

Les oscillations de cinq minutes du Soleil observées avec un spectrohéliographe amateur

Cédric Champeau

Version de travail du 16 septembre 2026

Résumé. La surface du Soleil vibre : elle monte et descend avec une période voisine de cinq minutes. Nous montrons ici que ces vibrations peuvent être mesurées depuis le sol avec un spectrohéliographe amateur et une lunette de 102 mm. Le 15 septembre 2026, 336 balayages du disque solaire ont été enregistrés en six heures dans une raie du fer. Le logiciel JSol'Ex reconstruit les images et mesure, en chaque point de la surface, la vitesse de la matière le long de la ligne de visée. En classant ces mouvements selon leur rythme et selon leur taille, on obtient un diagramme où la puissance se concentre le long de lignes étroites : chacune correspond à une famille de vibrations, et c'est la signature attendue des ondes sonores piégées sous la surface. Six de ces lignes sont séparées, et leurs fréquences sont compatibles avec celles mesurées depuis l'espace par le satellite SOHO. Cette détection et cette identification ne dépendent d'aucune correction instrumentale. Une imperfection du suivi de la monture, qui décale légèrement le contenu des images, est ensuite mesurée puis corrigée : les lignes deviennent plus nettes, sans que leurs fréquences changent. Une bande supplémentaire apparaît près de l'endroit attendu pour une autre famille d'ondes, dite mode f, mais sa position ne correspond pas aux mesures publiées ; sa nature reste à établir.

1 Introduction

En 1962, Leighton, Noyes et Simon [1] ont découvert que la surface du Soleil oscille, avec une période d'environ cinq minutes. Ils mesuraient ce mouvement grâce à l'effet Doppler : quand une région de la surface se rapproche de nous, la lumière qu'elle émet est légèrement décalée vers le bleu, et vers le rouge quand elle s'éloigne.

Ulrich [2] a expliqué ces oscillations : ce sont des ondes sonores, piégées dans les couches situées sous la surface, qui résonnent comme le son dans un instrument de musique. Une conséquence importante de cette explication est que toutes les combinaisons de rythme et de taille ne sont pas possibles. Seules certaines le sont, comme un tuyau d'orgue ne produit que certaines notes. Si l'on trie les mouvements de la surface selon leur rythme, c'est-à-dire leur fréquence, et selon leur taille, c'est-à-dire la distance entre deux crêtes de l'onde, la puissance ne se répartit donc pas au hasard : elle se concentre le long de lignes étroites, appelées crêtes. Chaque crête correspond à une famille d'ondes qui sondent l'intérieur du Soleil à des profondeurs caractéristiques différentes.

Deubner [3] a observé ces lignes pour la première fois en 1975. Il en distinguait trois ou quatre. Les observations spatiales ont ensuite été bien plus loin, avec le satellite SOHO [4], puis avec Hinode [5].

Depuis le sol, la turbulence de l'atmosphère terrestre brouille les détails fins et limite ce que l'on peut voir [6]. Les spectrohéliographes amateurs, dérivés du Sol'Ex, enregistrent en chaque point du disque la forme complète d'une raie du spectre solaire, avec une qualité reconnue par les observatoires professionnels [7]. Ils donnent donc accès à la vitesse de la matière en chaque point. La question posée ici est simple : un tel instrument, sur une monture amateur et par un ciel ordinaire, permet-il de

retrouver les crêtes de Deubner et de les identifier en les comparant aux mesures spatiales ?

Deux grandeurs suffisent pour lire le diagramme. La première est la **fréquence**, exprimée en millihertz : 3 mHz correspond à une oscillation toutes les 333 secondes, soit un peu plus de cinq minutes. La seconde est le **degré**, noté ℓ : c'est le degré harmonique, qui caractérise la taille des structures à la surface : plus il est élevé, plus les ondes sont petites. Au degré 800, une onde complète mesure environ 5 500 km, soit 2 700 km d'une crête au creux voisin, à comparer au rayon solaire de 696 000 km. Cette correspondance entre taille et degré est celle de Gizon et Birch [8].

2 Instrument et observations

2.1 Instrument

Tableau 1. – Instrument.

Élément	Caractéristique
Lunette	SVBony SV48P, 102 mm, focale 663 mm
Spectrohéliographe	MLAstro SHG 700, fente de 7 μ m
Caméra	G3M678M, binning 1 $\times$ 1
Monture	MLAstro SAL-33, à réducteurs harmoniques
Taille d'un pixel sur le Soleil	0,69 seconde d'arc, soit 503 km au centre du disque
Dispersion	un pixel du spectre correspond à une vitesse de 5 737 m/s

La raie choisie est celle du fer neutre à 5434,5 Å. Son facteur de Landé effectif est très faible, ce qui la rend peu sensible aux champs magnétiques dans les conditions ordinaires de la photosphère et limite le risque de confondre un effet magnétique avec un mouvement ; des effets Zeeman y restent toutefois mesurables dans les champs les plus intenses, au cœur des taches [9]. Elle a déjà servi

à étudier les ondes de la surface solaire [10]. Elle est suffisamment large pour être échantillonnée par plus de trois pixels du spectre, ce qui est nécessaire pour mesurer précisément sa position.

