
Projet Tuteuré de Physique



Etude des champs magnétiques dans les régions calmes du Soleil

Laboratoire d'accueil : **Hippolyte Fizeau**
Encadrante : **Mme Marianne Faurobert**

Table des matières

Table des matières.....	2
Introduction.....	2
I. Présentation des données du problème	3
A. Caractéristiques techniques	3
B. Paramètres de Stokes.....	4
C. Rendre ces données utilisables	4
II. Présentation de phénomènes physiques	5
A. Granulation solaire et lien avec le champ magnétique.....	5
B. La polarisation	5
III. Détermination du champ magnétique	6
A. Méthodes de quantification	6
1. Mesure de l'écart Zeeman	6
2. Méthode des dérivées	6
3. Centre de gravité	8
B. Résultats et discussions	8
Conclusion	10
Remerciements.....	10
Bibliographie.....	10

Introduction

Cela fait des millénaires que l'Homme est intrigué et fasciné par le Soleil. Bien que nous ne puissions savoir exactement ce à quoi pensaient nos ancêtres, il est difficile de croire qu'ils soient restés indifférents face à tant de mystères et de beautés. Pendant une très longue période, l'humanité ne pouvait que contempler ce spectacle. Mais c'est à partir du XVIIème siècle, que l'on a commencé à l'étudier afin de comprendre quels sont les phénomènes physiques mis-en en jeu afin de résoudre les mystères qui entourent ce spectacle. C'est en observant le mouvement des tâches solaires que Johann Goldsmid et Galilée sans le savoir, ont étudié pour la première fois les champs magnétiques solaires. Depuis cette époque, des moyens de plus en plus perfectionnés ont été mis en place afin d'affiner les calculs.

Nous verrons à travers ce succinct rapport : comment quantifier les champs magnétiques dans les régions calmes du Soleil ?

I. Présentation des données du problème

A. Caractéristiques techniques

Pour mener à bien notre étude on dispose de données de polarisations issues d'un polarimètre. La totalité de nos données sont au départ au format FITS et proviennent du satellite Japonais Hinode. Il est donc dans un premier temps important de rappeler ses caractéristiques techniques et sa façon de procéder. Il dispose de trois instruments mais nos données proviennent uniquement du SOT (Solar Optical Telescope). Sa façon de procéder est la suivante :

Il va répartir l'axe Nord-Sud du Soleil en vingt zones qui seront « scannées ». Dans chacune de ces vingt zones, il va déplacer une fente sur 380 positions Est-Ouest, et cette fente fera 1024 pixels de hauteur. De plus, il effectuera aussi un balayage en longueur d'onde de 112 unités. [2]

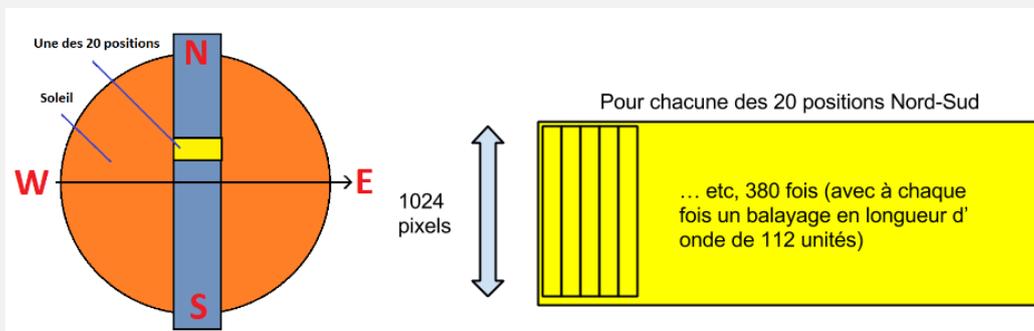


FIGURE 1 : SCHEMA D'EXPLICATION DU PROCESSUS DE BALAYAGE DE DONNEES

Au final, au niveau des données, nous disposerons donc de 20 dossiers correspondants au 20 blocs Nord-Sud. Et dans chaque dossier nous aurons 380 fichiers correspondants aux positions Est-Ouest. On dit que l'on obtient : « des cubes de données »

NB : Dans nos données, nous disposons d'en fait 14 blocs Nord-Sud, et la fente ne fait que 816 pixels de hauteur et n'effectue un balayage Est-Ouest que sur 190 positions, du fait de l'usure de l'appareil.

