

# INTI

## Fiche de traitement : comment calculer un magnétogramme

---

### 1. Introduction

La mesure du champ magnétique est une possibilité très avancée de l'instrument Sol'Ex. Les données pour arriver à ce résultat peuvent être traitées depuis le logiciel INTI. Ce dernier automatise grandement les opérations et masque leurs complexités.

Pour tout savoir sur la manière d'observer le champ magnétique solaire, il est recommandé de visionner ce film : <https://www.youtube.com/watch?v=ux1rgkgdauY&t=2999s>

Pour simplement synthétiser, disons ici que la mesure du champ magnétique est un résultat indirect d'un effet, dit « effet Zeeman ». En présence d'un champ magnétique depuis l'endroit où la lumière est émise les raies spectrales se dédoublent. C'est l'effet Zeeman. Son amplitude est directement proportionnelle à la force du champ magnétique, ce qui permet la mesure. Nous pouvons même relever la polarité de ce champ. Précisément nous observons ici la composante verticale des lignes de force du champ magnétique.

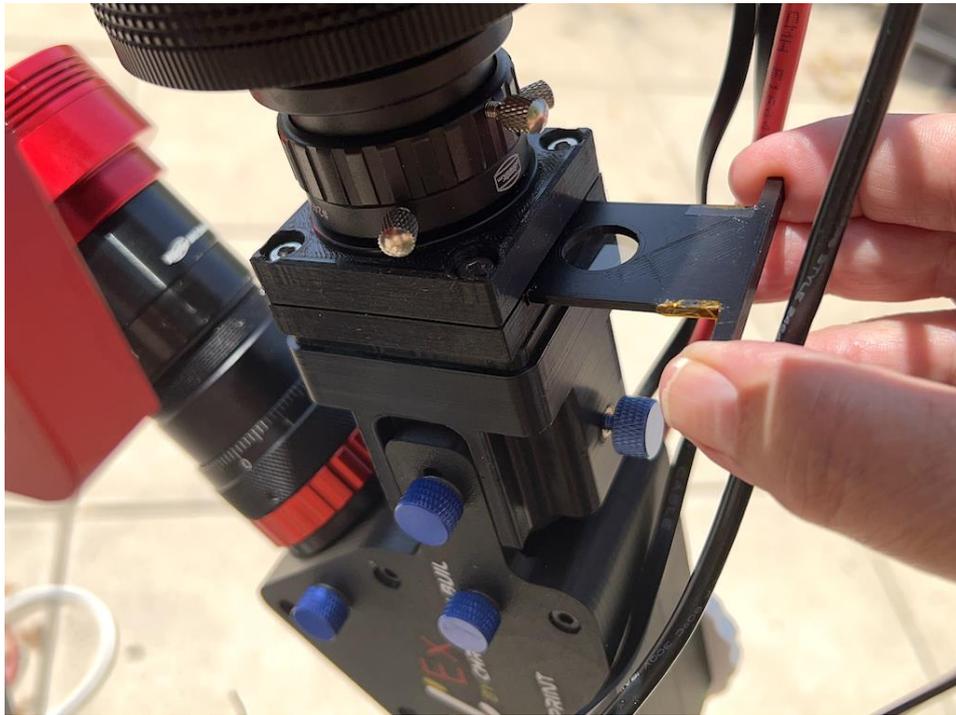
Ce dédoublement Zeeman est très petit, son observation à la limite des capacités de Sol'Ex, mais c'est ici une belle expérience de physique à réaliser. Qui plus est, les résultats obtenus, par rapport à des instruments professionnels, parfois embarqués sur des satellites, se révèlent finalement fort convaincants.

### 2. L'acquisition des données

Concrètement, pour faciliter la mesure du dédoublement des raies, il nous faut réaliser deux séries de balayages (scan) du disque solaire en disposant à l'avant de la fente des filtres spéciaux, dont le but est d'isoler les polarisations circulaires droite et gauche dans la lumière (voir la vidéo citée précédemment). Ces filtres sont très faciles à obtenir à partir de lunette de vision que l'on récupère à la fin de la projection d'un film 3D dans votre salle préférée.

C'est donc au minimum deux fichiers SER qu'il faut réaliser sur la lunette en pointant le Soleil : l'un en plaçant devant la fente un filtre qui isole la polarisation circulaire droite, l'autre la polarisation

circulaire gauche. Cette photographie montre le dispositif d'insertion d'un filtre devant la fente (une sorte de fente, faisant office de tiroir à filtres) :