2.2 Observations

Trois séances ont été enregistrées, les 13, 14 et 15 septembre 2026 : 270, 154 et 336 balayages retenus, pour des durées de 4,5 h, 2,4 h et 6,0 h. Plus une séance est longue, plus les fréquences voisines s'y distinguent : la résolution passe ainsi de 114 microhertz le 14 septembre à 46 le 15. Une séance préliminaire, le 12 septembre, avait servi à mettre au point le protocole ; elle n'est pas exploitée ici. Tout ce qui suit porte sur la seule séance du 15 septembre, la plus complète et la mieux résolue ; les deux autres ne servent que de contrôle, pour vérifier qu'on y retrouve les mêmes crêtes.

Cette séance a eu lieu le 15 septembre 2026, de 07:49 à 13:49 UTC, à Montaigu-Vendée, en France. Chaque balayage du disque est enregistré dans un fichier vidéo distinct, dont l'en-tête fournit l'heure précise. Dix-huit balayages sur 354 ont été écartés après examen visuel des images reconstruites, parce qu'ils présentaient un défaut manifeste : géométrie faussée, artefacts, ou ondulation visible à l'œil sur le disque (Fig. 1).

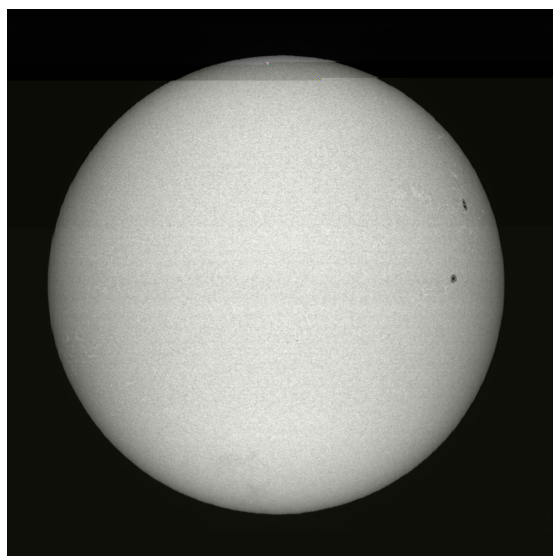


Fig. 1. – Exemple d'image reconstruite par JSol'Ex : le disque solaire dans la raie du fer, balayage du 15 septembre 2026 à 10:04 UTC. C'est sur des images de ce type qu'a été faite la vérification visuelle. La zone analysée est le carré central, de 830 pixels de côté.

Tableau 2. – Observations du 15 septembre 2026.

Grandeur	Valeur
Balayages	336 retenus sur 354 enregistrés
Volume des balayages retenus	1,37 To
Durée	6 h
Intervalle entre balayages	58,4 s avant le retournement au méridien, 66,1 s après
Exposition	0,41 à 0,55 ms, ajustée entre balayages pour un niveau de signal constant
Gain analogique	100
Région d'intérêt	3 088 × 128 px, 16 bits, à 322,6 images/s
Hauteur du Soleil	20° à 46°
Seeing	jugé médiocre

La monture a été retournée au méridien entre 12:15 et 12:22 UTC. Ce retournement inverse l'image selon un axe ; JSol'Ex le compense à la reconstruction.

3 Traitement des données

3.1 Un traitement fait dans JSol'Ex

Tout se fait dans JSol'Ex 5.5.0, en un seul traitement par lot. La 5.5.0 est une version de développement, non encore publiée au moment de l'analyse ; l'auteur de cet article est le développeur du logiciel. La référence citée est donc la 5.4.2 [11], dernière version archivée. Le code source est public et la 5.5.0 sera archivée à sa publication. Pour chaque balayage, le logiciel repère la raie dans la vidéo, reconstruit les images du disque, ajuste le contour du Soleil par une ellipse, corrige l'inclinaison et la différence d'échelle entre les deux axes de l'image, et applique le retournement. L'analyse elle-même est un script Python exécuté par l'interpréteur intégré à JSol'Ex : il reçoit les images reconstruites et leurs informations de prise de vue, puis calcule les vitesses, le diagramme et les figures. L'analyse scientifique ne demande aucun autre logiciel : la reconstruction des images, la mesure des vitesses et la production du diagramme se font entièrement dans JSol'Ex. C'est ce qui la rend abordable pour un amateur.

L'acquisition s'est faite sur un mini PC sous Windows avec le logiciel SharpCap et un script d'acquisition automatique en Python. Cette machine n'étant pas particulièrement puissante, les fichiers ont été traités sur un ordinateur distinct. Le traitement des 354 fichiers, calcul du diagramme compris, a duré 2 h 30 sur un ordinateur équipé d'un processeur AMD Ryzen 9 9950X (16 cœurs, 32 fils d'exécution) et de 128 Go de mémoire vive, sous Linux Mint 22.3, les fichiers étant lus sur un disque SSD externe relié en USB.

3.2 Images et zone analysée

Pour chaque balayage, JSol'Ex reconstruit non pas une mais neuf images, prises à neuf positions voisines dans la raie : quatre d'un côté du centre de la raie, le centre, et quatre de l'autre côté. Ces neuf images donnent, en chaque point du disque, la forme de la raie.

