

# Électromagnétisme dans les plasmas fortement stratifiés: mise en évidence d'un effet inattendu de l'écrantage de Debye

Véronique Bommier

LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC Université Paris 6, Université Paris-Diderot Paris 7

## Résumé

Le milieu fortement stratifié étudié ici est la photosphère solaire, couche superficielle d'environ 300 km d'épaisseur d'où est émis le rayonnement reçu sur terre. Ce milieu est un plasma de 90% d'hydrogène et 10% d'hélium de température élevée (de l'ordre de 5000 K) mais faiblement ionisé, la densité électronique étant de l'ordre d'un dix millièème seulement de la densité de particules neutres. Le champ magnétique joue un rôle important sur le mouvement des particules chargées, et on le mesure par interprétation de l'effet Zeeman visible en spectropolarimétrie du rayonnement. Toutes les mesures, de différentes raies spectrales (du domaine visible comme de l'infrarouge), de différents instruments, utilisant différentes méthodes d'inversion, concluent à un gradient vertical  $dB_z/dz$  de l'ordre de 3 G/km, tandis que le gradient horizontal  $dB_x/dx + dB_y/dy$  est trouvé de l'ordre de 0.3 G/km, dans les taches solaires où le champ est le plus facile à mesurer. Il s'ensuit une difficulté pour assurer la nullité de  $\text{div}B$  par combinaison de ces deux nombres. Le problème résiste à l'analyse fine des observations: éventualité de structures non résolues, effet de l'intégration sur la ligne de visée. Il sera montré que l'écrantage de Debye dans un plasma fortement stratifié peut être une explication. La stratification forte rend les vitesses du fluide anisotropes ce qui aplatit la sphère de Debye. Cet écrantage réalise alors une disparition anisotrope du champ créé par les courants, qui est une alternative à l'existence de monopoles magnétiques pour expliquer la non-nullité de  $\text{div}B$ , c'est-à-dire la non-conservation du flux.

**Mots-clés:** plasma – stratification – champ magnétique – écrantage

**Keywords:** plasma – stratification – magnetic field – shielding

## 1. Mise en évidence de l'effet

Cette étude est le résultat de la mise en évidence de l'écart à 0 de  $|\text{div}B|$  dans les mesures de champ magnétique de la photosphère solaire, lors de la dernière étape de ces mesures qui est la résolution de l'ambiguïté des résultats de l'inversion. En effet, deux vecteurs champ magnétique symétriques par rapport à la ligne de visée sont indiscernables par spectropolarimétrie suivie d'inversion. On cherche donc à résoudre cette ambiguïté en minimisant  $|\text{div}B|$ . La nouveauté ici a été l'apport des observations du télescope solaire franco-italien installé en 1996 sur le site astronomique européen de Tenerife (Canaries, Espagne), qui a permis l'observation simultanée de deux raies spectrales différentes, formées à des profondeurs différentes, ce qui permet un accès observationnel au comportement selon la verticale. La difficulté créée par la non-nullité de  $\text{div}B$  nous est très vite apparue, et une analyse fine et approfondie de la littérature a confirmé l'irréductible différence des deux gradients entrant dans la composition de  $\text{div}B$  (15 références, aucune exception trouvée). Finalement, le choix des raies spectrales pour les observations THEMIS s'est porté sur deux raies du même multiplet du fer neutre dont la différence de profondeur de formation reste très constante, même si les profondeurs individuelles varient. Une détermination observationnelle directe de cette différence de profondeur de formation [1] a confirmé notre modèle sur ce point. La méthode d'inversion a été testée et validée [2]. Ces deux raies spectrales sont également observées par le télescope SOT (en mode SP) embarqué sur le satellite américano-japonais HINODE, dont nous avons également analysé les observations.