Dans l'optique d'étudier les champs magnétiques, le polarimètre se restreint à une gamme de longueur d'onde de l'atome F de Fer car cet élément est sensible au champ magnétique. En termes physiques, on dit que le Fer dispose d'un grand facteur de Landé.

Introduisons aussi la notion de ligne de visée et de l'angle θ , qui nous serviront par la suite :

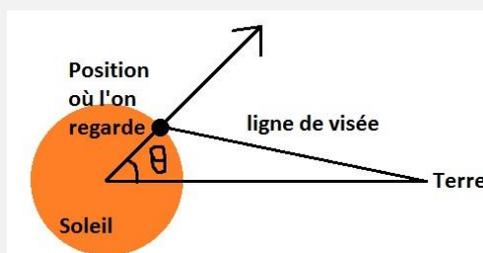


FIGURE 2 : LIGNE DE VISEE ET ANGLE θ

B. Paramètres de Stokes

L'utilisation d'un polarimètre permet de mesurer le vecteur de Stokes incident $S = (I, Q, U, V)$ [1] au moyen d'un dispositif que l'on décrira de manière plus détaillée sur notre site web car ceci n'est pas l'objet de notre étude dans ce présent rapport. Pour faire simple, les paramètres de Stokes sont les quatre composantes du vecteur de Stokes, ils permettent de décrire l'état de polarisation d'une onde électromagnétique.

On note $S = (I, Q, U, V)$

- I est l'intensité totale mesurée qui sera strictement positive.
- Q et U servent à décrire la polarisation linéaire.
- V sert à décrire la polarisation circulaire.

C. Rendre ces données utilisables

Lors de l'acquisition des données par le satellite, l'instrument va mettre un certain temps à déplacer la fente sur l'axe Est-Ouest. Cependant le Soleil n'étant pas une sphère inerte, il y aura des différences notables entre deux positions de fentes. La principale cause à prendre en compte, sont les mouvements de convection au sein du Soleil. Il y a en permanence du plasma qui circule en remontant vers la surface puis ensuite qui redescend. Ce mouvement du plasma de bas en haut puis de haut en bas, va induire un effet bien connu : l'effet Doppler. Vu du télescope, le plasma va se rapprocher ou s'éloigner. L'effet Doppler aura pour conséquence de décaler les profils de raies en longueur d'onde. Il faudra donc corriger cet effet afin d'aligner les raies d'absorption entre différentes positions de la fente.

Pour se faire, on prend un emplacement arbitraire sur lequel on va centrer les raies des autres positions. On passe dans l'espace de Fourier et on multiplie la position en longueur d'onde par une exponentielle complexe appropriée, puis on repasse dans l'espace direct. Ce traitement aura pour effet de translater les raies afin de les aligner toutes au même endroit.

