



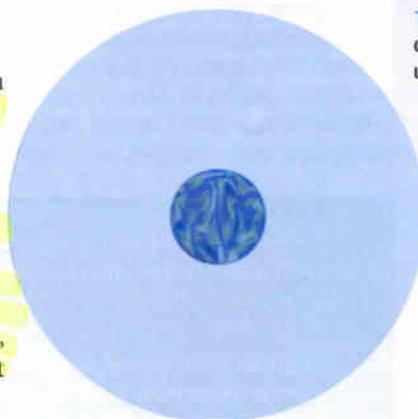
ÉTOILES ET GALAXIES

La structure à l'intérieur des étoiles est très différente selon que l'étoile est froide (de type spectral F, G, K), c'est-à-dire petite et jaune ou orange, ou chaude (type spectral O, B, A), c'est-à-dire grosse et bleue.

LES CHAMPS MAGNETIQUES DES ÉTOILES CHAUDES

STRUCTURE GLOBALE DES ÉTOILES

Les étoiles froides ont un cœur radiatif, où l'énergie se transmet de couche en couche par rayonnement, et une enveloppe externe convective, où l'énergie se transmet par des mouvements de la matière (comme dans une casserole d'eau bouillante par exemple). Les étoiles les plus froides (de type M), c'est-à-dire très petites et rouges, sont entièrement convectives. Au contraire des étoiles froides, les étoiles chaudes ont un cœur convectif et une enveloppe externe radiative (figure 1).



O, B, A



F, G, K

1. Schéma de la structure des étoiles chaudes (O, B, A), avec un cœur convectif et une enveloppe radiative, des étoiles froides (F, G, K), avec un cœur radiatif et une enveloppe convective, et des étoiles les plus froides (M), complètement convectives.



L'ESSENTIEL

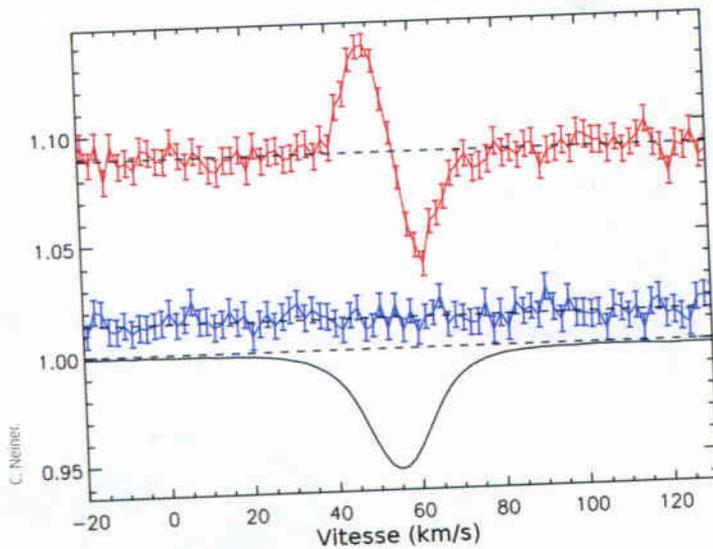
La structure interne et, par conséquent, le magnétisme des étoiles sont très différents selon leur température. Le champ magnétique des étoiles dites « froides », comme le Soleil, est créé par le mouvement du gaz dans la zone convective sous la surface de l'étoile. On a longtemps cru que les étoiles chaudes n'avaient pas de champ magnétique car leur zone convective est au cœur de l'étoile. Il a fallu attendre les années 1950 pour que les études par spectropolarimétrie montrent qu'environ 10 % d'entre elles possèdent bien un champ magnétique mais de nature très différente de celui des étoiles froides. Il s'agit d'un champ magnétique fossile provenant du nuage de matière à partir duquel l'étoile s'est formée. L'article s'attache à décrire les principales caractéristiques du champ magnétique des étoiles, qui reste encore bien mystérieux malgré les progrès récents tant théoriques qu'observationnels.

La plupart des étoiles froides, telles que notre Soleil, ont un champ magnétique continuellement généré par le mouvement du gaz dans son enveloppe convective. C'est ce qu'on appelle une dynamo magnétique. Puisque les étoiles chaudes n'ont pas d'enveloppe convective, mais une enveloppe radiative, elles ne peuvent pas développer une dynamo magnétique comme les étoiles froides. En revanche, elles ont un cœur convectif où

une dynamo pourrait se développer, mais le champ magnétique produit mettrait plus de temps pour rejoindre la surface de l'étoile que toute sa durée de vie. Par conséquent, même si un tel champ dynamo produit dans le cœur existe, il ne peut pas être détecté à la surface des étoiles chaudes. **Il a donc longtemps été supposé que ces dernières n'étaient pas magnétiques.**

DÉCOUVERTE DES PREMIÈRES ÉTOILES MAGNÉTIQUES

Il n'est pas possible d'envoyer une sonde sur ou près d'une étoile, autre que notre Soleil, pour mesurer son champ magnétique. Heureusement, les étoiles nous font parvenir beaucoup d'informations via la lumière qu'elles nous envoient : la quantité de lumière envoyée, sa couleur, ses variations, son spectre et sa polarisation sont autant d'indices qui nous permettent d'étudier



2. Signature polarimétrique de la présence d'un champ magnétique dans l'étoile chaude HD 63425 (en haut en rouge) ou absence de signature pour une étoile non magnétique (au milieu en bleu), mesurées dans une raie du spectre (en bas en noir).

les étoiles à distance. La mesure du champ magnétique se fait en observant les deux derniers éléments, le spectre et la polarisation de la lumière, grâce à des spectropolarimètres. En effet, un champ magnétique modifie le spectre et la polarisation de la lumière stellaire (figure 2 ; lire l'encadré). C'est ce qu'on appelle l'effet Zeeman [1].