L'analyse porte sur un carré de 830 × 830 pixels centré sur le disque, soit 417 000 km de côté. Cette conversion

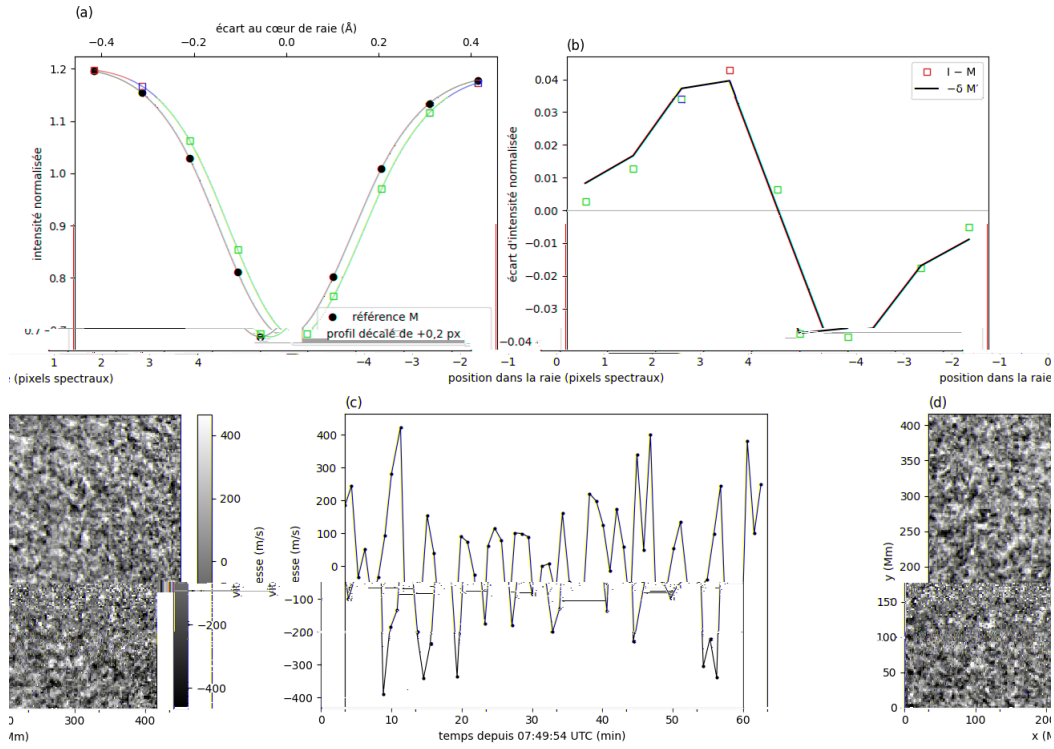


Fig. 2. – Mesure de la vitesse par effet Doppler, 15 septembre 2026. (a) Forme moyenne de la raie et la même forme légèrement décalée. (b) Différence entre les deux, qui sert à mesurer le décalage. (c) Vitesse moyenne d'un petit carré au centre de la zone pendant la première heure : l'oscillation de cinq minutes s'y voit directement. (d) Carte des vitesses d'un balayage.

en kilomètres utilise l'échelle au centre du disque ; c'est une approximation, acceptable ici parce que la zone reste proche du centre, où la surface est vue de face. Ce choix suit les travaux de Gizon et Birch [8], qui montrent qu'une zone centrée sur le disque suffit pour obtenir un bon diagramme.

Sur six heures, la rotation du Soleil déplace suffisamment la surface pour qu'il faille en tenir compte : sans cela, on comparerait des régions différentes d'un balayage à l'autre. Comme la granulation n'est pas résolue et que le centre du disque ne présente aucun détail stable, la zone ne peut pas être recalée sur les images elles-mêmes. Elle est donc suivie par le calcul : JSol'Ex fournit la position du disque dans chaque image, et le déplacement dû à la rotation est calculé avec la loi de Snodgrass et Ulrich [12].

3.3 Mesure des vitesses

Le principe est de comparer, en chaque point, la forme de la raie observée à un instant donné à sa forme moyenne sur toute la séance (Fig. 2).

