

# LA ROTATION DES ETOILES

par  
E. Schatzman  
Observatoire de Meudon

## 1. Les données observationnelles.

Deux méthodes permettent de déterminer la période de rotation des étoiles :

(1) L'observations de variations périodiques du spectre. Cette méthode est dérivée de notre connaissance du Soleil : le Soleil tourne, et l'on voit défilé les taches solaires, qui apparaissent au bord est et disparaissent au bord ouest (fig. 1), la période de rotation à l'équa-

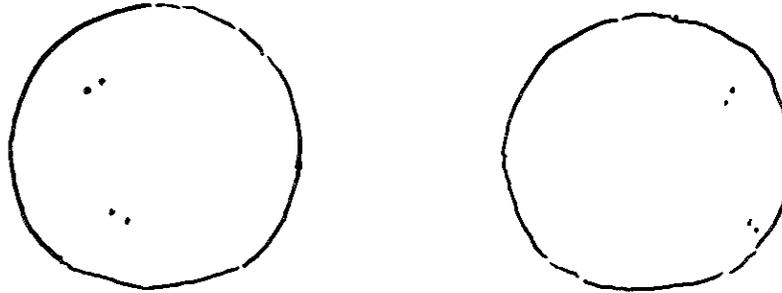


fig. 1. L'apparition des taches au bord est et leur passage sur le disque est le résultat de la rotation solaire, avec une période de 25 jours à l'équateur et de 31 jours au pôle

teur solaire étant d'environ 25 jours. Or, le spectre solaire présente des différences dans les régions actives : champs magnétiques et taches. La raie du calcium ionisé à 3934 Angström (dite raie K du calcium) à cet égard est caractéristique (fig. 2). Des variations du profil de la raie

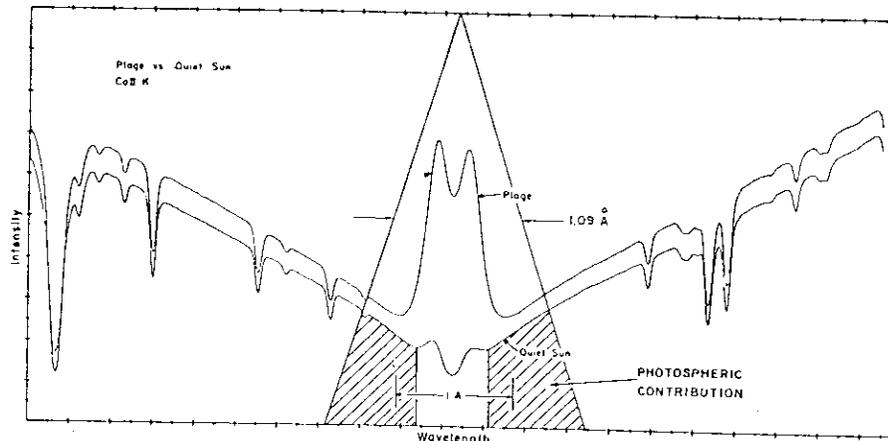


Fig. 2. Les deux courbes représentent en unités arbitraires l'intensité en fonction de la longueur d'onde au voisinage de la raie K du calcium ionisé à 3934 Angström pour des régions du Soleil calme (quiet Sun) et du Soleil actif (plages). Le triangle représente la bande passante du filtre utilisé au Mt Wilson pour l'étude de la raie K des étoiles.

K au cours du temps peuvent être interprétées simplement comme étant dues à la rotation, l'étoile présentant successivement différents aspects de sa surface. Le nombre d'étoiles étudiées de cette façon est relativement petit.