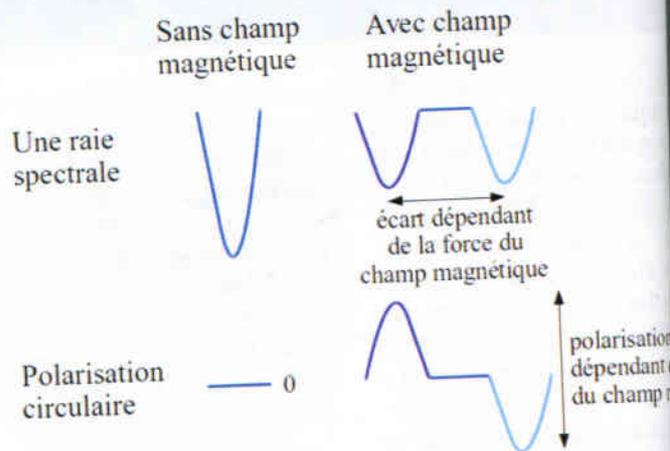


Dans les années 1950, les premières étoiles tièdes (spectral A) magnétiques ont été découvertes par spectropolarimétrie. Ces étoiles étaient très particulières car elles présentaient des anomalies d'abondances chimiques en surface, rapidement attribuées à la présence d'un champ magnétique. Une nouvelle classe d'étoiles magnétiques a donc été découverte : les étoiles Ap (où le « p » signifie qu'elles ont des particularités chimiques). Puisque les étoiles tièdes n'ont pas d'enveloppe convective, comment un champ magnétique est-il produit ? Et, si les étoiles tièdes ont un champ magnétique, se pourrait-il que les étoiles plus chaudes (O et B) puissent également en avoir ? Il faudra attendre les années 1970 pour que le premier spectropolarimètre stellaire à haute

3. Observatoire du Pic du Midi dans les Pyrénées françaises. À gauche, le télescope Bernard-Lyot. (© Pic du Midi)

L'effet Zeeman

Les étoiles émettent plus ou moins de lumière de chaque longueur d'onde. Les longueurs d'onde absorbées par leur atmosphère, les raies spectrales, dépendent de la composition chimique de l'étoile. En présence d'un champ magnétique, chacune de ces raies spectrales est divisée en plusieurs raies de longueur d'onde très proches. C'est l'effet Zeeman. L'écart entre ces nouvelles raies dépend de la force du champ magnétique : plus le champ est fort, plus les raies sont écartées. De plus, la lumière de chacune de ces nouvelles raies a une certaine polarisation. C'est en mesurant cette polarisation avec un spectropolarimètre qu'on détecte la présence d'un champ magnétique.



tion, Musicos, installé sur le télescope Bernard-Lyot (TBL)[2] de l'observatoire du Pic du Midi, en France (figure 3), permette de détecter les toutes premières étoiles chaudes magnétiques.

Une centaine d'étoiles chaudes (O et B) magnétiques ont pu être découvertes grâce à la nouvelle génération de spectropolarimètres construite dix ans plus tard : ESPaDOs au télescope Canada-France-Hawaï (CFHT) sur le volcan Mauna Kea à Hawaï (figure 4), Narval qui a remplacé Musicos au TBL du Pic du Midi, et HarpsPol installé à La Silla, dans le désert d'Atacama au Chili. Enfin, il faut signaler le grand programme observationnel franco-canadien, nommé MiMeS (Magnetism in Massive Stars) exécuté entre 2008 et 2012 avec ces trois instruments.

D'OU VIENT LE CHAMP MAGNÉTIQUE DES ÉTOILES CHAUDES ?

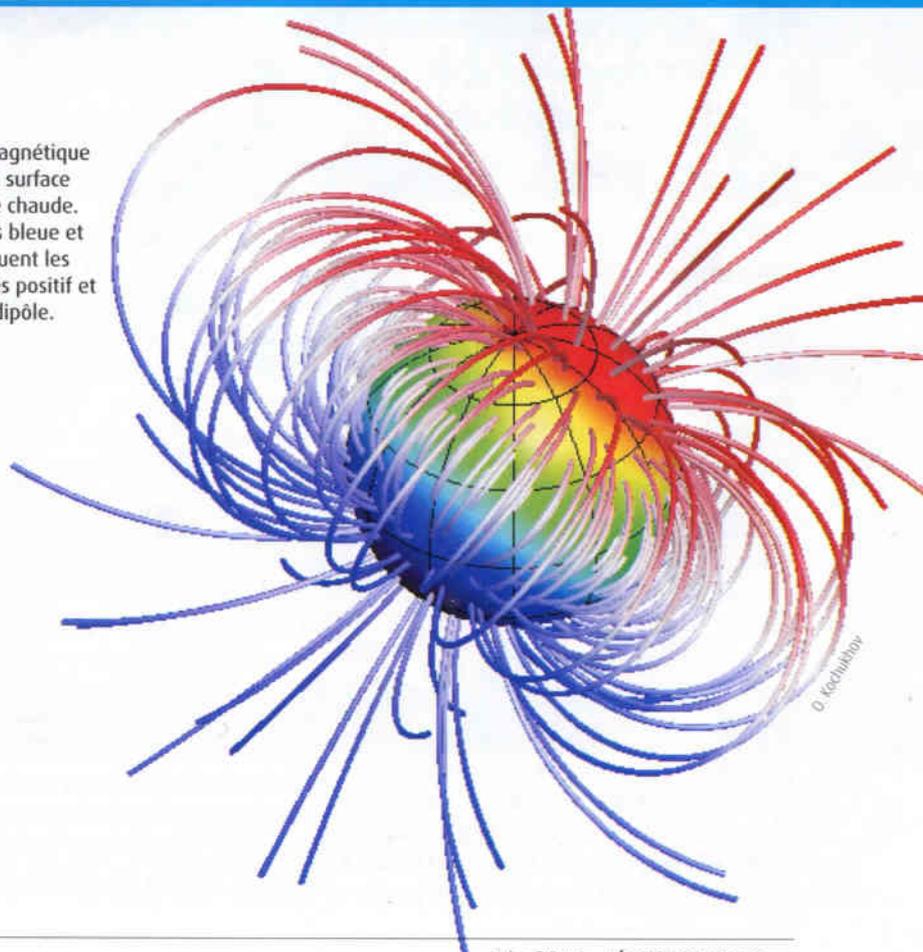
Le champ magnétique des étoiles chaudes est bien différent de celui des étoiles froides. Alors que, pour ces dernières, les champs produits par dynamo ont une structure complexe, subissent des cycles de variations, sont globalement très faibles (de l'ordre de quelques gauss à la surface de l'étoile) mais peuvent être localement forts (plusieurs milliers de gauss dans les taches du Soleil par exemple), les champs magnétiques des étoiles chaudes sont forts, stables et simples. En effet, en ré-observant régulièrement les mêmes étoiles, on a constaté que les étoiles chaudes magnétiques, y compris les étoiles Ap découvertes dès les années 1950, présentent toujours exactement le même champ magnétique au cours du temps. De plus, dans la grande majorité des cas, l'étoile a deux pôles magnétiques, positif et négatif, placés de chaque côté de l'étoile. Ces champs magnétiques sont beaucoup plus forts que ceux des étoiles froides : aux pôles, le champ peut aller d'environ 300 gauss à plus de 30 000 gauss. Par contre, l'axe magnétique, qui relie virtuellement ces deux pôles magnétiques, n'est pas le même que l'axe autour duquel l'étoile tourne sur elle-même. C'est pourquoi on parle de dipôle magnétique oblique (figure 5).