## 2. Recherche d'explication observationnelle

Nous avons alors exploré toutes les pistes dont nous pouvions avoir l'idée, pour expliquer ce phénomène. D'abord, les artefacts éventuels dans les observations. Nous avons effectué de nouveaux tests de l'effet Zeeman, qui ont écarté les différences de sensibilité entre la mesure de la composante verticale, qui a un comportement linéaire en champ faible, et celle des composantes horizontales qui ont un comportement quadratique. Ces écarts disparaissent avec les méthodes modernes d'inversion qui sont globales et font intervenir un facteur de remplissage magnétique. D'autre part la non-nullité observée de  $\text{div}B$  est toujours dans le sens de la diminution du flux lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, ce qui écarte aussi l'effet d'un pur bruit de mesure. Les structures magnétiques non résolues sont souvent proposées comme explication, mais cela ne tient pas devant la linéarité de l'opérateur "divergence": si l'on superpose plusieurs petites structures à divergence nulle dans un même pixel,

la divergence de la somme est la somme des divergences et sera donc nulle aussi. L'intégration sur la ligne de visée ne peut non plus être la cause. C'est un produit de convolution, et il est facile de montrer, par un simple changement de variable, que la divergence du produit de convolution d'une quantité est le produit de convolution par la même fonction de la divergence locale de la quantité. Si la divergence locale est nulle, l'intégration sur la ligne de visée ne la fera donc pas sortir de zéro.

### 3. Proposition d'explication théorique

Nous nous sommes alors tournés vers la théorie. L'explication que nous proposons repose d'abord, mais pas uniquement, sur l'écrantage de Debye qui masque les effets électromagnétiques d'une particule chargée en mouvement libre dans le plasma. Les particules chargées de signe contraire, en mouvement libre également, viennent créer l'écran. L'écrantage de Debye est dû à l'attraction coulombienne et est en fait fonction des vitesses relatives des particules. Il est bien connu que le champ électrique de la particule écrantée, est annulé par l'écran à partir d'une certaine distance appelée "longueur de Debye". Pour le champ magnétique, si la vitesse fluide de toutes les particules est la même dans le volume de Debye, le champ magnétique créé par la particule d'intérêt s'annule de même (ce qui ne serait pas le cas sous l'effet de vitesses thermiques toutes différentes, en d'autres termes la contribution des vitesses thermiques à l'écrantage est nulle, il s'agit d'un effet des vitesses fluides ou hydrodynamiques). L'intégrale de Biot et Savart qui donne le champ magnétique créé par les courants du milieu, doit donc être limitée à la sphère de Debye. Mais si celle-ci est sphérique,  $\text{div}B$  reste nul même si l'intégrale est limitée. Ce n'est que si la sphère est rendue non sphérique par l'anisotropie des vitesses, qu'une contribution non nulle peut rester pour  $\text{div}B$ . L'anisotropie des vitesses est due à la forte stratification du milieu, qui apparaît donc comme une condition nécessaire pour réaliser la non-nullité de  $|\text{div}B|$ . En résumé, la non-nullité observée de  $|\text{div}B|$  serait donc un effet du plasma, et plus particulièrement de sa stratification.

### 4. Conclusion

Les observations montrent de plus qu'il est possible de ramener  $|\text{div}B|$  à zéro en effectuant une mise à l'échelle des coordonnées selon le rapport d'aspect du milieu anisotrope. En suivant [3] nous avons évalué ce rapport à 10 pour la photosphère solaire. Une fois les coordonnées mises à l'échelle de ce rapport, la divergence de  $B$  redevient nulle et nous en déduisons des lois d'échelle pour la magnétohydrodynamique de la photosphère solaire.

Cette proposition a été rédigée sous forme d'un article du même auteur actuellement soumis à la revue "Astronomy and Astrophysics".

### Références

1. Faurobert, M., et al., *Direct measurement of the formation height difference of the 630 nm Fe I solar lines*. Astronomy and Astrophysics, 2009. **507**: p. L29-L32.
2. Bommier, V., et al., *UNNOFIT inversion of spectro-polarimetric maps observed with THEMIS*. Astronomy and Astrophysics, 2007. **464**: p. 323-339.
3. Brethouwer, G., et al., *Scaling analysis and simulation of strongly stratified turbulent flows*. Journal of Fluid Mechanics, 2007. **585**: p. 343.