(2) l'élargissement des raies dû à la rotation. Par effet Doppler, la lumière en provenance du bord qui se rapproche de nous est déplacée vers le bleu, tandis que la lumière en provenance du bord qui s'éloigne de nous est décalée vers le rouge. (fig. 3) Ce sont ces observations qui ont permis à Struve dès 1936 de montrer que les propriétés de rotation des étoiles dépendent du type spectral. Cependant, un effet géométrique simple intervient, la direction de l'axe de rotation par rapport à nous. Si l'axe de rotation était exactement dirigé vers la Terre, il n'y aurait évidemment aucun élargissement. Si l'on appelle  $i$  l'angle de l'axe de

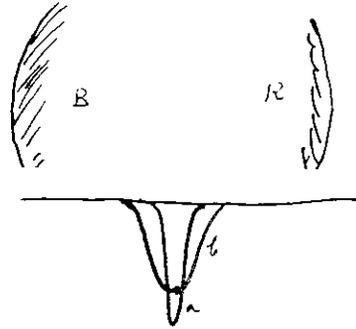


fig. 3. Schéma de l'effet du décalage spectral. (1) Le rayonnement du bord est qui se rapproche de nous est décalé vers le bleu et le rayonnement du bord ouest qui s'éloigne de nous est décalé vers le rouge.(2) Le profil d'une raie spectrale formée sans rotation (a) est élargi par effet Doppler (b).

rotation avec la ligne de visée, la grandeur caractéristique que l'on mesure par l'élargissement des raies est  $V \sin i$ , où  $V$  est la vitesse équatoriale de rotation de l'étoile.

## 2. Propriétés.

### 2.1. Diagramme de Hertzsprung-Russell.

Sur la base des données de classification spectrale de Harvard, il est très vite apparu que des étoiles de type spectral proche pouvaient être de magnitude très différente. Les notions de *naine* et de *géante* apparaissent déjà dans les travaux de Hertzsprung (1905) et Russell (1915), indépendamment, utilisant les données sur les distances stellaires (parallaxes) met en évidence les séquences de naines (ou séquence principale) et de géantes, et découvre les naines blanches.

Les deux données : *magnitude absolue* et *type spectral* deviendront définitivement les éléments essentiels de la classification stellaire, sans quoi toute spéculation sur l'évolution stellaire est inutile. Toutes données nouvelles seront situées par rapport à la classification stellaire de Hertzsprung-Russell. Il en est ainsi de la vitesse de rotation des étoiles.

### 2.2. Rotation et type spectral.

On doit à Struve (1950) une étude systématique de la vitesse de rotation des étoiles, et la mise en évidence d'une propriété remarquable des étoiles de la séquence principale : les étoiles des premiers types spectraux (O, B, A), ou, ce qui revient au même, les étoiles les plus chaudes (plus de 7000 ou 8000 K) tournent vite (environ 100 à 200 km/s à l'équateur), alors que les étoiles des derniers types spectraux (F, G, K) tournent lentement (moins de 30 km/s à l'équateur).(fig. 4) Le Soleil lui-même (type G) a une vitesse équatoriale de rotation de 2 km/s. La question que pose Struve, dès 1936 est : quelle est l'origine de cette différence ?

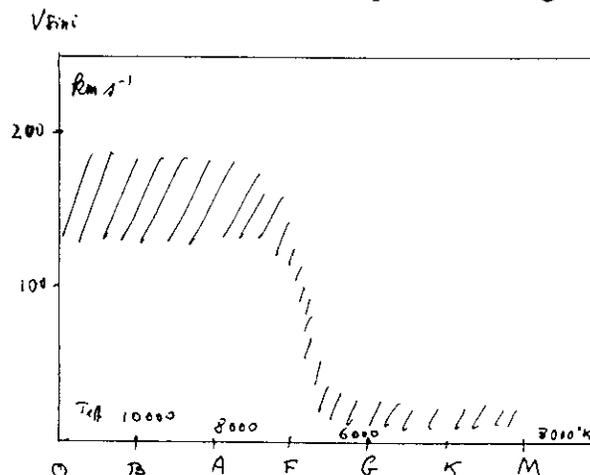


fig. 4. Vitesse de rotation en fonction du type spectral. Les hachures sont destinées à donner une idée de la dispersion intrinsèque des vitesses de rotation.