4. Télescope CFHT sur le volcan Mauna Kea à Hawaï. (©M3)



Le champ magnétique des étoiles chaudes est bien différent de celui des étoiles froides.

5. Dipôle magnétique oblique à la surface d'une étoile chaude. Les couleurs bleue et rouge indiquent les hémisphères positif et négatif du dipôle.



SE



Les champs magnétiques des étoiles chaudes proviennent du nuage de matière à partir duquel l'étoile s'est formée.

ESA/ATG medialab

Cette configuration, où l'axe magnétique et l'axe de rotation diffèrent, présente un grand avantage pour les observateurs : au fur et à mesure que l'étoile tourne sur elle-même, nous pouvons observer une facette différente de son champ magnétique. Ainsi, nous voyons passer le pôle magnétique positif, puis l'équateur magnétique, le pôle négatif, etc. Et nous pouvons alors reconstruire la carte complète du champ magnétique à la surface de l'étoile.

La stabilité et la simplicité des champs magnétiques des étoiles chaudes sont directement liées à l'origine de ces champs magnétiques : ce sont des **champs fossiles**. Il s'agit du champ magnétique qui était présent dans le nuage de matière à partir duquel l'étoile s'est formée. Lorsque le

nuage moléculaire s'est effondré pour produire une étoile, le **champ magnétique du nuage s'est retrouvé piégé** dans l'étoile. Lors des premières phases de la vie de cette jeune étoile, **l'étoile entière était convective et ce champ magnétique originel a alors pu être amplifié par une dynamo**. Puis l'enveloppe radiative est apparue et le champ magnétique s'est stabilisé dans la configuration dipolaire que nous observons aujourd'hui. L'inclinaison de l'axe magnétique par rapport à l'axe de rotation dépend vraisemblablement de la direction du champ magnétique initial du nuage moléculaire, mais a aussi pu être influencé par l'apparition du cœur convectif au centre de l'étoile. En effet, des simulations ont montré que l'interaction du cœur avec le champ magnétique fossile pouvait modifier l'inclinaison de ce champ.

L'origine fossile du champ des étoiles chaudes a été corroboré bien par des calculs théoriques et des simulations numériques de configurations de champs magnétiques. Les étoiles chaudes très jeunes de la population des étoiles de Herbig présentent les mêmes caractéristiques que les étoiles chaudes « adultes ». Cela prouve que ces champs magnétiques sont présents dès le début de la vie des étoiles chaudes.

POURQUOI LES ÉTOILES CHAUDES N'ONT-ELLES PAS TOUJOURS UN CHAMP MAGNÉTIQUE ?

Alors que la plupart des étoiles chaudes génèrent un champ magnétique, seules environ 10% des étoiles chaudes ont un champ fossile magnétique et d'autres ne possèdent pas semblablement des champs magnétiques de formation de l'étoile. Selon une hypothèse, un autre grand projet d'observationnel franco-allemand, BINA (Binarity and Magnetism in various classes of stars), a entrepris entre 2012 et 2015 d'étudier les champs magnétiques des étoiles chaudes membres de systèmes binaires. Les étoiles binaires sont formées en même temps à partir d'un nuage moléculaire. Elles sont donc dans les mêmes conditions initiales et héritent du même champ magnétique originel. Les études permettent de comparer ces conditions initiales et les processus physiques qui peuvent modifier le champ magnétique fossile. Dans le cadre de BINA, des observations de systèmes binaires contenant une étoile chaude (O, B, A) ont été observés. Alors qu'on s'attendait à ce que les étoiles chaudes seules soient magnétiques et que plusieurs dizaines de systèmes binaires magnétiques auraient donc été découvertes dans cet échantillon, une surprise attendait les scientifiques : aucune de ces étoiles chaudes de systèmes binaires ne se sont avérées magnétiques. Il existe bien sûr des systèmes binaires magnétiques et leur nombre est très inférieur à celui des étoiles chaudes magnétiques seules.

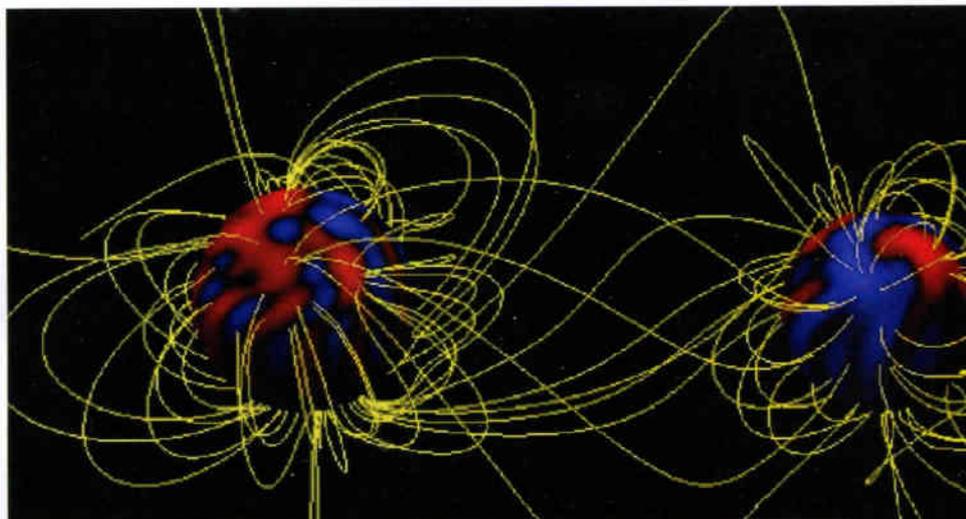
COMMENT EXPLIQUER LA PÉNURIE D'ÉTOILES CHAUDES MAGNÉTIQUES DANS LES SYSTÈMES BINAIRES ?