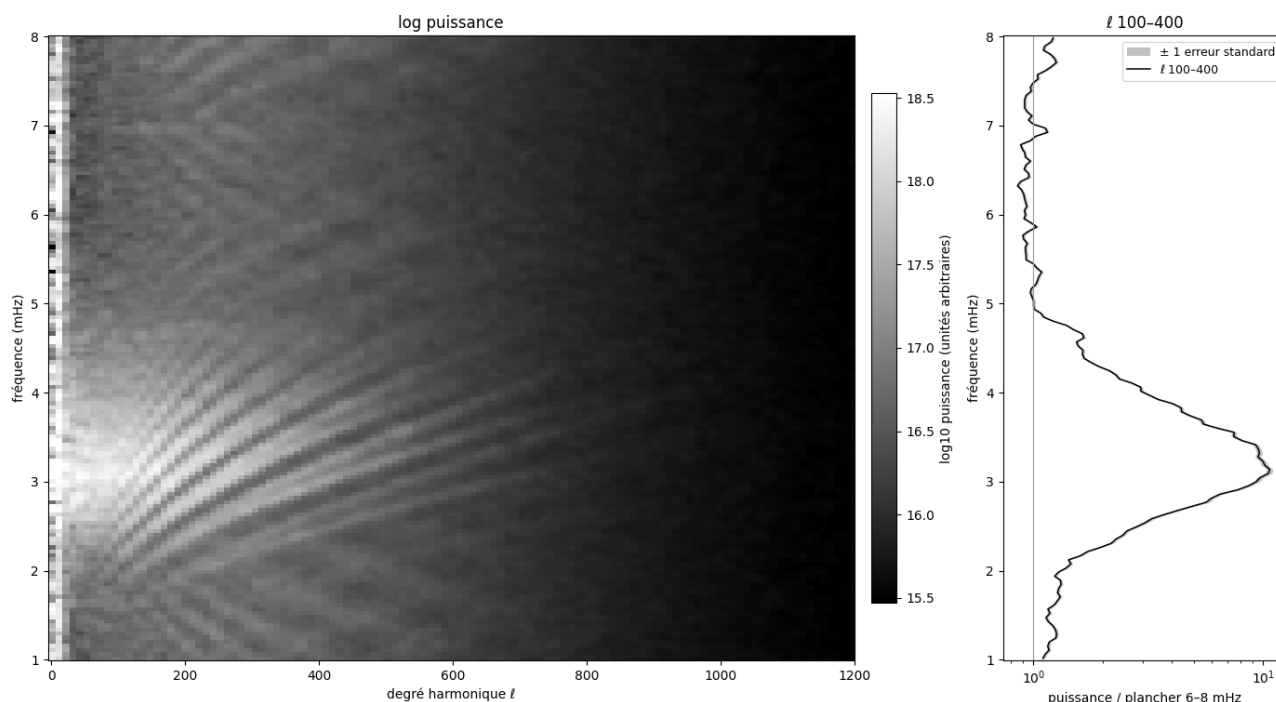
La forme de la raie. Les neuf images donnent neuf mesures de luminosité qui dessinent le creux de la raie. On les divise par leur moyenne, ce qui efface les variations d'éclat dues à la transparence du ciel, au temps de pose ou à l'assombrissement du disque vers le bord. Il ne reste que la forme.

La référence. Pour chaque point du disque, on calcule la forme moyenne de la raie sur les 336 balayages. Cette moyenne contient tout ce qui ne change pas au cours de la séance, comme les défauts propres à ce point de l'image. En comparant chaque mesure à la référence du même

point, ces défauts s'annulent d'eux-mêmes, sans qu'il faille les modéliser.

Le décalage. Un mouvement de la surface décale la raie en longueur d'onde. Ce décalage est très petit : une vitesse de 300 m/s ne déplace la raie que d'un vingtième de pixel. On ne peut donc pas le lire directement, mais on peut le déduire de la différence entre la raie observée et la raie de référence. Cette différence est proportionnelle au décalage recherché, et sa mesure utilise les neuf points à la fois, ce qui la rend beaucoup plus précise qu'un seul pixel (Fig. 2 b). Le décalage est ensuite converti en vitesse.

Restent les dérives lentes, qui ne viennent pas du Soleil. Pour chaque balayage, on retire la valeur médiane de l'image entière, ce qui élimine ce qui affecte toute l'image à la fois. Pour chaque point, on retire ensuite sa valeur moyenne et une droite ajustée par moindres carrés sur les six heures. Retirer une droite unique sur toute la série n'affecte que les variations plus lentes qu'une oscillation par séance, très loin en dessous des fréquences étudiées ici. Le bruit de mesure vaut 212 m/s pour un pixel et un balayage ; il est estimé par la dispersion d'un balayage au suivant, c'est-à-dire l'écart-type de la différence entre deux cartes de vitesse consécutives, ramené à une seule carte. En moyennant sur des carrés de 5×5 pixels, il tombe à 42 m/s, alors que la vitesse mesurée varie encore de 166 m/s, soit près de quatre fois le bruit : la variation est donc largement détectable dans ces données (Fig. 2 c). Son origine solaire, elle, ne se déduit pas de cette seule comparaison ; elle repose sur les résultats qui suivent.



Cédric Champeau · 15 septembre 2026, 07:49-13:49 UTC · MLAstro SHG 700 · SVBony SV48P 102, 102/663 mm · G3M678M · raie 5434,53 Å

Fig. 3. – Le diagramme : la puissance des mouvements en fonction du degré, en abscisse, et de la fréquence, en ordonnée. Plus une zone est claire, plus le mouvement correspondant est puissant. À droite, la puissance moyenne pour les degrés 100 à 400, avec son incertitude.

3.4 Du cube de vitesses au diagramme

À ce stade, on dispose de 336 cartes de vitesse, une par balayage : un film de la surface, pris toutes les minutes pendant six heures. Il faut maintenant trier ces mouvements par taille et par rythme.

Le tri par taille se fait sur chaque carte séparément. C'est une décomposition en ondulations : on cherche quelle part du mouvement se présente sous forme de grandes ondulations, et quelle part sous forme de petites. Le calcul utilisé est la transformée de Fourier, un outil standard qui décompose une image en ondulations de tailles et d'orientations différentes.