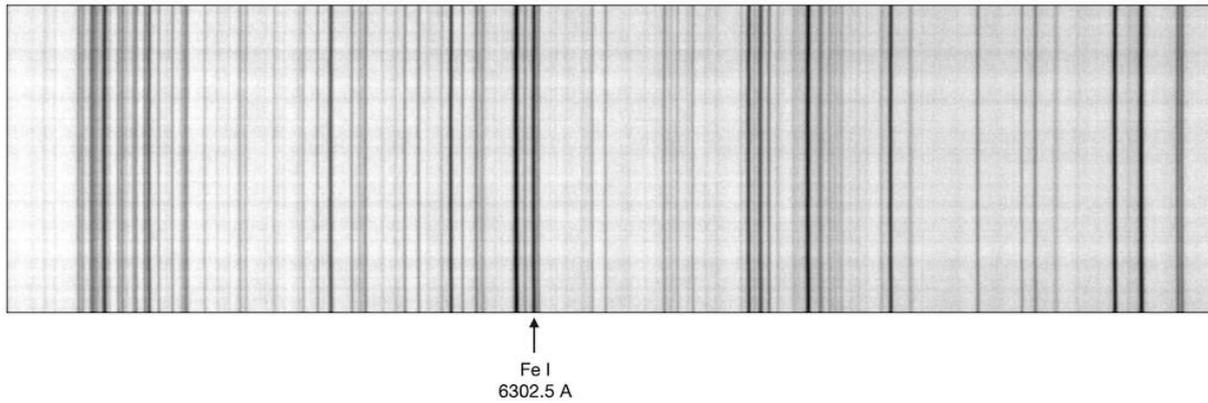


Pour le reste, les observations se font d'une manière tout à fait traditionnelle, en balayant le disque solaire pour obtenir une image bien ronde. Une précaution tout de même : les filtres polarisants utilisés sont sensibles à une élévation de température. Il importe donc de disposer à l'avant de la lunette une densité neutre assez forte, dans notre cas une densité ND16 HOYA, qui offre toutes les garanties. Mais par mesure de précaution supplémentaire, nous ajoutons en amont, vissé au coulant de l'interface de Sol'Ex, un classique filtre 1 ¼ pouce de réjection UV/IR (UV/IR cut). Noter que les hélioscopes d'Herschel sont impropres à la mesure de l'effet Zeeman.

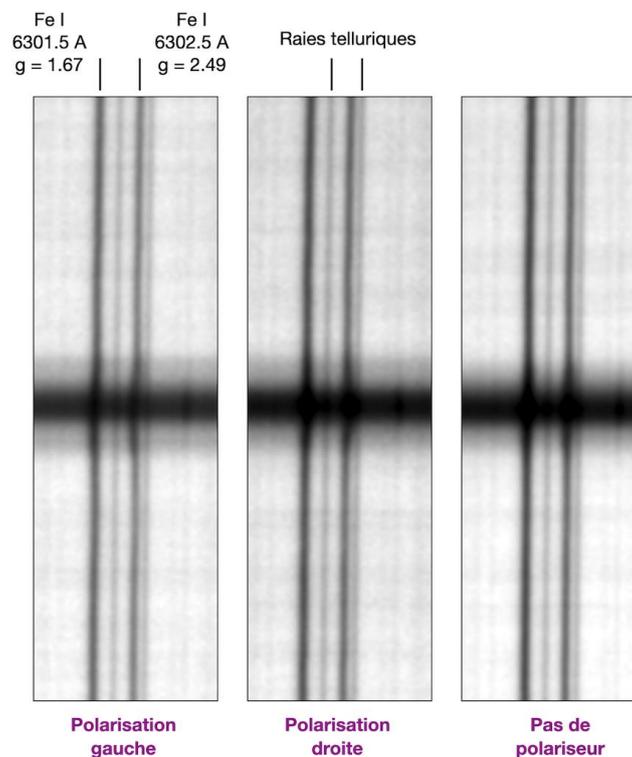
L'effet Doppler induit par la rotation du Soleil provoque un déplacement des raies qui nuisent à la qualité de l'observation du champ magnétique lorsqu'on réalise le scan suivant l'axe des ascensions droites. La version d'INTI (V5.0) discuté ici ne dispose pas d'une correction dynamique du déplacement des raies entre les bords est et ouest du Soleil. Pour cette raison, et même si ce n'est pas rédhibitoire, il est conseillé de réaliser les balayages suivant l'axe des déclinaisons équatoriales.

Les raies spectrales ne sont pas toutes sensibles de la même manière au champ magnétique. Cette sensibilité est déterminée par le facteur de Lande de la raie. Si le facteur est de 0, la raie n'est pas sensible, s'il est de 2,5, la sensibilité est maximale. Pour une qualité optimale dans le résultat final, il nous faut choisir une raie qui à la fois réagit bien au champ magnétique et qui est bien profonde et contrastée.

Un choix classique, y compris chez les professionnels, pour construire un magnétogramme, c'est-à-dire une image du champ magnétique longitudinal de la surface solaire, est une raie du fer située à la longueur d'onde de 6302,5 Å. Elle est indiquée par une flèche dans l'extrait de spectre suivant :



Le document suivant montre un détail de cette région du spectre solaire :



La présence d'une tache, un lieu où le champ magnétique est élevé, montre comment la raie du fer à 6302,5 A (mais aussi sa voisine à 6301,5 A) se déforme suivant le sens de la polarisation circulaire sélectionnée en changeant le filtre (rotation droite ou gauche). C'est cette information qui permet de remonter à la valeur du champ magnétique. L'inconvénient du choix de la raie à 6302 A est la présence de raies telluriques, produites donc par l'atmosphère terrestre, qui varient dans le temps et qui sont une source de signal parasite.

D'une manière générale, les déformations de raies étant discrètes, d'autant plus que le champ magnétique est de faible force, il est recommandé de travailler en binning 1x1 avec votre caméra d'acquisition (mais l'auteur a aussi obtenu des résultats corrects en binning 2x2, donc il n'y a pas de règle absolue).