Une explication pourrait venir de l'origine fossile des champs magnétiques des étoiles chaudes. Des simulations ont montré que lorsque le nuage moléculaire est magnétique, il a beaucoup plus de mal à se fragmenter pour former plusieurs étoiles. Autrement dit, un nuage moléculaire magnétique va plutôt former une étoile magnétique seule, alors que les étoiles binaires vont plutôt se former à partir de nuages moléculaires non magnétiques. Il est donc assez difficile de former des étoiles chaudes binaires magnétiques. Pourtant, quelques exemples existent bel et bien. Ces étoiles chaudes binaires magnétiques se sont peut-être formées à partir d'un nuage moléculaire faiblement magnétique (figure 6). C'est peut-être le cas de l'étoile HD5550 par exemple, qui contient une étoile Ap avec un champ magnétique bien plus faible (de l'ordre de 65 gauss) que les étoiles Ap seules. Elles ont aussi pu être formées par capture, c'est-à-dire qu'elles n'étaient pas des étoiles binaires à leur naissance mais, au cours de leur vie, une étoile orbitant à proximité pour former un système binaire.

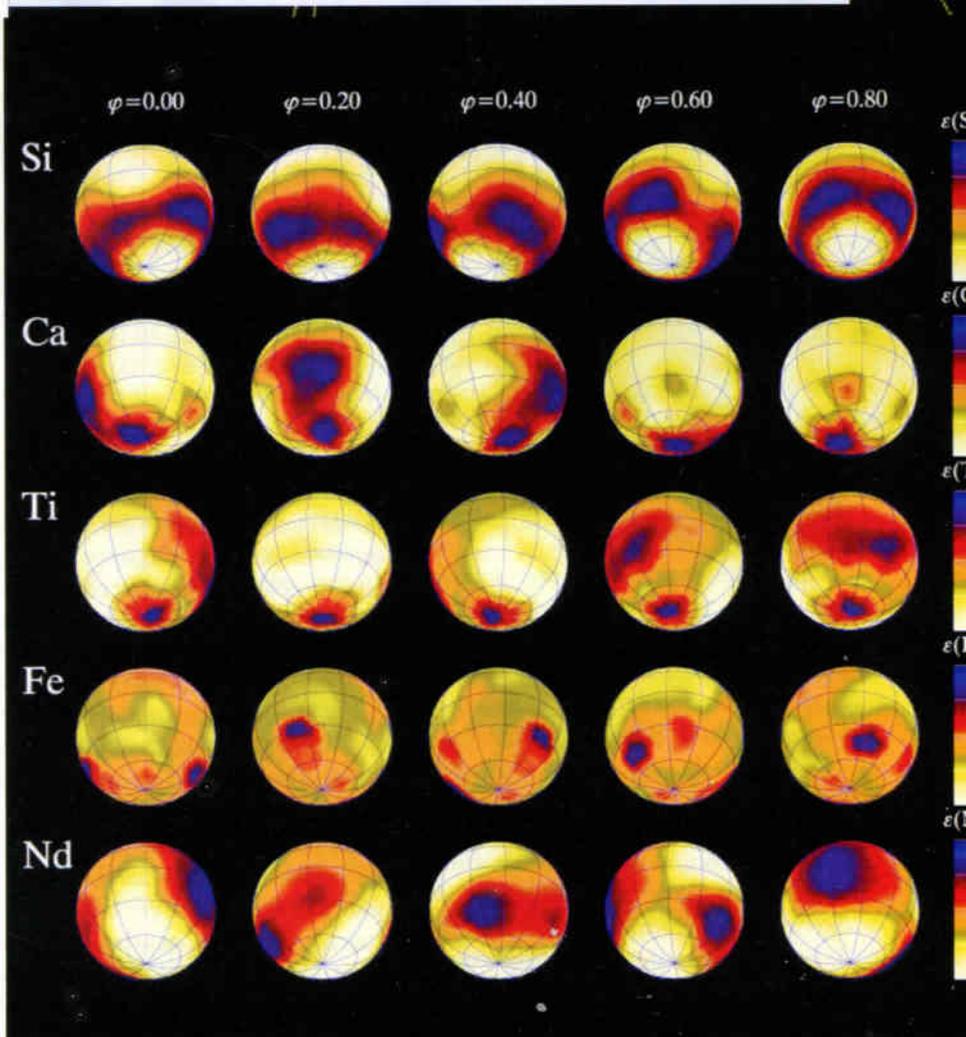
L'IMPACT DU CHAMP MAGNÉTIQUE DANS L'ÉTOILE

La présence d'un champ magnétique dans une étoile chaude, qu'elle soit seule ou binaire, a un impact très important sur l'étoile. D'une part, ce champ agit à l'intérieur de l'étoile. Par exemple, sa présence oblige les éléments chimiques à se déplacer le long des lignes de champ et les empêchent de se mélanger dans toute l'étoile. C'est ainsi que le champ magnétique apporte certains éléments chimiques en surabondance à la surface de l'étoile et crée les particularités chimiques observées, notamment dans les étoiles Ap (figure 7).