Le tri par rythme se fait ensuite, en suivant chaque taille d'ondulation d'un balayage au suivant. Une difficulté se présente ici : les balayages ne sont pas régulièrement espacés dans le temps, et l'intervalle change même au cours de la séance. Plutôt que de les ranger de force sur un calendrier régulier, ce qui reviendrait à leur attribuer une heure fautive, chaque balayage est utilisé à l'heure exacte où il a été pris. Les balayages du début et de la fin de la séance comptent un peu moins que ceux du milieu, ce qui évite de créer des artefacts aux extrémités de la série, et chacun est pondéré selon la durée qu'il représente.

Le résultat est le diagramme recherché : pour chaque taille d'ondulation et chaque rythme, la puissance du mouvement correspondant. Concrètement, chaque balayage est projeté sur des sinusôides de fréquences croissantes, évaluées à son heure réelle et affectées de son poids : c'est une transformée de Fourier pondérée, calculée aux instants d'observation plutôt que sur une grille régulière. Les fréquences examinées sont les multiples de l'inverse de la durée de la séance, soit des multiples de 46

microhertz : c'est la résolution en fréquence de la série. À l'autre extrémité, l'intervalle d'environ une minute entre balayages fixe la fréquence la plus élevée accessible, dite de Nyquist : 8,6 millihertz avant le retournement au méridien, 7,6 après. Le niveau de fond, que nous mesurons entre 6 et 8 millihertz, s'en approche, ce qui invite à la prudence près de 8. Enfin, comme les ondes vont dans toutes les directions, on moyenne les puissances sur toutes les orientations d'une même taille d'ondulation. L'incertitude donnée pour chaque point du diagramme est l'erreur standard de cette moyenne, c'est-à-dire l'écart-type des valeurs moyennées divisé par la racine de leur nombre. C'est une incertitude statistique sur la puissance moyenne, et non une précision globale de la mesure.

4 Résultats

Les figures et les valeurs de cette section proviennent du traitement décrit ci-dessus, sans autre correction. La section 5 présente le gain obtenu en corrigeant le défaut de suivi de la monture.

4.1 Le diagramme

La Fig. 3 montre le diagramme obtenu, et la Fig. 4 le même diagramme avec des repères ajoutés.

Le diagramme montre bien ce que prédisait Ulrich : la puissance n'est pas répartie au hasard, mais concentrée le long de lignes. Elle culmine à 3,14 mHz, soit une oscillation toutes les 5 minutes et 18 secondes. Entre 2,5 et 4 mHz, elle est près de sept fois plus forte que le niveau de fond mesuré entre 6 et 8 mHz.

Au-dessus de 5 mHz, la puissance chute et atteint un plancher vers 5,5 mHz. Cette valeur est de l'ordre de la fréquence de coupure acoustique de la photosphère : au-