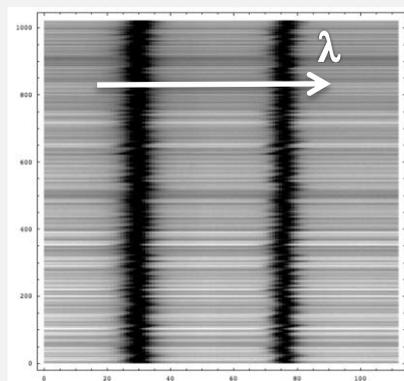


FIGURE 3 : AVANT TRAITEMENT

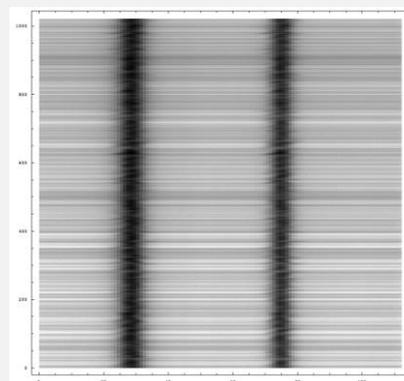


FIGURE 4 : APRES TRAITEMENT

II. Présentation de phénomènes physique

A. Granulation solaire et lien avec le champ magnétique

Comme dit précédemment, il existe d'importants mouvements de convection au sein du plasma solaire. La convection apparaît par perturbations de l'équilibre thermique et hydrostatique dans l'atmosphère solaire, elle donne naissance à des mouvements macroscopiques de matière qui transportent de l'énergie thermique. Les régions plus chaudes sont moins denses et subissent une poussée d'Archimède dirigée vers le haut alors que les régions plus froides sont plus denses et sont repoussées vers le bas par la force de gravité.

Il y a donc des zones où le plasma remonte à la surface, perd en énergie, se refroidit, puis redescend. Ces zones définissent ce qu'on appelle des "granules". La taille caractéristique de ces granules est d'environ 1200 km. De façon très simpliste, on dit que se sont ces mouvements dans le plasma qui créent ces champs magnétiques au niveau des granules.

Les champs forts se créent plutôt au centre de ces granules tandis que les champs faibles se créent dans les inter-granules. Cela s'explique par le fait que si le champ magnétique est faible, c'est-à-dire, si la pression magnétique est petite par rapport à la pression du gaz, il est transporté par les mouvements convectifs. Le champ magnétique dans les régions calmes est emporté vers le bord des granules et dans les inter-granules par les mouvements convectifs.

B. La polarisation

Après correction de l'effet Doppler les données sont traitées et nous pouvons afficher les composantes du vecteur de Stokes : I Q U et V sur des images.

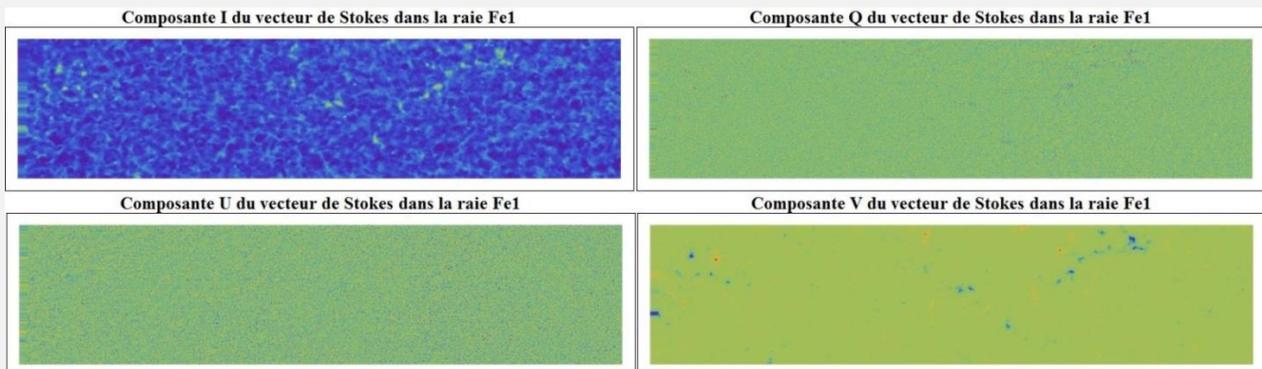


FIGURE 5 : IMAGES DES COMPOSANTES DE STOKES POUR LE BLOC CENTRAL

Ce que nous voyons très clairement, c'est que les composantes Q et U du vecteur de Stokes ne sont quasiment pas représentées, tandis que la composante circulaire, V, représente à elle seule toute l'intensité mesurée. Il y a une explication très logique à cela. En effet, ces images sont au centre du Soleil (7° bloc d'image sur 14), c'est-à-dire que le vecteur normal à la surface du Soleil suit la ligne de visée, et lorsque les polarisations linéaires suivent la ligne de visée, on les aperçoit comme étant nulles, tandis qu'une polarisation circulaire apparaîtra clairement.