D'autre part, le champ magnétique réduit le mélange de la matière à l'interface entre le cœur convectif et l'enveloppe radiative. Grâce à des mesures sismiques d'étoiles magnétiques, il a été possible de confirmer observationnellement que ce mélange interne est très réduit dans les étoiles chaudes magnétiques. Enfin, le champ magnétique rigidifie la rotation, forçant toutes les couches internes de l'étoile à tourner ensemble.



6. Simulation de deux étoiles magnétiques dans un système binaire. Les lignes de champ magnétique des deux étoiles peuvent se reconnecter si les deux étoiles sont suffisamment proches. (S. Gregory)



7. Reconstitution de la distribution de certains éléments chimiques (Si, Ca, Ti, Fe, Nd) à la surface de l'étoile Ap magnétique 53 Cam à 5 phases différentes de la rotation de l'étoile, déduite des mesures spectropolarimétriques. La cartographie complète de la surface de l'étoile est obtenue grâce aux variations du spectre de l'étoile au fur et à mesure qu'on l'observe sous divers angles et montre des zones de la surface où des éléments chimiques sont surabondants. (O. Kochukhov)

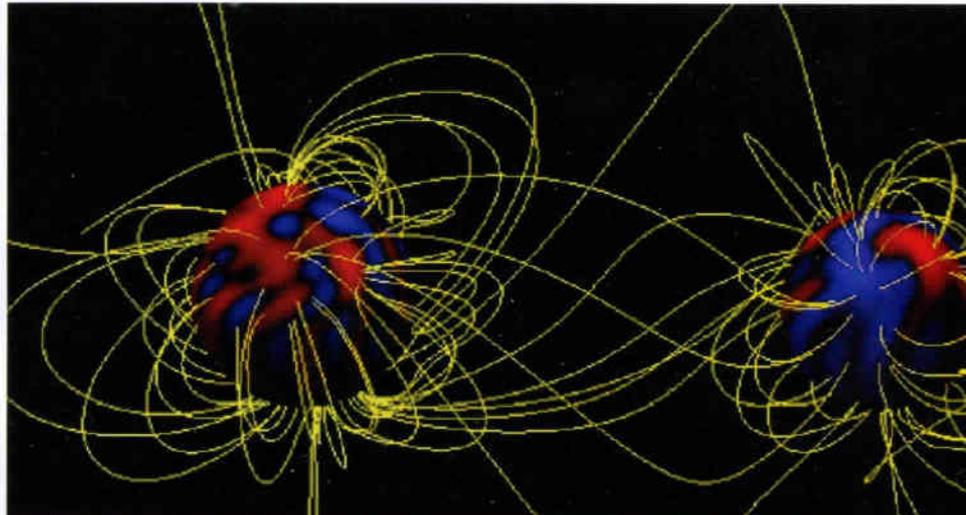
COMMENT EXPLIQUER LA PÉNURIE D'ÉTOILES CHAUDES MAGNÉTIQUES DANS LES SYSTÈMES BINAIRES ?

Une explication pourrait venir de l'origine fossile des champs magnétiques des étoiles chaudes. Des simulations ont montré que lorsque le nuage moléculaire est magnétique, il a beaucoup plus de mal à se fragmenter pour former plusieurs étoiles. Autrement dit, un nuage moléculaire magnétique va plutôt former une étoile magnétique seule, alors que les étoiles binaires vont plutôt se former à partir de nuages moléculaires non magnétiques. Il est donc assez difficile de former des étoiles chaudes binaires magnétiques. Pourtant, quelques exemples existent bel et bien. Ces étoiles chaudes binaires magnétiques se sont peut-être formées à partir d'un nuage moléculaire faiblement magnétique (figure 6). C'est peut-être le cas de l'étoile HD5550 par exemple, qui contient une étoile Ap avec un champ magnétique bien plus faible (de l'ordre de 65 gauss) que les étoiles Ap seules. Elles ont aussi pu être formées par capture, c'est-à-dire qu'elles n'étaient pas des étoiles binaires à leur naissance mais, au cours de leur vie, une étoile magnétique seule a attiré une autre étoile orbitant à proximité pour former un système binaire.

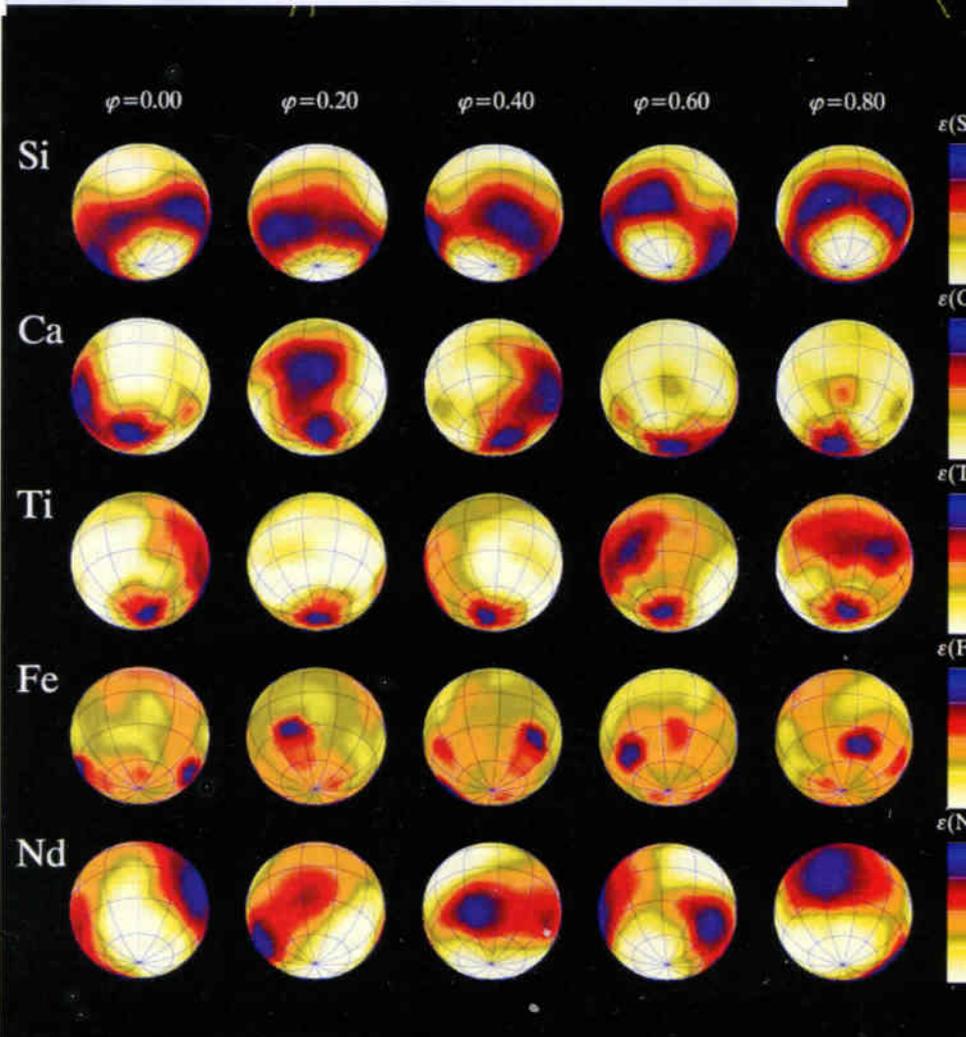
L'IMPACT DU CHAMP MAGNÉTIQUE DANS L'ÉTOILE