Cette découverte de Struve a encouragé les astronomes à faire de très nombreuses observations de la rotation stellaire, afin d'une part d'augmenter la quantité de données et d'autre part d'obtenir des mesures plus précises. A l'heure actuelle, l'Observatoire de Genève a entrepris la collecte de données sur 1500 étoiles, naines et géantes, avec une précision de l'ordre du km/s. Ces données n'ayant pas encore été complètement dépouillées, il est seulement possible d'en mentionner l'existence : l'analyse de leur signification demandera un important travail.

### 2.3. Rotation et âge.

On doit à R. Kraft (1965-1969), grâce à la mesure des vitesses de rotation des étoiles dans quelques amas brillants d'âge différent, d'avoir montré observationnellement que la vitesse de rotation des étoiles décroît avec le temps, confirmant ainsi les résultats théoriques de Schatzman (1962). (fig. 5) Il apparaît en particulier que le taux de ralentissement dépend du

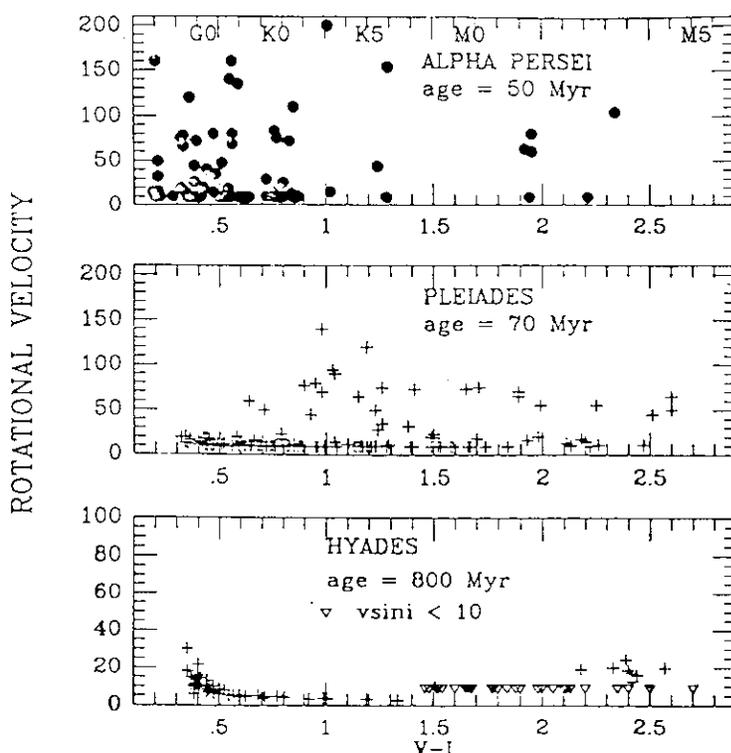


fig. 5. Distribution de la vitesse de rotation pour les étoiles de faible masse dans trois amas ouverts jeunes. Les différences dans les trois distributions illustrent l'évolution de la vitesse de rotation des étoiles de la séquence principale démontrant ainsi que les différences de vitesse de rotation ne sont pas dues aux différences de moment cinétique initial. En abscisses l'indice de couleur V-I, avec l'équivalent type spectral en haut de la figure.

type spectral, ce qui explique que les étoiles des premiers types spectraux n'ont pas eu le temps de ralentir, alors que les étoiles des derniers types spectraux montrent de façon caractéristique le ralentissement en fonction du temps.

On expliquera plus loin, dans la section 3, la logique du raisonnement qui conduit à chercher un processus de freinage de la rotation, et l'hypothèse actuellement admise sur ce mécanisme.