### 3. Le traitement avec INTI

Supposons que nous disposons d'un jeu de deux fichiers SER, l'un associé à la polarisation droite, nommé « 07\_12\_26.ser », l'autre à la polarisation gauche, appelé « 07\_24\_04.ser ».

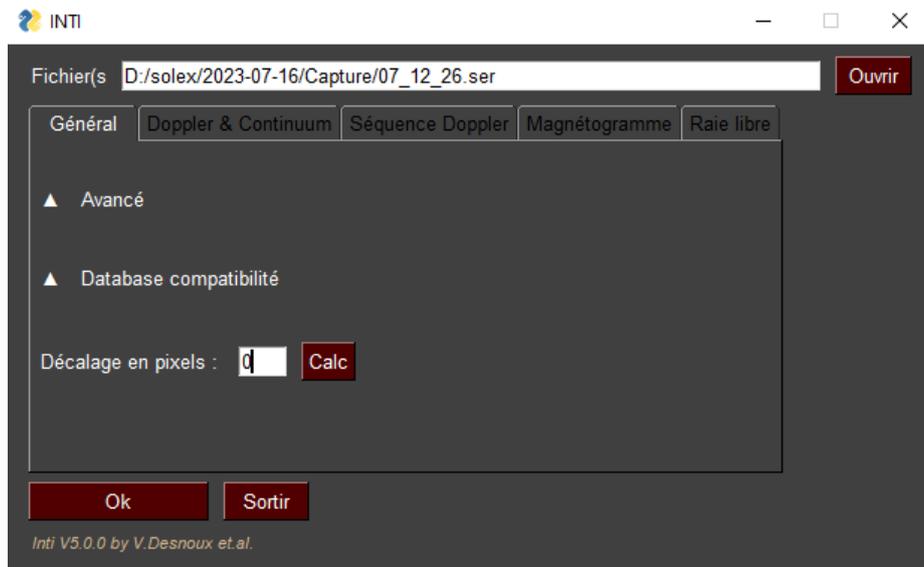
Nous nous occupons en premier de la polarisation droite.

Voici un extrait d'une des trames constituant le fichier 07\_12\_26.ser :

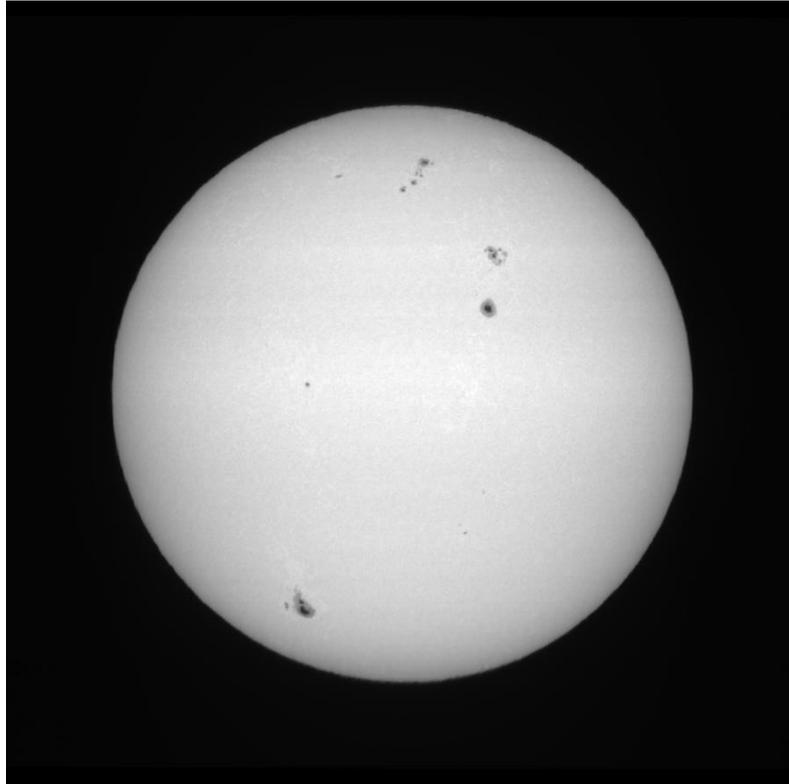


On reconnaît nos deux raies du fer, proches du centre. L'acquisition a ici été faite avec une caméra ASI462MM (pixels de 2,9 microns, binning 1x1).

Dans INTI, on se positionne sur l'onglet « Général », on sélectionne le fichier 07\_12\_26.ser, puis Ok :



Dans cette situation, INTI va extraire une image du Soleil tout à fait banale en s'appuyant sur la raie la plus profonde qu'il trouve dans notre film SER, en l'occurrence ici la raie située à la longueur d'onde 6301,5 Å (donc pas notre raie visée, notez le bien). Voici par exemple le contenu du fichier 07\_12\_26\_recon.fits (on a ici utilisé une lunette Askar FRA300 pour la prise de vue) :