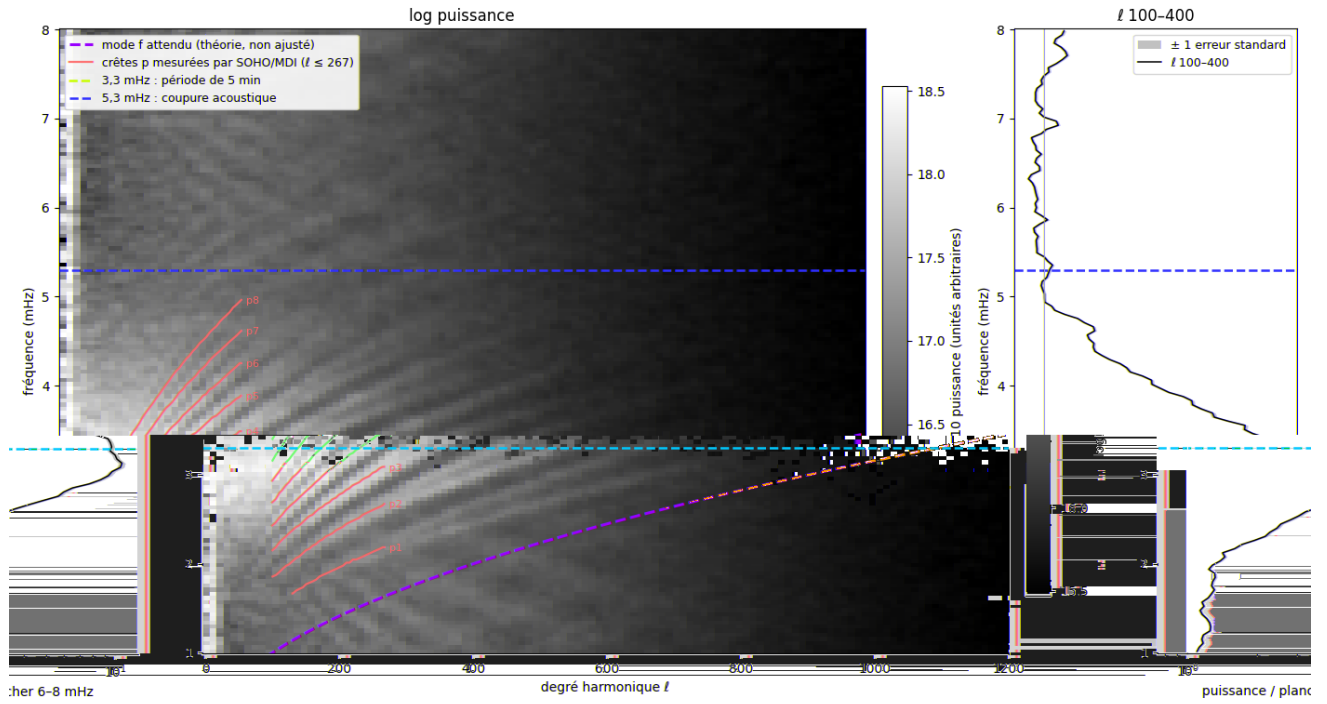


Fig. 4. – Même diagramme avec des repères. En orange, la position théorique du mode f , calculée sans aucun ajustement à partir de la relation des ondes de gravité de surface donnée par Gizon et Birch [8], avec la gravité à la surface du Soleil et son rayon pour seules constantes. En vert, les crêtes relevées sur un diagramme publié du satellite SOHO [13], construit à partir des mesures du programme medium- ℓ de MDI [14]. Les droites marquent 3,3 et 5,3 mHz.

delà, les ondes se propagent davantage vers les couches supérieures au lieu de rester confinées dans la cavité où elles résonnent.

4.2 Les crêtes et leur comparaison avec l'espace

Des crêtes séparées sont visibles du degré 100 au degré 800 environ. La fréquence de chaque crête n'est pas simplement lue à l'endroit du maximum : on ajuste une courbe sur les cinq points qui entourent ce maximum, ce qui situe le sommet plus finement qu'un point du spectre et fournit son incertitude. Ces valeurs sont comparées aux crêtes d'un diagramme publié du satellite SOHO (Tableau 3). L'incertitude indiquée ne concerne que notre mesure ; le relevé des crêtes de SOHO sur une figure publiée a sa propre imprécision, de quelques dizaines de microhertz.

Tableau 3. – Fréquences des six crêtes, en millihertz, avec leur incertitude, comparées aux valeurs relevées sur le diagramme de SOHO.

Crête	Degré 199	SOHO	Degré 252	SOHO
p1	$1,916 \pm 0,044$	1,96	$2,094 \pm 0,008$	2,14
p2	$2,381 \pm 0,009$	2,39	$2,604 \pm 0,010$	2,61
p3	$2,763 \pm 0,003$	2,77	$3,016 \pm 0,008$	3,03
p4	$3,131 \pm 0,004$	3,14	$3,392 \pm 0,009$	3,41
p5	$3,458 \pm 0,004$	3,47	$3,786 \pm 0,006$	3,79
p6	$3,800 \pm 0,007$	3,79	$4,139 \pm 0,051$	4,16

L'accord est le résultat le plus solide de ce travail. Les écarts vont de $-0,046$ à $+0,010$ mHz : dix des douze crêtes tombent à moins de 21 microhertz de la valeur de SOHO, soit moins d'une demi-case de résolution. Les deux écarts les plus grands, p1 au degré 199 et p6 au degré 252, sont aussi ceux dont le sommet est le moins net, avec des incertitudes de 44 et 51 microhertz. Il ne repose sur

aucun réglage : l'échelle des fréquences vient uniquement de l'heure des fichiers, et l'échelle des tailles uniquement du rayon du disque mesuré en pixels. Deux séances plus courtes, les 13 et 14 septembre, montrent les mêmes crêtes, avec une précision moindre faute de durée.

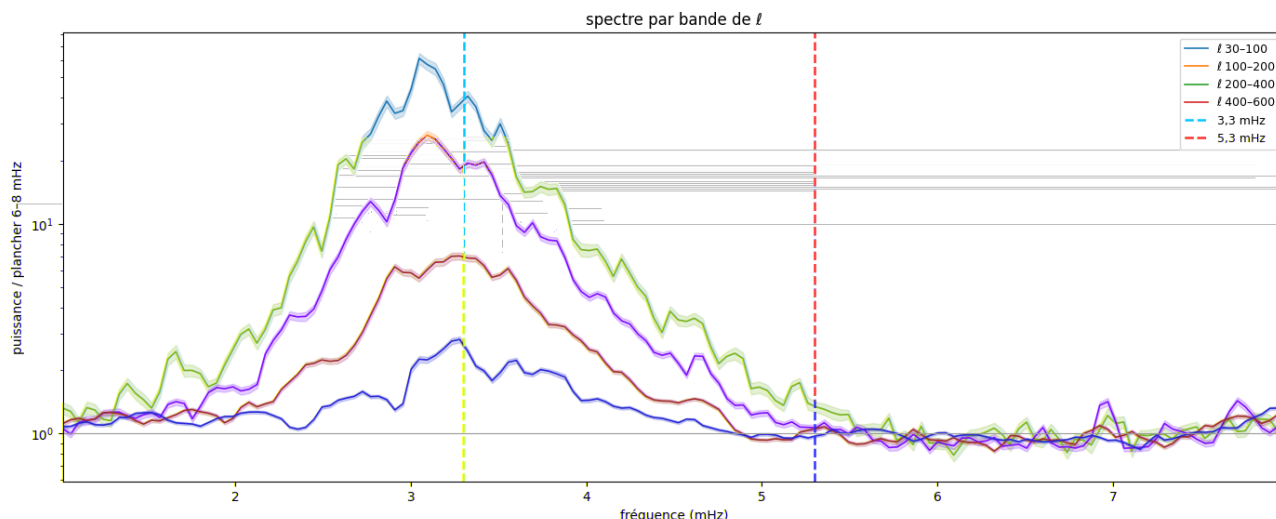
4.3 Comparaison aux fréquences publiées

La comparaison précédente repose sur une lecture de figure. Le projet MDI publie aussi ses fréquences sous forme de listes de nombres, ajustées directement sur ses spectres [15]. Ces listes ne descendent malheureusement pas assez loin dans les petites ondes pour couvrir les degrés 199 et 252 : au degré 199 elles ne contiennent que la première crête, et au degré 252 aucune. La comparaison est donc reprise au degré 126, où les six crêtes sont tabulées (Tableau 4).