## 3. Perte de moment cinétique.

### 3.1. Moment cinétique.

Le moment cinétique, produit du moment d'inertie par la vitesse angulaire, est, dans un système isolé, une grandeur mécanique indestructible et inconvertible, à la différence de l'énergie mécanique, qui elle est convertible en d'autres formes d'énergie (thermique, électrique, magnétique, etc...). Cette propriété, dont l'importance apparaît au XIX<sup>ème</sup> siècle, a conduit à rejeter la théorie cosmogonique de Laplace. En effet, le moment cinétique de la nébuleuse primitive est très grand, et, quelque soit le moment d'inertie du Soleil (que l'on ne connaissait pas au XIX<sup>ème</sup> siècle), celui-ci aurait dû tourner avec la vitesse équatoriale maximale, celle de la limite d'instabilité rotationnelle, de l'ordre de 400 km/s. En fait, il est

facile de calculer la part des planètes et du Soleil dans le moment cinétique du système solaire, et l'on s'aperçoit vite que le moment cinétique du Soleil ne représente que 1.5% du moment cinétique total (tableau 1).

| Objet   | Distance à l'axe de rotation | Tableau 1                             |  |                  |
|---------|------------------------------|---------------------------------------|--|------------------|
|         |                              | Masse<br>(en unités de masse solaire) | Vitesse<br>(en kilomètres par seconde) | Moment cinétique |
| Soleil  | 0.001                        | 1                                     | 2                                      | 0.00014*         |
| Terre   | 1                            | 1/300000                              | 30                                     | 0.0001           |
| Jupiter | 5.2                          | 0.00106                               | 13.1                                   | 0.0725           |
| Saturne | 9.5                          | 0.00032                               | 9.7                                    | 0.0296           |

\* Le moment d'inertie du Soleil est donné par  $I = K M R^2$  avec  $K = 0.07$  environ.

La tentation était grande d'attribuer cette étonnante répartition du moment cinétique dans le système solaire à une interaction entre le Soleil et la nébuleuse primitive. Un seul inconvénient : cela n'explique pas la dépendance de la vitesse de rotation des étoiles en fonction du temps.

### 3.2. Perte de masse.

La première hypothèse qui se présente consiste à supposer que le moment cinétique a été emporté par le vent solaire. En quittant la surface du Soleil, une quantité de matière de masse  $m$  emporte un moment cinétique  $(2/3)m V R$ , à comparer, pour l'ensemble du Soleil à un moment cinétique de l'ordre de  $(1/14) M V R$ , le facteur  $(2/3)$  correspondant à la moyenne prise sur la surface du Soleil, et le facteur  $(1/14)$  (approché !) correspondant à la moyenne prise sur l'ensemble du Soleil (cette valeur fait intervenir la structure du Soleil et la répartition de la masse du centre à la surface). Pour que sa vitesse de rotation ait pu passer de 400 km/s à 2 km/s, le Soleil aurait dû perdre 40% de sa masse. Une telle perte de masse créerait autour du Soleil un environnement nébulaire aisément détectable que l'on n'observe dans le spectre d'aucune étoile analogue au Soleil. Cette idée d'un important taux de perte de masse avait été envisagée il y a plus de 40 ans par Fessenkoff et Massevitch pour expliquer une sorte d'universalité de la relation masse-luminosité et réfutée par J.L. Greenstein justement sur des arguments spectroscopiques. Notons en passant que les idées sur l'évolution stellaire ne sont plus du tout celles de la fin des années 40.