III. Détermination du champ magnétique

A. Méthodes de quantification

1. Mesure de l'écart Zeeman

Il existe différents moyens de mesurer les champs magnétiques solaires. L'une d'elle consiste à mesurer l'écart Zeeman. Des atomes plongés dans un champ magnétique, vont provoquer la séparation des raies en plusieurs composantes. La mécanique quantique prédit que les raies se décalent en longueur d'onde (par rapport à la position de la raie sans champ magnétique) d'une quantité :

$$\Delta\lambda_B = B_{//} * \frac{g_l \lambda^2}{4\pi mc} = 4.66. 10^{-13} \lambda^2 g_l B_{//} \quad (1)$$

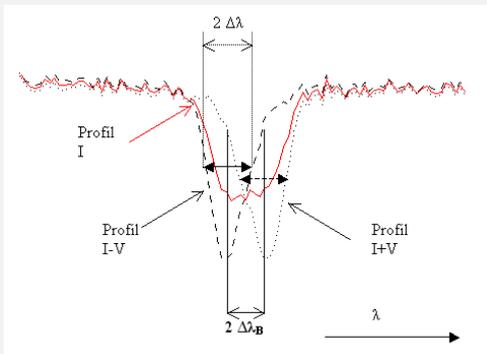


FIGURE 6 : RAIE SEPARÉE PAR EFFET ZEEMAN

Avec λ longueur d'onde de la raie en Å, $B_{//}$ champ magnétique longitudinale (parallèle à la ligne de visée) en Gauss et g_l facteur de Landé correspondant.

Remarque : Pour un champ $B = 100$ Gauss, $g_l = 2.5$ et $\lambda = 6300$ Å

On trouve $\Delta\lambda_B = 0.0046$ Å

⇒ Faibles décalages d'où la nécessité d'avoir un spectrographe à forte résolution et choisir un élément à fort facteur de Landé.

Comme nous venons de le voir, la mesure de l'écart Zeeman $\Delta\lambda_B$ permet donc de remonter aux champs magnétiques longitudinaux. Cependant, du fait que les composantes soient très peu séparées, la mesure de l'écart Zeeman est plus précise entre les profils de Stokes. Nous verrons dans la partie suivante une méthode dites « Méthode des dérivées » qui complétera celle-ci.

2. Méthode des dérivées

Il existe une méthode alternative basée sur la théorie des transferts de rayonnement en lumière polarisé qui nous donne dans l'approximation des champs faibles les expressions des paramètres de Stokes :

$$V(\lambda) = -\cos(\theta) \Delta\lambda_B \frac{dI}{d\lambda} \quad (2)$$

$$Q(\lambda) = -\frac{\Delta\lambda_B^2}{4} \sin^2(\theta) \cos(2\phi) \frac{d^2I}{d^2\lambda} \quad (3)$$

$$U(\lambda) = -\frac{\Delta\lambda_B^2}{4} \sin^2(\theta) \sin(2\phi) \frac{d^2I}{d^2\lambda} \quad (4)$$

Ces expressions sont directement liées au champ magnétique.

Étude des champs magnétiques dans les régions calmes du Soleil

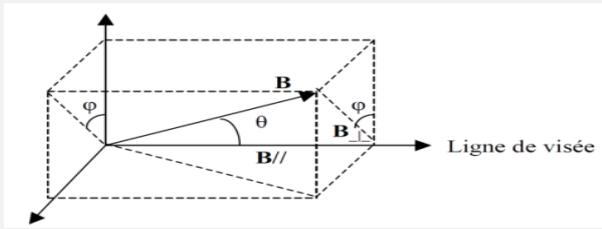


FIGURE 7 : SCHEMA DE B SUR LA LIGNE DE VISEE

- Champ longitudinal : $B_{//} = B \cos(\theta)$
- Champ transversal : $B_{\perp} = B \sin(\theta)$

En remplaçant $\Delta\lambda_B$ par (3) :

$$V(\lambda) = - 4.66. 10^{-13} \lambda^2 g_l B_{//} \frac{dI}{d\lambda} \quad (5)$$

$$Q(\lambda) = - \frac{(4.66.10^{-13} \lambda^2 g^*)^2}{4} B_{\perp}^2 \cos(2\phi) \frac{d^2 I}{d^2 \lambda} \quad (6)$$

$$U(\lambda) = - \frac{(4.66.10^{-13} \lambda^2 g^*)^2}{4} B_{\perp}^2 \sin(2\phi) \frac{d^2 I}{d^2 \lambda} \quad (7)$$

$V(\lambda)$ permet donc de trouver le champ longitudinal alors que $Q(\lambda)$ et $U(\lambda)$ permettent de trouver le champ transversal ainsi que l'azimut ϕ .