La présence d'un champ magnétique dans une étoile chaude, qu'elle soit seule ou binaire, a un impact très important sur l'étoile. D'une part, ce champ agit à l'intérieur de l'étoile. Par exemple, sa présence oblige les éléments chimiques à se déplacer le long des lignes de champ et les empêchent de se mélanger dans toute l'étoile. C'est ainsi que le champ magnétique apporte certains éléments chimiques en surabondance à la surface de l'étoile et crée les particularités chimiques observées, notamment dans les étoiles Ap (figure 7).

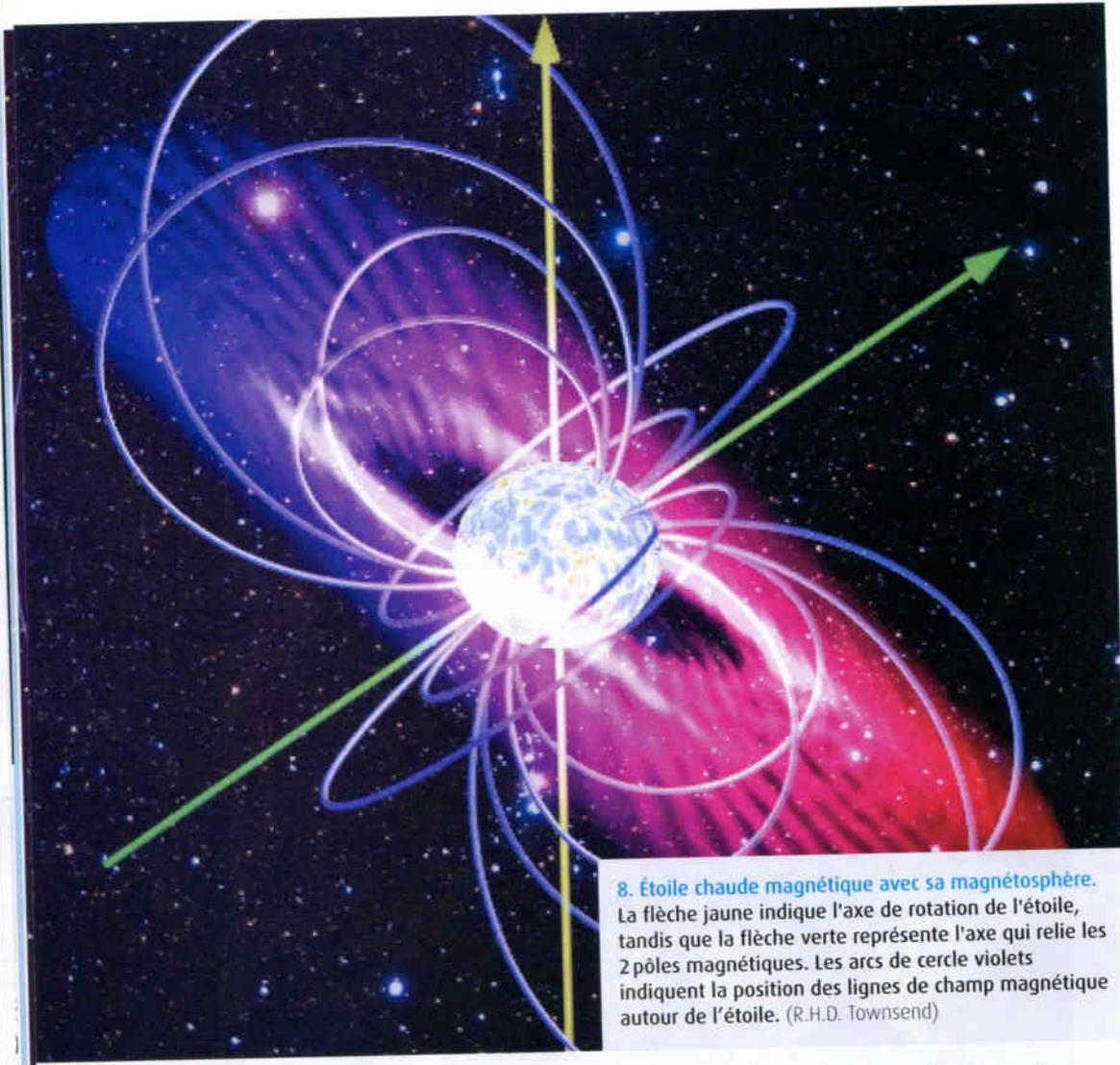
D'autre part, le champ magnétique réduit le mélange de la matière à l'interface entre le cœur convectif et l'enveloppe radiative. Grâce à des mesures sismiques d'étoiles magnétiques, il a été possible de confirmer observationnellement que ce mélange interne est très réduit dans les étoiles chaudes magnétiques. Enfin, le champ magnétique rigidifie la rotation, forçant toutes les couches internes de l'étoile à tourner ensemble.