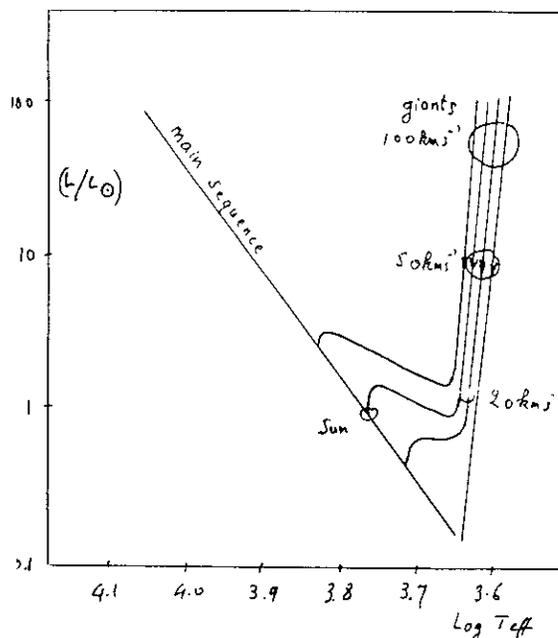


fig. 6. Les vitesses de rotation des étoiles jeunes dans le diagramme de Hertzsprung-Russell. Les étoiles récemment formées évoluent en se contractant et font un détour pour atteindre la séquence principale. Ce détour se produit lorsque commence la production d'énergie nucléaire dans les régions centrales de l'étoile. Les mesures de la vitesse de rotation sont symbolisées par des cercles de diamètre proportionnels à ces vitesses. La décroissance de la vitesse de rotation au cours de la contraction est due à la très grande efficacité du mécanisme de perte de moment cinétique.

### 3.3. Avant la séquence principale.

On a identifié, il y a maintenant plus de trente ans une classe d'étoiles présentant un système complexe de raies d'absorption et d'émission, les étoiles **T Tauri** que l'on a identifiées il y a maintenant plus de dix ans comme étant des étoiles en contraction vers la séquence principale. Elles sont entourées d'une vaste nébulosité qui tombe sur l'étoile. Chose remarquable, très visible dans l'élargissement des raies d'absorption qui proviennent de la surface de l'étoile, ces étoiles tournent et tournent d'autant plus lentement qu'elles sont plus proches de la séquence principale. (fig. 6) Par simple conservation du moment cinétique, on devrait s'attendre à ce qu'elles tournent de plus en plus vite au fur et à mesure qu'elles se contractent, or c'est justement le contraire qui se produit. On ne peut échapper à l'idée qu'il y a un mécanisme très efficace de perte du moment cinétique qui a pour effet de ralentir leur rotation pendant cette contraction.

### 3.4. Activité électromagnétique.

La présence de champs magnétiques à la surface du Soleil et à la surface des étoiles, la variation au cours du temps du système de taches, la relation entre la structure du champ magnétique et les immenses phénomènes des éruptions, sont des manifestations d'**activité électromagnétique**. Ces champs magnétiques s'étendent à de grandes distances du Soleil, comme le montrent les photographies du voisinage solaire obtenues au cours des éclipses, la forme du champ magnétique étant modifiée par la présence du vent solaire. Les observations spatiales le confirment et l'on peut même déterminer, grâce à ces observations, jusqu'à quelle distance la structure vent et champ magnétique tourne avec le Soleil (co-rotation). Au delà de cette distance, c'est le mouvement du vent qui domine et impose sa structure au champ magnétique. Les lignes de force du champ magnétique spiralent autour du Soleil, et le mouvement de la matière est essentiellement Képlérien.

Il y a donc entraînement du vent solaire par le champ magnétique jusqu'à une distance de l'ordre de 20 rayons solaires. Nous verrons plus loin à quoi correspond physiquement cette distance d'entraînement. Chaque gramme de matière, lâché à une distance de 20 rayons solaires, emporte 400 fois plus de moment cinétique que s'il était lâché à la surface du Soleil. Il suffit alors que le Soleil perde 0.1% de sa masse en 4.6 milliards d'années pour assurer une perte de moment cinétique par un facteur 200. On tombe alors sur des grandeurs tout à fait compatibles avec les observations. Reste alors la question : d'où vient ce champ magnétique?