Tableau 4. – Nos six crêtes au degré 126, comparées aux fréquences publiées par MDI. Les fréquences sont en millihertz, les écarts en microhertz.

Crête	Valeur publiée	Notre mesure	Écart
p1	$1,6441 \pm 0,0003$	$1,659 \pm 0,004$	+15
p2	$2,0072 \pm 0,0008$	$2,027 \pm 0,005$	+20
p3	$2,3404 \pm 0,0014$	$2,347 \pm 0,005$	+7
p4	$2,6356 \pm 0,0024$	$2,635 \pm 0,004$	-1
p5	$2,9201 \pm 0,0038$	$2,927 \pm 0,009$	+6
p6	$3,1902 \pm 0,0041$	$3,175 \pm 0,010$	-15

L'écart moyen est de 11 microhertz, soit le quart de la résolution de notre série. La même comparaison donne 16 au degré 147 et 25 au degré 168. Au degré 105, en revanche, nos fréquences sont systématiquement trop hautes, de 41 en moyenne.



Cédric Champeau · 15 septembre 2026, 07:49-13:49 UTC · MLastrO SHG 700 · SVBony SV48P 102, 102/663 mm · G3M678M · raie 5434,53 Å

Fig. 5. – Puissance moyenne en fonction de la fréquence, pour quatre gammes de degré. Les zones colorées représentent l'incertitude.

4.4 Les ondes les plus petites s'effacent

La Fig. 5 compare la puissance des oscillations pour quatre gammes de tailles.

Tableau 5. – Le contraste des oscillations chute quand les ondes deviennent plus petites.

Gamme de degré	Puissance des oscillations, rapportée au fond
30-100	$28,0 \pm 0,4$
100-200	$13,8 \pm 0,1$
200-400	$4,79 \pm 0,04$
400-600	$1,90 \pm 0,01$

La puissance des oscillations, rapportée au fond, est environ quinze fois plus faible pour les degrés 400 à 600 que pour les degrés 30 à 100. Deux causes se cumulent, sans que ces données permettent de les séparer : la turbulence de l'atmosphère terrestre, qui brouille les détails les plus fins, et le pouvoir de résolution de l'instrument, qui les atténue. C'est la limite principale d'une observation faite depuis le sol, et elle explique que le degré 800 constitue ici la limite pratique de détection des crêtes.

4.5 Des anneaux plutôt que des crêtes

Si l'on choisit une fréquence et que l'on regarde toutes les directions à la fois, chaque crête devient un anneau (Fig. 6). Le rayon de l'anneau donne la taille des ondes, et les anneaux concentriques correspondent aux familles successives. Ils sont nets entre 2,5 et 3,5 mHz, et plus diffus à 4 mHz.

4.6 Le mode f

Il existe une autre famille d'ondes, appelée mode f. Ce ne sont pas des ondes sonores mais des ondes de surface, comparables aux vagues sur l'eau. Leur position théorique est tracée en orange sur la Fig. 4 ; aucune crête ne la suit. Une bande de puissance est toutefois visible juste en dessous, du degré 250 au degré 900 : elle est examinée en section 6.