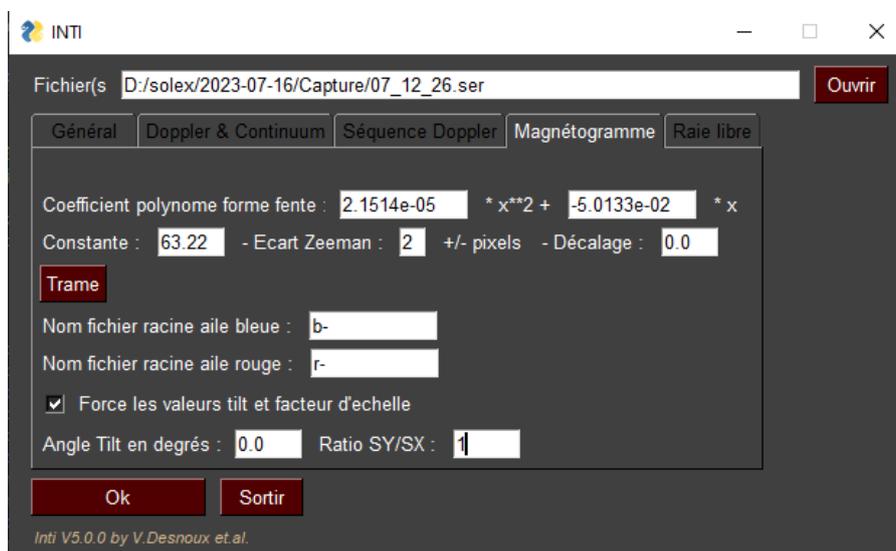
A ce niveau, relever dans le terminal de sortie (ou dans le fichier 07\_12\_26\_log.txt) les coefficients de déformation de la raie spectrale utilisée :

```
SER date local : "2023-07-16T07:12:26.9540997"
Mean Image - Vertical limits y1,y2 : 222 1690
Coef a*x2,b*x,c : 2.1514e-05 -5.0133e-02 63.22
Noise reduction option
```

On note bien les valeurs :

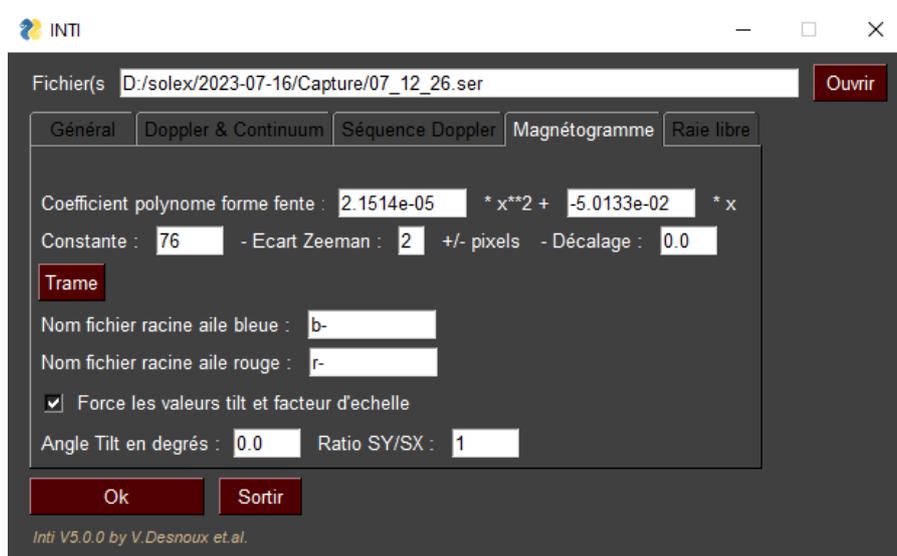
$$2.1514E-5 * X^2 - 5.0133. E-2 * X + 63.22$$

Ouvrez l'onglet « Magnétogramme » et entrez les valeurs du polynôme que nous venons juste de calculer, ce qui donne :

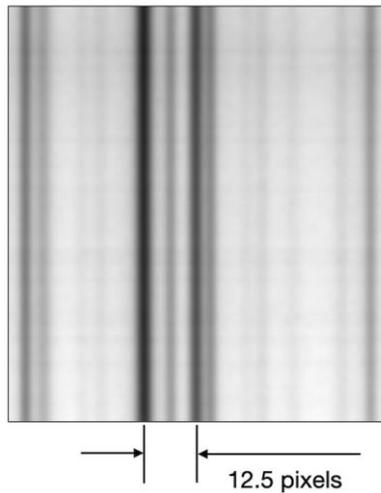


Mais attention ici, la constante  $c = 63,22$  définit la position de la raie Fe I 6301.5 A, pas celle de la raie 6302.5 A. Il nous faut donc apporter une correction à cette constante, égale à l'écart en pixels entre ces deux raies. C'est la partie sensible du traitement. Il y a de nombreuses façons pour trouver cet écart et ainsi corriger la constante afin de pointer sur la bonne raie.