Remarque: le profil $V(\lambda)$ est proportionnel à la dérivée première de I par rapport à λ .

Comparons maintenant théorie et expérience :

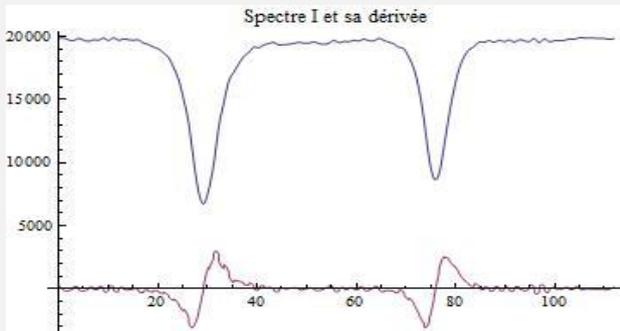


FIGURE 8 : INTENSITE I (AU-DESSUS) AINSI QUE $\frac{dI}{d\lambda}$

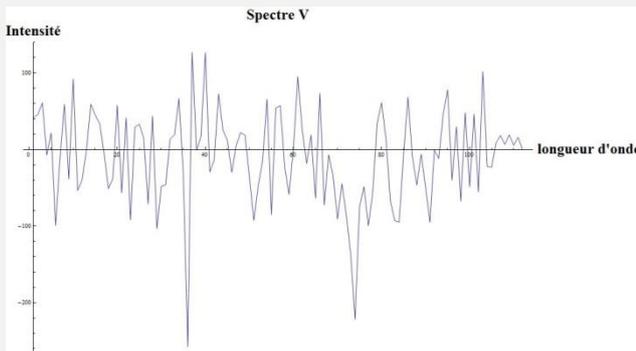


FIGURE 9 : INTENSITE V MESUREE

Comme nous pouvons le voir sur la figure 8, est représentée l'intensité $I(\lambda)$ (au-dessus) sur lequel nous avons aussi représenté par une interpolation à l'aide du logiciel Mathematica $\frac{dI}{d\lambda}$ (en dessous).

En théorie $\frac{dI}{d\lambda}$ doit être proportionnel à $V(\lambda)$ comme prédit plus haut.

Cependant lorsque l'on compare avec le graphe de $V(\lambda)$ on s'aperçoit, malgré la présence des pics qui semble similaire, que le signal réel est parasité par un bruit qui est loin d'être négligeable.

Par conséquent, cette méthode bien que pratique ne nous permettra pas de calculer le champ magnétique du fait de la présence de bruit lié certainement à l'instrumentation.

Il nous faut donc à présent trouver une méthode alternative permettant de calculer le champ B.

3. Centre de gravité

La méthode du centre de gravité nous permet de calculer la valeur moyenne du champ magnétique longitudinal (B parallèle à la ligne de visée) sur la surface d'un pixel.

Dans un premier temps, on se place au centre d'une des raies. Prenons par exemple la raie 2 qui possède un facteur de Landé plus important ($g_{l_{raie\ 1}} = 1.67$ et $g_{l_{raie\ 2}} = 2.5$) cette méthode nous donne la relation :

$$\lambda_{\pm} = \frac{\int_{raie} \lambda [Ic - (I \pm V)] d\lambda}{\int_{raie} [Ic - (I \pm V)] d\lambda} \quad (8)$$

On intègre en longueur d'onde dans la raie 2 de $\lambda = 71px$ à $\lambda = 82px$, où la polarisation circulaire V est non nulle (V oscille autour de 0 dans le continu).

NB : étant donné que V est quasi nulle dans le continu, il faudra faire attention à bien se situer dans la raie pour ne pas obtenir des valeurs nulles au dénominateur.