## 4. La dynamo stellaire.

### 4.1 Un peu d'électricité.

Il y a à peu près un siècle, Siemens inventait la dynamo monopolaire (fig.7). Ce qui

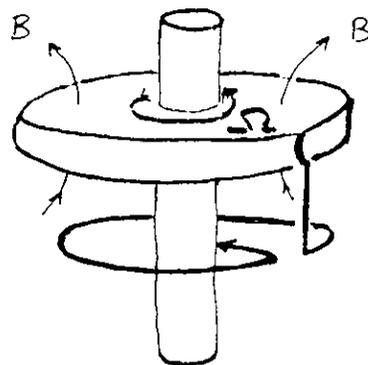
fig. 7. La dynamo de Siemens (vers 1880). Soit  $L$  l'inductance du circuit,  $R$  sa résistance,  $M$  l'inductance entre le fil et le bord du disque. La différence de potentiel s'écrit :

$$L \frac{dI}{dt} + R I = M \Omega I$$

Soit  $G$  le couple appliqué au système. L'équation du mouvement s'écrit :

$$C \frac{d\Omega}{dt} = G - M I^2$$

En régime stationnaire,  $G = M I^2$ ,  $\Omega = (R/M)$ .



caractérise le montage de Siemens, c'est que malgré les apparences, il n'a pas la symétrie de révolution. Il y a un fil de retour qui rejoint l'axe de rotation, si bien qu'au cours de la rotation, le champ magnétique coupe le fil et induit un courant qui vient accroître le champ magnétique. Les équations qui décrivent les propriétés de cette dynamo sont reportées sur la figure. Il suffit que la résistance du circuit soit suffisamment petite, comparée à l'inductance entre le fil et le bord du disque pour que la dynamo fonctionne. Le travail effectué pour vaincre la force de Laplace est limité par la puissance disponible pour faire tourner la dynamo et fixe la valeur maximale du courant et du champ. Mais, au début, dans la phase linéaire, le courant et le champ magnétique croissent exponentiellement.

### 4.2. Plasmas.

On désigne sous ce nom les milieux ionisés ou fortement ionisés. Le milieu solaire (atmosphère et intérieur) est un plasma, très bon conducteur de l'électricité. La notion de *bon* conducteur signifie que le temps caractéristique de dissipation Joule d'un courant dans le plasma est très long, et en tous cas beaucoup plus long que les échelles de temps dynamiques du milieu considéré. Par exemple, à des mouvements de durée 5 minutes, peuvent correspondre des temps de dissipation de la semaine. Cette haute conductivité explique qu'il soit possible que des mouvements engendrent des champs magnétiques.

La première idée est due à Larmor (1920) qui a suggéré la possibilité que des mouvements tourbillonnants puissent engendrer des champs magnétiques et c'est Cowling (1935), qui a montré par un argument de symétrie très simple que des mouvements axisymétriques ne pouvaient maintenir un champ magnétique axisymétrique. Parker a donné une description très intuitive du mécanisme de régénération du champ magnétique (1935) que nous allons décrire plus loin. La théorie *électrodynamique du champ moyen*, due à Rädler et Krause (1970) a fourni l'appareil mathématique sur lequel est fondée actuellement la théorie de la dynamo.

#### 4.3. Mouvements des couches extérieures du Soleil.

Les observations faites par Jansen à l'Observatoire de Meudon (vers 1878) ont révélé la présence à la surface du Soleil d'une structure de durée de vie assez brève (5 à 10 minutes), la granulation solaire. On sait maintenant que cette structure est la manifestation, jusque dans l'atmosphère solaire, de mouvements convectifs, dûs à une instabilité thermique classique (instabilité de Rayleigh-Bénard), du même type que celle qui entraîne des mouvements de convection dans l'huile chauffée dans une casserole à fond plat. En fait, toute une série de mouvements observés à la surface du Soleil indiquent l'existence de plusieurs échelles de la convection, indiquant clairement que la zone convective est profonde et entièrement turbulente, c'est à dire le siège de mouvements chaotiques à toutes échelles.