Une façon expéditive consiste à cliquer sur le bouton « Trame ». On sélectionne ensuite dans la liste proposée le fichier 07\_12\_26\_mean.fits. On rappelle que le contenu de ce fichier est la moyenne de toutes les trames du fichier SER traité depuis l'onglet « Général ». En plus, INTI réalise une correction géométrique des raies à partir des coefficients du polynôme que nous venons de fournir, si bien qu'elles apparaissent bien rectilignes (astuce : si elles ne sont pas rectilignes, c'est que vous vous êtes trompés dans la transcription des valeurs numériques, c'est un moyen de contrôle). Cliquer avec la souris quelque part sur la raie du fer à 6302.5 A, nous trouvons alors par exemple  $x = 76$  (la valeur s'affiche en haut de l'image). En fermant l'image, la valeur de 76 pixels est automatiquement copiée dans le champ de la constante :

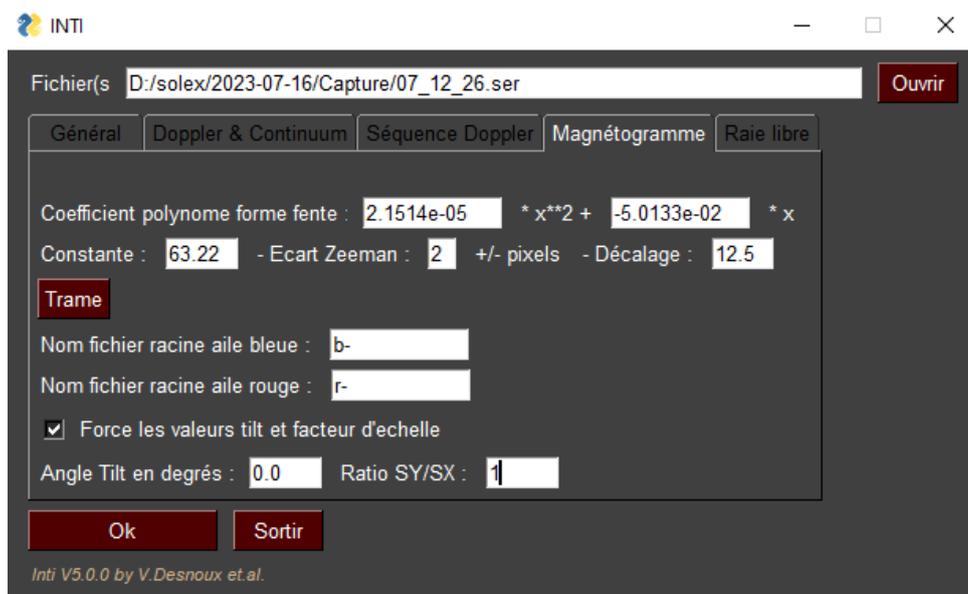


Pendant, notre travail sur la mesure de l'effet Zeeman demande tellement de précision qu'on ne peut pas se contenter d'une évaluation de la position de la raie d'intérêt à un pixel près. Il faut être plus fin et travailler à une fraction de pixel près. Vous pouvez pour cela par exemple utiliser un logiciel de traitement d'images capable d'effectuer des affichages en zoomant pour un relevé précis (ISIS par exemple). Voici ce que l'on trouve alors pour notre exemple :



La valeur de la constante pour la raie située à 6301,5 A étant  $c = 63,22$ , la valeur à adopter pour la raie à 6302,5 A est  $c = 63,22 + 12,5 = 75,72$ .

Vous pouvez aussi conserver la valeur initiale de la constante, mais appliquer un décalage de 12,5 pixels dans l'onglet « Magnétogramme », ce qui est souvent plus lisible, et ce qui donne :



Il y a en fait une autre façon de retrouver cette valeur de 12,5 pixels, sans sortir d'INTI, puissante et rigoureuse. On profite du fait que le centre d'une raie est l'endroit où l'énergie lumineuse est minimale. C'est aussi à cet endroit que l'image reconstruite du disque solaire sera la moins intense, relativement à ce que l'on va trouver dans les ailes de la raie.

Or cette intensité du disque (moyenne au centre) est systématiquement retournée par INTI à la fin de chaque traitement. C'est la valeur « Intensité moyenne » qui s'affiche dans la console. Il est dès lors facile de trouver le « minimum » de la raie de manière itérative en testant plusieurs valeurs du décalage, 12,4, 12,5, 15,6... Vous allez obligatoirement aboutir à une valeur minimale, avec la valeur du décalage recherchée.

Nota : à chaque test d'une nouvelle valeur du décalage, vous pouvez aussi examiner l'image xxxx\_recon.fits, générée avec la valeur courante. Par exemple noter son aspect et son intensité globale par exemple son intensité globale.

Le plus dur est fait : nous avons trouvé la valeur précise en pixels séparant la raie de référence (la plus sombre) et la raie d'intérêt. Soulignons que ce paramètre est une constante de votre instrument. La prochaine fois que vous faites une observation du champ magnétique, vous n'avez pas à refaire ces opérations. Retenez simplement la valeur du décalage et tout va aller très vite.

Vos observations peuvent être exploitées. Nous commençons avec la polarisation droite en faisant :



Que fait INTI ?

Le logiciel va d'abord charger votre fichier SER, puis extraire l'image du disque en utilisant les paramètres du polynôme fourni, et éventuellement en ajoutant un décalage (ici de 12,5 pixels). Tout en bas de la boîte de dialogue, nous forçons les paramètres géométriques de l'image (tilt est facteur de forme), même s'ils ne sont pas tout à fait exacts en valeur, de manière que le traitement d'une suite de fichier SER soit toujours identique.

