter. De plus, la partie interne du disque tourne plus rapidement que la protoétoile : cette interaction ne peut donc que l'accélérer. Or, lorsque la protoétoile sort enfin de son cocon sous l'apparence d'une T Tauri, elle tourne sur elle-même environ dix fois plus lentement que prévu. Il y a donc eu, lors de ces phases enfouies, cachées à notre regard, un mécanisme qui a freiné la protoétoile et non pas une couche limite qui l'aurait accélérée.

Ce freinage s'explique, dans ses grandes lignes, par une idée relativement simple. Imaginons que la protoétoile possède une magnétosphère du type de celle qui existe sur Terre, c'est-à-dire un dipôle. Ce champ magnétosphérique pénètre dans le disque et peut, s'il est suffisamment intense, obliger la matière à quitter le plan du disque et à le suivre, formant ainsi de véritables rideaux d'accrétion (voir la figure 4). La matière, en tombant sur la protoétoile à des lati-



**4. Les astronomes pensaient que le disque était relié à l'étoile par l'intermédiaire d'une couche limite visqueuse (en haut), mais cette couche devrait accélérer l'étoile, ce que l'on n'observe pas. La liaison se fait vraisemblablement par l'intermédiaire de la magnétosphère de l'étoile. Dans ce cas, la matière suit les lignes de champ de la magnétosphère et forme des «rideaux d'accrétion» (en bas).**

tudes élevées, produirait alors un choc responsable du rayonnement ultraviolet.

Si l'intensité de ce champ est très élevée, le rayon de troncation du disque (la magnétopause) se trouve loin de la surface de la protoétoile, dans une région du disque qui tourne plus lentement que cette dernière. La protoétoile serait alors freinée par ce contact avec le disque, par l'intermédiaire d'une magnétosphère puissante. Toutefois, si la protoétoile est freinée, cela signifie que la matière du disque en contact avec la magnétosphère est, elle, accélérée. Au point qu'elle pourrait être non pas accrétée, mais excrétée! Pour que l'accrétion vers la protoétoile continue, il faut évacuer l'énorme «quantité de rotation» déposée par la protoétoile dans le disque.

Plusieurs modèles montrent qu'un vent émis par le disque pourrait évacuer ce moment cinétique excédentaire.

Seule la prise en compte de l'interaction avec la protoétoile permet une description complète et cohérente des mécanismes interdépendants d'accrétion et d'éjection. Pourtant les différents scénarios proposés se fondent sur les mêmes incon-

nues : effet dynamo de la protoétoile, couplage matière-champ et turbulence magnétohydrodynamique dans le disque. D'un point de vue théorique, ces sujets nécessitent des travaux de fond et, du point de vue des simulations, nous n'en sommes qu'aux balbutiements.

Certes, les contraintes observationnelles existent, mais dès qu'elles deviennent complexes (comme des profils de raies, par exemple) nous sommes incapables de les interpréter correctement sans l'aide d'un modèle. La démarche actuelle consiste alors à calculer les signatures observationnelles que produiraient un modèle de jet précis et à les comparer aux observations. Un tel travail met ainsi en étroite collaboration théoriciens et observateurs, mobilisés vers ces deux buts complémentaires : connaître l'histoire de la formation d'une étoile et comprendre les processus physiques à l'œuvre, inaccessibles à l'expérience sur Terre.

*J. FERREIRA travaille à l'Observatoire de Grenoble, C. DOUGADOS au CFH, à Hawaii. et S. CABRIT à l'Observatoire de Paris.*