6. Simulation de deux étoiles magnétiques dans un système binaire. Les lignes de champ magnétique des deux étoiles peuvent se reconnecter si les deux étoiles sont suffisamment proches. (S. Gregory)



7. Reconstitution de la distribution de certains éléments chimiques (Si, Ca, Ti, Fe, Nd) à la surface de l'étoile Ap magnétique 53 Cam à 5 phases différentes de la rotation de l'étoile, déduite des mesures spectropolarimétriques. La cartographie complète de la surface de l'étoile est obtenue grâce aux variations du spectre de l'étoile au fur et à mesure qu'on l'observe sous divers angles et montre des zones de la surface où des éléments chimiques sont surabondants. (O. Kochukhov)



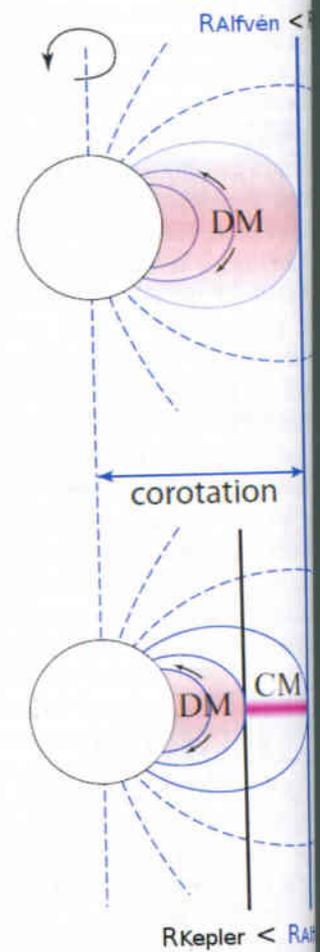
8. Étoile chaude magnétique avec sa magnétosphère. La flèche jaune indique l'axe de rotation de l'étoile, tandis que la flèche verte représente l'axe qui relie les 2 pôles magnétiques. Les arcs de cercle violets indiquent la position des lignes de champ magnétique autour de l'étoile. (R.H.D. Townsend)

L'IMPACT DU CHAMP MAGNÉTIQUE AUTOUR DE L'ÉTOILE

Le champ magnétique d'une étoile influence aussi grandement l'environnement autour de cette étoile. En particulier, dans une étoile chaude, le vent stellaire est beaucoup plus fort que dans une étoile froide. Lorsqu'une étoile chaude est magnétique, les particules du vent stellaire s'échappent de l'étoile par les pôles magnétiques et sont forcées de suivre les lignes de champ autour de l'étoile. Comme le champ des étoiles chaudes est en général dipolaire (un pôle de chaque côté de l'étoile), près de la surface de l'étoile les lignes de champs magnétiques sont des arcs de cercle allant d'un pôle à l'autre. Plus on s'éloigne de l'étoile, plus l'arc de cercle devient grand. Au-delà d'un certain rayon, appelé rayon d'Alfvén [4], les lignes de champ magnétique ne sont plus fermées d'un pôle à l'autre mais s'ouvrent vers le milieu interstellaire (figure 8).

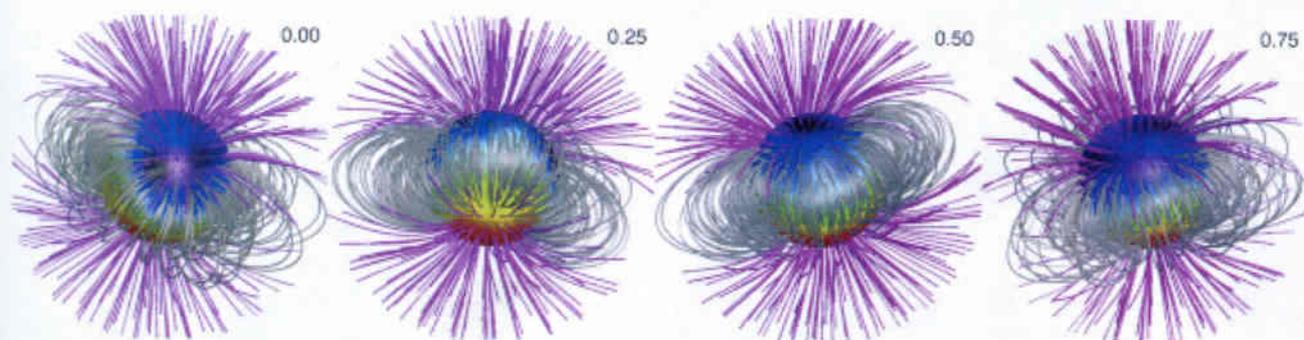
Près de l'étoile, là où les lignes de champ connectent les deux pôles, les particules du vent stellaire s'échappent donc de chaque pôle et suivent les mêmes lignes de champ magnétique en direction du pôle opposé. À mi-chemin, c'est-à-dire à l'équateur magnétique, les particules provenant du pôle positif rencontrent celles arrivant du pôle négatif, provoquant des chocs violents qui émettent des rayons X. Les particules du vent stellaire provenant des deux pôles s'accumulent ainsi au niveau de l'équateur magnétique. Deux cas de figure peuvent alors se présenter. Soit l'étoile tourne vite et la matière accumulée à l'équateur se retrouve piégée à cet endroit par la force centrifuge : c'est ce qu'on appelle une magnétosphère centrifuge. Soit l'étoile tourne trop doucement pour maintenir la matière à l'équateur magnétique et cette matière retombe alors à la surface de l'étoile en suivant les lignes de champ magnétique en sens inverse. Dans ce cas, la

matière dans la magnétosphère cesse renouvelée : c'est ce qu'on appelle une magnétosphère dynamique. Les deux types de magnétosphère peuvent exister à la fois : la magnétosphère dynamique très près de l'étoile, et centrifuge un peu plus loin (figure 9). La position séparant ces deux états s'appelle le rayon de rotation de Kepler [5].



9. Schéma d'une étoile avec une magnétosphère dynamique (DM) et avec également une magnétosphère centrifuge (CM) en bas. L'existence de la magnétosphère centrifuge dépend de la position du rayon de Kepler par rapport au rayon d'Alfvén.