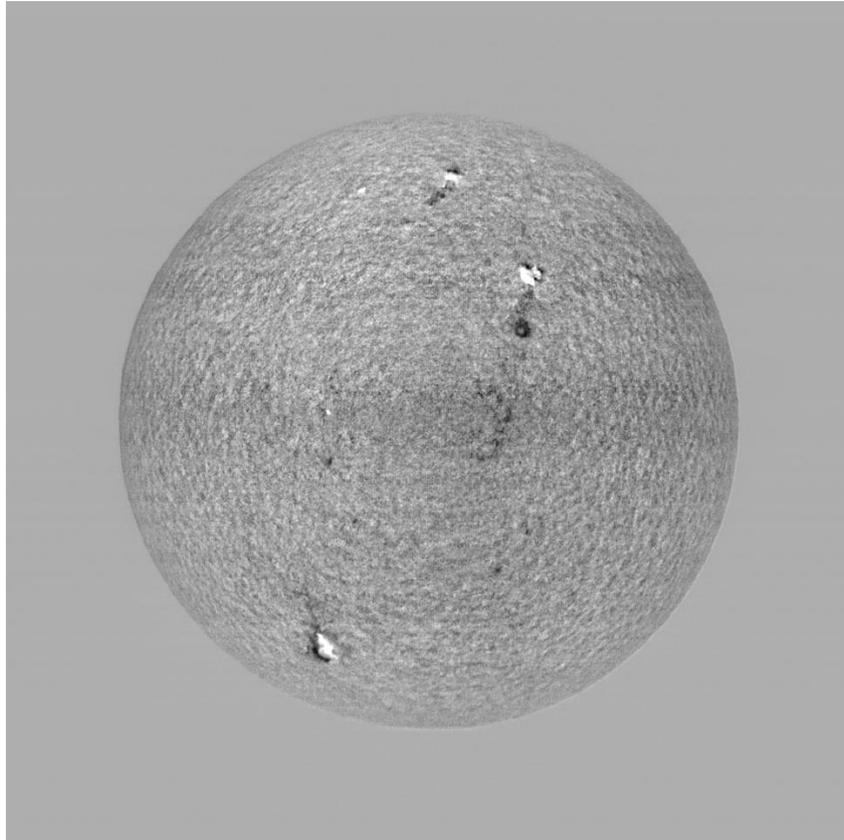
Le travail d'INTI consiste ensuite à sortir deux images du disque solaire en se positionnant à une certaine distance de part et d'autre de la longueur d'onde visée (ici le cœur de notre raie du fer). Dans l'exemple, INTI génère une image en décalant la longueur d'onde vers le bleu de 1 pixel (b), et une seconde image en décalant la longueur d'onde de 1 pixel vers le rouge. Ce sont de très petits écarts, nous sommes donc encore dans les flancs de notre raie du fer, mais ce sont les subtiles variations dans ces ailes de raie qui vont nous donner l'information sur le champ magnétique, via l'effet Zeeman. Normalement l'écart Zeeman est de +/- 1 pixel (ce qui demande de très bonnes images), ou +/- 2 pixels, avec une meilleure tolérance pour les défauts dans les données, mais aussi une sensibilité plus basse au champ magnétique.

Nous décidons que l'image du Soleil extraite du flanc bleu de la raie Fe à 6302, écrite dans le dossier des fichiers SER, va s'appeler « droite\_b-1.fits », alors que pour le flanc rouge, elle s'appelle « droite\_r-1.fits ».

Comprenez bien ces désignations et la constitution du nom racine : (b) ou (r) identifie le flanc de raie (bleu ou rouge), alors que (droite) identifie le sens de polarisation isolée par le filtre polarisant circulaire.

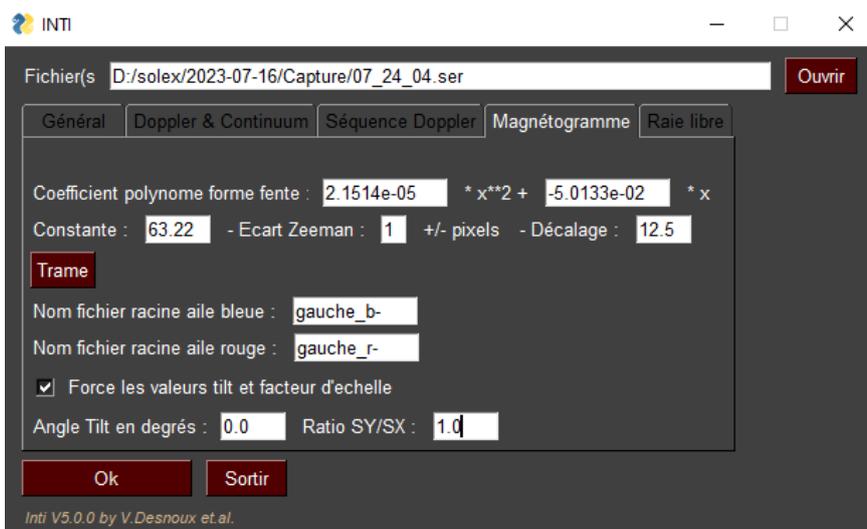
Vous pouvez bien sûr traiter plusieurs fichiers simultanément en les sélectionnant au préalable. Vous obtenez une séquence d'images, comme droite\_b-1.fit, droite\_b-2.fit, droite\_b-3.fit...