L'analyse des oscillations solaires a permis de déterminer la profondeur de la zone convective. Les oscillations solaires, mesurées grâce à des observations prolongées des vitesses radiales de la surface solaire, sont dues à la propagation d'ondes acoustiques de très basse fréquence à travers le Soleil. L'échelle des mouvements turbulents est pour sa plus grande part petite comparée à l'échelle des ondes acoustiques solaires, qui ne voient que la moyenne des mouvements turbulents. L'analyse des fréquences permet de déterminer la vitesse de propagation du son en fonction de la profondeur, elle permet d'accéder à une connaissance de l'intérieur du Soleil et en particulier de déceler l'endroit où l'on passe d'une zone convective instable, à une zone radiative stable. La profondeur de la zone convective ainsi déterminée est de 28.7% du rayon solaire, soit environ 200 000 km.

En raison de la rotation solaire, tous ces mouvements de matière dans la zone convective sont soumis à la force de Coriolis, et sont alors des mouvements tourbillonnaires. Ce caractère tourbillonnaire est un des éléments essentiels qui explique la production du champ magnétique.

#### 4.4. Production des champs magnétiques.

La présentation de Parker (1955), très intuitive, permet de se représenter la production des champs magnétiques (fig.8). Un tube de force toroïdal est déformé par la convection, une boucle commence à se former (a);, sous l'effet du mouvement tourbillonnaire dû à la force de Coriolis, la boucle se tord (b) jusqu'au moment où deux parties du tube de champ magnétique, de direction opposée viennent se juxtaposer (c); à ce moment, une instabilité apparaît, un courant très intense passant dans un très petit volume a (contrairement à ce qui se passe en général) un effet dissipatif important dans un très petit intervalle de temps, produisant une modification de la topologie du champ magnétique et la reconnection des lignes de force (d), avec apparition d'un tore de champ magnétique, dont le plan est perpendiculaire au tube de force toroïdal d'où tout est parti (d).

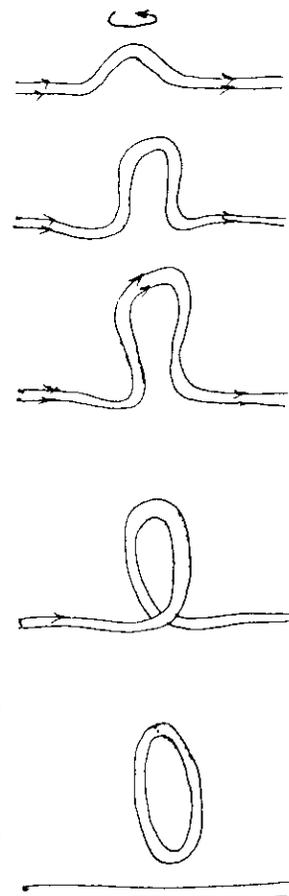


fig. 8. Schéma de Parker de production du champ poloïdal sous l'effet du mouvement cyclonique.

Il y a donc eu, à partir d'un champ magnétique toroïdal (autour de l'axe de symétrie de l'étoile) apparition d'une composante située dans le plan méridien (que l'on appelle composante poloïdale). Cette composante poloïdale, à son tour, étirée par la rotation différentielle, engendre une composante toroïdale. Le rôle du mouvement cyclonique est capital, car c'est lui qui engendre la composante poloïdale du champ magnétique.

Il apparaît ainsi que la production du champ magnétique est liée à la fois à la rotation et à la présence d'une zone convective. Il est essentiel, dans ce mécanisme que le plasma se mélange par turbulence et qu'il soit soumis constamment à une torsion sous l'effet de la force de Coriolis. Pour que la production de champ magnétique soit efficace, il faut que, pendant le temps de retournement d'un tourbillon, le milieu ait fait plusieurs tours sur lui-même. Le temps de retournement, en ordre de grandeur, c'est le temps qu'il faut au tourbillon animé de la vitesse  $u$  pour parcourir une distance de l'ordre de sa propre dimension  $l$ , soit  $(u/l)^{-1}$ . La période de rotation est  $(1/\Omega)$ , et le quotient de ces deux temps caractéristiques est  $(u/\Omega l)$ . On peut encore dire que c'est le quotient de l'accélération du mouvement tourbillonnaire par l'accélération de Coriolis, ce que l'on écrit/:

$$\frac{u^2}{l} \frac{1}{2u \Omega}$$

et que l'on appelle nombre de Rossby.