Puisque l'étoile tourne sur elle-même et que l'axe du champ magnétique n'est pas le même que l'axe de rotation, nous pouvons observer la magnétosphère sous tous les angles et la voir, par exemple, de dessus ou par la tranche (figure 9). La matière dans les magnétosphères présentes autour des étoiles chaudes est essentiellement



tuée d'hydrogène et émet de la lumière à certaines longueurs d'onde rouge et infrarouge spécifiques de l'hydrogène. En mesurant la lumière émise par la magnétosphère sous tous les angles d'observation, on peut déduire des informations sur la magnétosphère, comme sa taille ou sa densité.

De plus, la présence d'une magnétosphère induit un autre effet important pour l'étoile. Comme les bras déployés d'un patineur artistique, la présence de matière rattachée à l'étoile autour d'elle freine la rotation de l'étoile. Les étoiles chaudes fortement magnétiques, notamment la plupart des étoiles Ap, tournent par conséquent plus lentement sur elles-mêmes que les étoiles non magnétiques.

L'ÉVOLUTION DES ÉTOILES CHAUDES

Enfin, l'évolution des étoiles chaudes au fur et à mesure qu'elles vieillissent est encore assez mal connue. En particulier, nous ne savons quasiment rien de l'impact du champ magnétique sur ce vieillissement ou, inversement, de l'impact du vieillissement stellaire sur le champ magnétique fossile. C'est pourquoi un autre programme observationnel franco-canadien, nommé LIFE (the Large Impact of magnetic Fields on the Evolution of hot stars) a commencé en 2016. Il s'agit de mesurer des champs magnétiques dans des étoiles chaudes évoluées, c'est-à-dire des étoiles O, B ou A, géantes ou supergéantes. Lorsqu'une étoile chaude vieillit, son rayon augmente de plus en plus. On sait donc déjà que le champ magnétique visible à la surface stellaire sera de plus en plus faible. Il diminuera proportionnellement à l'augmentation du rayon : si le rayon est multiplié par 10, le champ magnétique de surface sera divisé par 100. Plus l'étoile progressera vers sa mort et plus il sera donc difficile de détecter son champ magnétique. Néanmoins, les toutes premières

10. Reconstitution des lignes de champ magnétique autour de l'étoile chaude HD32633 à 4 phases différentes de la rotation de l'étoile, déduite des mesures spectropolarimétriques. Les lignes de champ magnétique fermées reliant un pôle magnétique à l'autre sont indiquées en gris, tandis que les lignes ouvertes sont en violet. (J. Silvester)

étoiles chaudes supergéantes magnétiques ont été récemment découvertes, effectivement avec des champs magnétiques très faibles de l'ordre d'un gauss, ce qui confirme que le champ magnétique fossile perdure durant la vie des étoiles chaudes.

À la toute fin de leur vie, les étoiles les plus chaudes explosent en supernovæ et cette explosion ne laisse derrière elle qu'une étoile à neutrons ou un trou noir. Certaines étoiles à neutrons tournent très rapidement sur elles-mêmes et émettent de la lumière par leurs deux pôles magnétiques : on les appelle des pulsars. Ces pulsars ont des champs magnétiques très forts, de 10 à 1 000 millions de gauss. Certains d'entre eux ont même des champs encore plus forts, jusqu'à 100 000 milliards de gauss, et on les appelle alors des magnétars. Le lien entre ces champs magnétiques extrêmes après l'explosion en supernova et les champs magnétiques présents dans 10 % des étoiles chaudes avant l'explosion reste à établir. Il est possible que le champ fossile soit complètement détruit lors de l'explosion et que le champ observé ultérieurement provienne d'une autre source.

LES ÉTUDES FUTURES

Bien des mystères restent donc à éclaircir concernant les champs magnétiques des étoiles chaudes, mais les progrès réalisés ces dix dernières années, notamment en France, grâce à la nouvelle génération de spectropolarimètres stellaires à haute résolution apportent

déjà des réponses importantes. De nouveaux progrès pourront être obtenus dans le futur grâce à de nouveaux instruments en construction.

En particulier, un spectropolarimètre fonctionnant dans l'infrarouge, appelé SPIROU, sera installé au CFHT fin 2017. Il permettra notamment d'étudier les étoiles chaudes très jeunes et encore cachées dans leur cocon originel, car ce cocon est transparent en lumière infrarouge alors qu'il forme un écran empêchant les observations dans les couleurs visibles. Il permettra aussi d'étudier plus en détail les magnétosphères, en particulier celles de faible densité, puisqu'elles émettent dans l'infrarouge de l'hydrogène.

À l'autre extrémité du spectre de la lumière, un spectropolarimètre fonctionnant dans l'ultraviolet pourrait aussi voir le jour à l'horizon 2030. Cet instrument est en effet prévu sur la mission spatiale *Arago* proposée par la France à l'Agence spatiale européenne (Esa). La spectropolarimétrie dans l'ultraviolet permettrait en particulier de suivre les particules du vent le long des lignes de champ magnétique autour de l'étoile. En combinant la spectropolarimétrie dans les couleurs visibles et ultraviolettes, comme *Arago* propose de le faire, il sera alors possible de relier en temps réel ce qui se passe à la surface de l'étoile et les événements observés dans l'environnement stellaire. ■

[1] Pieter Zeeman (1865-1943), physicien néerlandais, lauréat de prix Nobel en 1902 pour ses découvertes sur l'influence du champ magnétique sur les phénomènes radiatifs.

[2] Bernard Lyot (1897-1952), astronome français, académicien, qui a notamment travaillé sur la polarisation de la lumière et inventé le coronographe. [3] George Herbig (1920-2013), astronome américain, spécialiste des étoiles jeunes. [4] Hannes Alfvén (1908-1995), astrophysicien suédois, lauréat du prix Nobel en 1970 pour ses travaux en magnétohydrodynamique. [5] Johannes Kepler (1571-1630), astronome de Bavière, qui a notamment étudié les mouvements des planètes sur leur orbite.