Il est instructif à ce stade d'examiner la différence entre les images associées aux ailes bleu et rouge de notre raie. INTI réalise cette opération pour vous. Le fichier image correspondant est « 07\_12\_26\_diff.fits ». Voici son contenu :

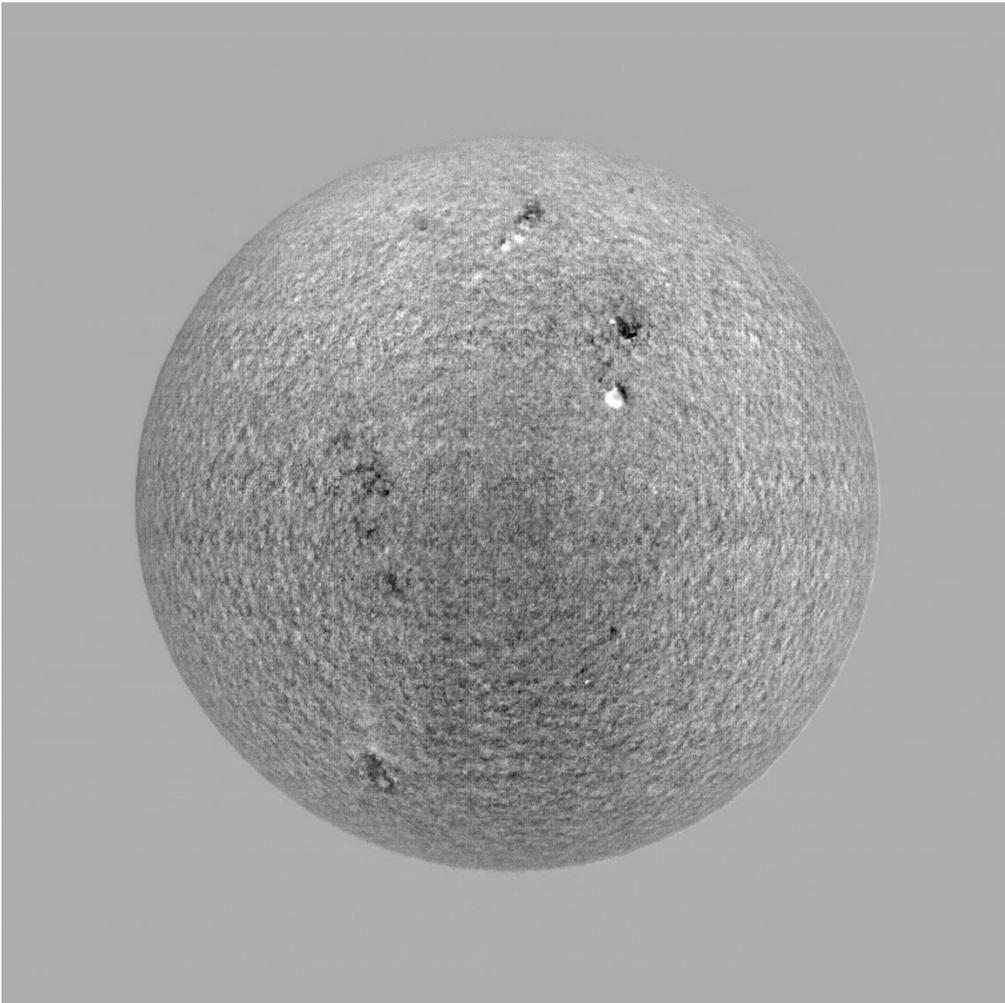


L'image n'est pas habituelle. Elle contient déjà une information sur le champ magnétique solaire. Elle montre en particulier la bipolarité de ce champ avec un codage en noir ou en blanc.

Procédons de la même manière avec le fichier SER associée à la prise de vue isolant la polarisation circulaire gauche :



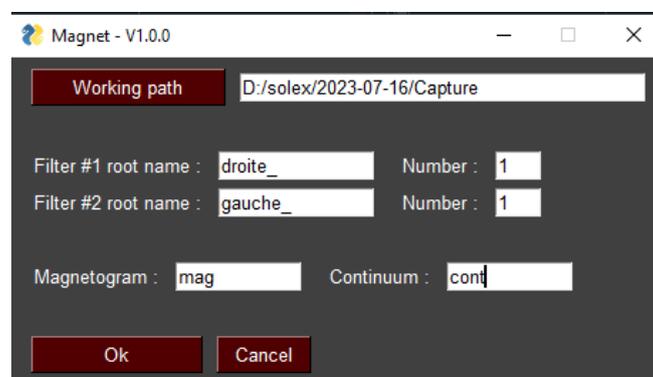
Et voici l'image différence associée :



Elle apparaît différente, en particulier le signe des polarités change.

Le travail d'INTI est à présent achevé. Nous avons sur notre disque les images : droite\_b-1, droite\_r-1, gauche\_b-1, gauche\_r-1. Il reste à les combiner pour extraire le vrai champ magnétique solaire.