Ic est l'intensité dans le continu que l'on calcule aisément en faisant une moyenne des valeurs hors des raies. On a $Ic = 21\ 500$

λ_{\pm} correspond à la valeur de λ au centre des creux des profils respectifs I+V et I-V, espacés de la valeur $2.\Delta\lambda_B$ (voir III.A-1)

$$2\Delta\lambda_B = \lambda_+ - \lambda_- \quad (9)$$

Dans l'approximation du champ faible on peut montrer que le champ magnétique longitudinal est relié à λ_{\pm} par la relation :

$$B_{//} = \frac{\Delta\lambda_B}{4.66 \cdot 10^{-13} g_l \lambda^2} \quad (10)$$

NB : Ici nous avons pris le 7e bloc d'image sur les 14 blocs Nord-Sud. Le 7e bloc étant au centre du Soleil, nous avons logiquement $B_{//} = B \cos(\theta) = B$

C'est cette méthode qui donne les résultats les plus cohérents, si on se fie aux résultats trouvés dans la bibliographie [3]. En effet, avec cette méthode du centre de gravité, on peut relativement bien s'affranchir du bruit parasite grâce à la pondération des 2 raies et ainsi, obtenir une estimation très précise du champ magnétique.

Nous allons maintenant voir les résultats que donne cette méthode du centre de gravité.

B. Résultats et discussion

Grâce à l'équation (10) nous pouvons donc afficher grâce à notre logiciel, Mathematica, l'image dans laquelle chaque pixel correspondra à la valeur de $B_{//}$:

Cartographie du champ magnétique Solaire

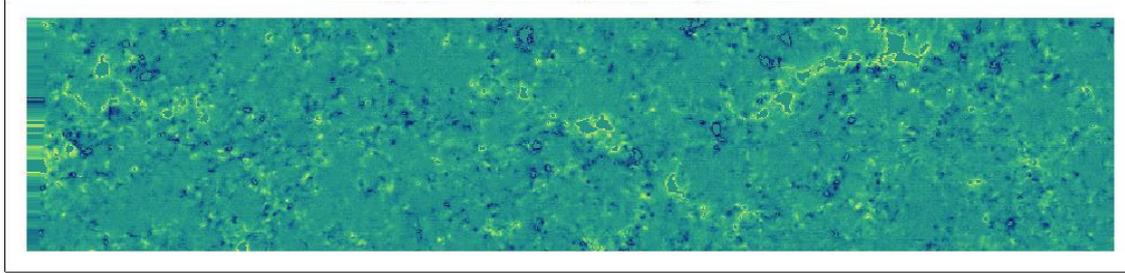


FIGURE 10 : LES CHAMPS POSITIFS (VERS NOUS) SONT VERT CLAIR ET LES NEGATIFS (VERS L'INTERIEUR DU SOLEIL) SONT BLEUS

Voici donc la cartographie du champ magnétique solaire sur le 7^e bloc d'image, c'est-à-dire lorsque l'on regarde « au milieu » du Soleil (en d'autres termes, $= 0$).

Ce que nous voyons immédiatement, sont les zones où le champ magnétique est rentrant (vers le centre du Soleil) et celles où le champ magnétique est sortant (vers la Terre).

En comparant cette cartographie aux images de polarisations obtenues dans le chapitre **II B**), on remarque immédiatement que les zones de champ magnétique sortant sont corrélées avec la polarisation circulaire V, du fait de la présence de motifs similaires.

En effet, cela est parfaitement en accord avec la théorie. En outre, on peut voir cela grâce à l'équation (5). Le champ magnétique longitudinal (et donc en l'occurrence le champ magnétique dans ce cas précis), est donc bel et bien relié à la polarisation circulaire.