En raison de l'importance de l'effet cyclonique dans la production du champ magnétique, c'est lorsque le nombre de Rossby est petit que la dynamo peut être efficace. L'étude de l'activité à la surface des étoiles, telle qu'on l'identifie par le profil de la raie K du calcium ionisé, ou par l'émission de rayons X, montre bien que l'activité est d'autant plus importante que le nombre de Rossby est plus petit (fig.9). En même temps, la présence de la turbulence est indispensable, si bien que seules les étoiles présentant une zone convective superficielle montrent les signes d'une activité électromagnétique, symptôme de la présence d'un champ magnétique. Ce sont aussi les seules étoiles dont la rotation se ralentit au cours du temps. Sur la séquence principale, ce sont les étoiles de type spectral plus tardif que F2.

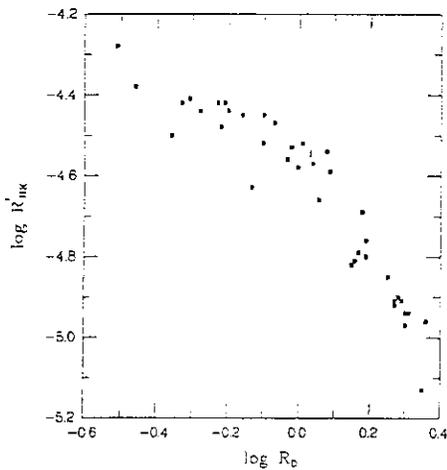


Fig 9. Relation entre le nombre de Rossby  $Ro=(u/l\Omega)$  et l'activité. Celle-ci, qui est une mesure de l'importance du champ magnétique, est évaluée à partir de l'émission chromosphérique dans la raie K du calcium ionisé. (d'après Noyes *et al*, 1984).

On explique ainsi la différence entre les étoiles des premiers types spectraux et les étoiles des derniers types spectraux. Les premières, n'ont pas de zone convective, donc ne présentent pas l'effet dynamo, à la différence des dernières.

## 5. Conclusion.

Dans cette présentation, on a fait porter l'accent sur ce que l'on comprenait : le ralentissement de la rotation des étoiles des derniers types spectraux (étoiles jaunes et rouges), le rôle du champ magnétique, le mécanisme de production des champs magnétiques, demandant la présence d'une zone convective, ce qui circonscrit le domaine spectral dans lequel le ralentissement peut se produire.

En fait, d'autres problèmes de champ magnétique se posent, dûs en particulier à l'existence d'étoiles présentant manifestement un champ magnétique fossile. Ces étoiles n'ont pas de zone convective, ne présentent pas de symptômes d'activité électromagnétique, on voit apparaître et disparaître par un simple effet de rotation lente les indices spectraux de la présence d'un champ magnétique intense (des dizaines ou des centaines de milliers de Gauss).

Dans ces étoiles, dépourvues de mouvements hydrodynamiques violents, le temps de dissipation du champ magnétique se chiffre en millions d'années, comparable, en fait à leur durée de vie. D'où vient leur champ magnétique ? Comment s'est-il formé ? Comment ont-elles atteint cette lente vitesse de rotation ? Ces questions, soulevées en conclusion, parmi beaucoup d'autres, liées aux problèmes des champs magnétiques et de la rotation, n'ont pas d'autre but que de rappeler que la résolution pas à pas de problèmes de l'astrophysique stellaire ne cesse de mettre en évidence de nouvelles questions encore sans réponse.