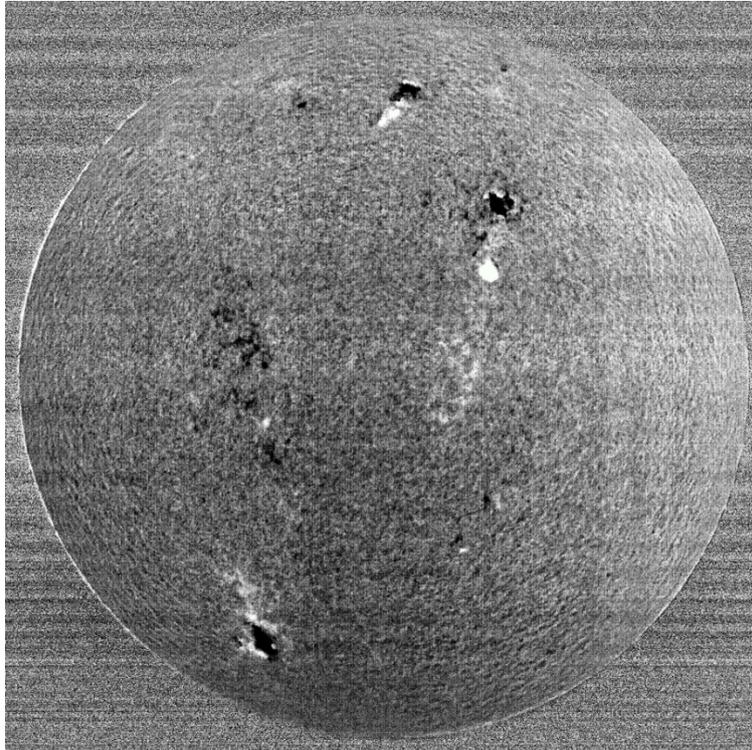
Nous utilisons pour cela un petit utilitaire que vous allez trouver dans la distribution INTI : magnet.exe. Lancez l'application et remplissez les champs de cette manière :



Remarquez que nous n'avons pas indiqué (b) et (r) dans les noms racines, l'utilitaire va les ajouter pour vous lorsqu'il en aura besoin. Ici nous n'avons qu'un seul jeu d'images, mais nous pourrions en avoir bien plus et dans ce cas Magnet calcule une moyenne (INTI formate les données de manière

intelligente en utilisant un support de même taille et en centrant systématiquement le disque solaire, les opérations sont donc faciles). Cliquez sur Ok.

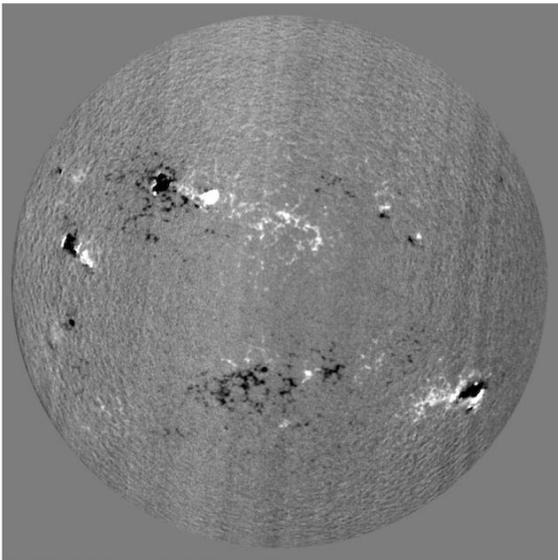
En une fraction de seconde vous disposez de l'image du champ magnétique (mag.fits) et de l'image du continuum solaire pour vérification (cont.fits). Vous pouvez bien entendu choisir ici d'autres noms. Voici l'aspect de l'image mag.fits à partir d'un seul couple de fichiers SER :



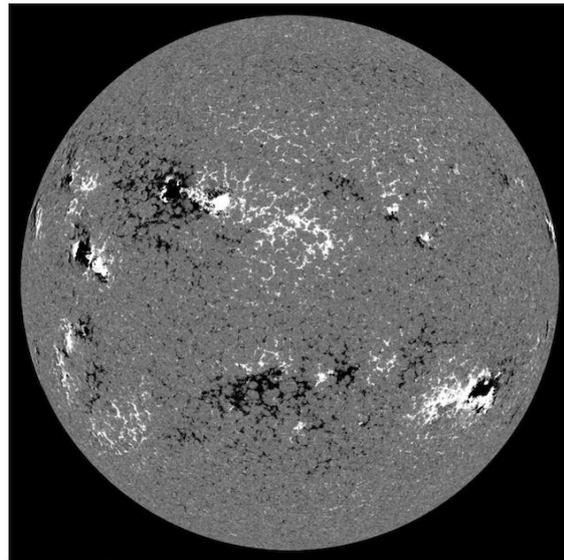
Et le résultat en moyennant 10 couples de balayages réalisés à la suite (on fait 10 scans avec la polarisation circulaire droite puis juste après, 10 scans avec la polarisation circulaire gauche). On compare notre résultat avec une image HMI après avoir correctement orienté l'image du disque (axe des pôles vertical) :

**Sol'Ex magnetogram - 2023/07/16**

Askar FRA 300 refractor - ND16 density  
ZWO AM5 mount - scan 20x sidéral along declinaison  
ASI462MM camera at bin 1x1 - Exposure : 4.30 ms  
Christian Buil - Antibes (France)



**Sol'Ex (Solar Explorer) Fe I 6302A line magnetogram**



**HMI (Helioseismic and Magnetic Imager - SDO)**