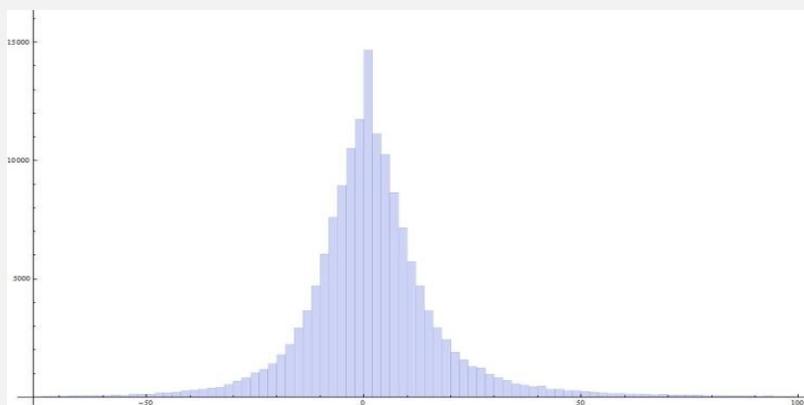


FIGURE 11 : HISTOGRAMME DES VALEURS DU CHAMP MAGNETIQUE

Ainsi, l'immense majorité des champs magnétiques est comprise entre ± 50 Gauss. Les champs positifs sont par convention les champs venant vers nous.

On trouve que la moyenne du champ magnétique est d'environ 6 Gauss (donc quasi nulle), ce qui indique qu'il y a quasiment autant de champs sortants que de champs rentrants.

Remarque pratique : ± 50 Gauss correspond à l'intensité du champ magnétique d'un aimant sur un réfrigérateur. [4]

Conclusion

Ainsi s'achève notre rapport au cours duquel nous avons tenté de présenter de façon succincte différentes méthodes de mesures de champ magnétique solaire à partir de modèles de physiques stellaires. Tout au long de notre cheminement, nous avons souvent été confrontés à différents problèmes. En effet, outre la compréhension générale du projet qui fut tout de même relativement complexe, il nous a fallu tout d'abord appréhender le langage de programmation Mathematica que nous avons fini par relativement bien maîtriser. Une fois notre projet bien cerné, nous avons pu avancer en acquérant au passage de nombreuses notions de physique. Nous avons aussi pu grâce à ce projet, pour la première fois, appliquer une réelle démarche scientifique. C'est-à-dire effectuer des mesures en s'appuyant sur des méthodes solides tout en gardant un esprit constamment critique en questionnant chacun de nos résultats. Ainsi, à travers cette façon de faire nous avons pu apprendre de nos erreurs afin d'obtenir des résultats totalement en accord avec la théorie.

Remerciements

Tout d'abord, nous souhaitons remercier le département de physique de nous avoir permis de réaliser ce projet. Ce fut pour nous l'occasion de gagner en expérience en nous permettant d'avoir une réelle immersion dans le monde de la recherche scientifique. Souvent les premiers arrivés à l'ouverture de 9h et souvent à partir vers 20h, on a souvent failli camper là-bas, on a même faillit nous enfermer.

Un grand Merci à Mme Doya, notre coordinatrice pour sa gentillesse, ainsi que pour ses cours de HTML.

Merci au laboratoire Fizeau de nous avoir accueilli ainsi que de nous avoir permis de mener notre projet de stage dans d'excellentes conditions. Un grand merci à Mr Gilbert Ricort de nous avoir prêté son bureau ainsi que pour ses conseils et de l'apprentissage du langage mathematica que nous avons eu à travers ses montagnes de codes.

Merci aux chercheurs du bâtiment Fizeau pour leur bonne humeur et leur gentillesse.

Nous tenons aussi à remercier énormément Anthony le post-doc alias The Best Guitarist pour tellement de choses dont ses conseils et son expérience qui ont vraiment été bénéfiques pour nous. Chaque Jeudi furent pour nous des journées riches en apprentissage.

Et bien sûr, un immense remerciement à Mme Marianne Faurobert pour tout ce temps qu'elle nous a accordé. Elle fût pour nous une encadrante exceptionnelle sans doute la meilleure que nous puissions avoir. Merci à elle d'avoir partagé sa passion et de nous l'avoir transmise.

Bibliographie

- [1] "*Stokes polarimetry of the Zeeman and Hanle effects*", Jan O.Stenflo.
- [2] "*Distribution of magnetic fields in the quiet Sun*", M. Faurobert and G. Ricort
- [3] "*Quiet-sun magnetic fields at high spatial resolution*", I. Dominguez Cerdeña and F. Kneer
- [4] "https://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Gauss_%28unit%29.html"