5 Une imperfection de la monture, mesurée puis corrigée

5.1 L'origine du problème

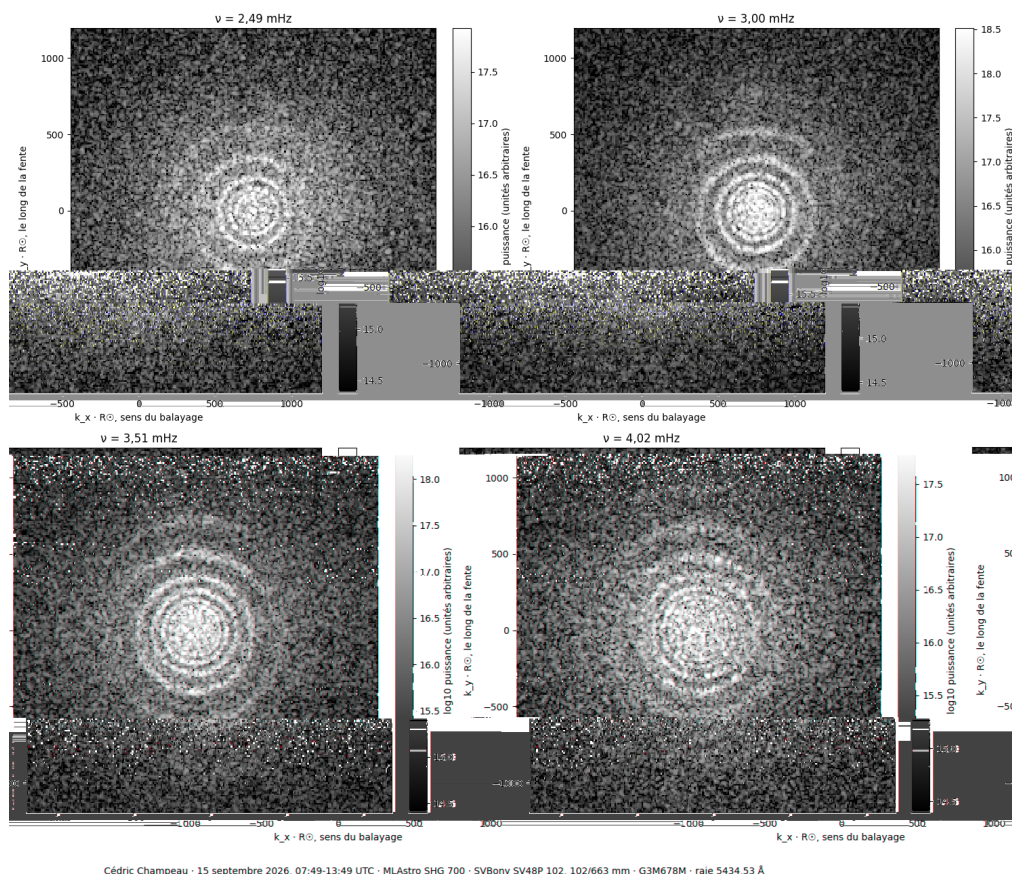
La monture entraîne le télescope pour compenser la rotation de la Terre, mais elle le fait avec une petite irrégularité qui se répète toutes les 430 secondes, d'une amplitude d'environ 16 secondes d'arc. Le constructeur a confirmé cette période et cette amplitude.

Pendant l'enregistrement d'un balayage, cette irrégularité fait légèrement varier la vitesse à laquelle l'image du Soleil défile devant la fente. JSol'Ex corrige l'échelle moyenne de chaque balayage et recentre le disque, mais il reste une déformation qui décale le contenu de l'image de quelques pixels, différemment d'un balayage à l'autre. Les cartes de vitesse successives se trouvent donc légèrement décalées entre elles, ce qui brouille les crêtes.

5.2 La correction

Elle s'applique aux cartes de vitesse déjà calculées, sans reprendre le traitement des vidéos, et prend quelques minutes. Elle se fait en trois temps.

1. **Mesurer.** On compare chaque carte de vitesse à la précédente pour déterminer de combien son contenu a glissé. La mesure est faite dans quatre bandes réparties le long du balayage, car le glissement n'est pas le même partout. Les cartes de vitesse conviennent bien à cette mesure, car elles sont riches en détails, contrairement aux images ordinaires du disque.
2. **Modéliser.** On ne conserve, dans ces mesures, que ce qui se répète aux rythmes propres à la monture : 431,6 secondes et deux rythmes plus rapides qui en découlent. Tout le reste est ignoré, ce qui évite de corriger autre chose que la monture. Le modèle rend compte de 29 à 73 % du glissement observé selon les bandes, et le glissement ainsi reconstitué atteint 6 pixels avant le retournement au méridien, et 13 pixels après (Fig. 7 a).
3. **Corriger.** Chaque carte de vitesse est remise en place selon ce modèle, puis le diagramme est recalculé.



Cédric Champeau · 15 septembre 2026, 07:49-13:49 UTC · MIAstro SHG 700 · SVBony SV48P 102, 102/663 mm · G3M678M · raie 5434,53 Å

Fig. 6. – Vue du diagramme à quatre fréquences fixes. Chaque image montre la puissance selon la direction et la taille des ondes ; le centre correspond aux plus grandes ondulations. L'axe horizontal est le sens du balayage, l'axe vertical celui de la fente.

Pour s'assurer que le gain vient bien de la monture et non du hasard, la même correction a été appliquée à des balayages tirés au sort. Si la méthode améliorerait les choses par un effet de pure construction, ce témoin s'améliorerait aussi.

5.3 Le résultat

Tableau 6. – Effet de la correction, comparé au témoin tiré au sort.

Mesure	Avant	Après	Témoin
Puissance le long des crêtes de SOHO, rapportée au fond	0,234	0,258	0,211
Netteté des crêtes, degrés 200 à 600	11,7	13,7	9,8
Netteté des crêtes, degrés 600 à 800	2,9	3,2	2,3
Puissance des oscillations, degrés 100 à 400	6,8	9,9	5,5

La correction améliore toutes les mesures, tandis que le témoin tiré au sort les dégrade (Tableau 6). Ce résultat est cohérent avec un gain dû à la correction du mouvement périodique de la monture. Il porte surtout sur les ondes qui se propagent dans le sens du balayage, c'est-à-dire précisément la direction où la monture agit. Sur le diagramme, des motifs obliques qui n'ont aucun sens physique s'estompent (Fig. 7 b et c).

Le contraste des oscillations augmente de moitié (Tableau 7), tandis que les fréquences des crêtes ne bougent pas plus que la résolution en fréquence : la correction rend le diagramme plus net sans déplacer ce qu'il contient. Leur

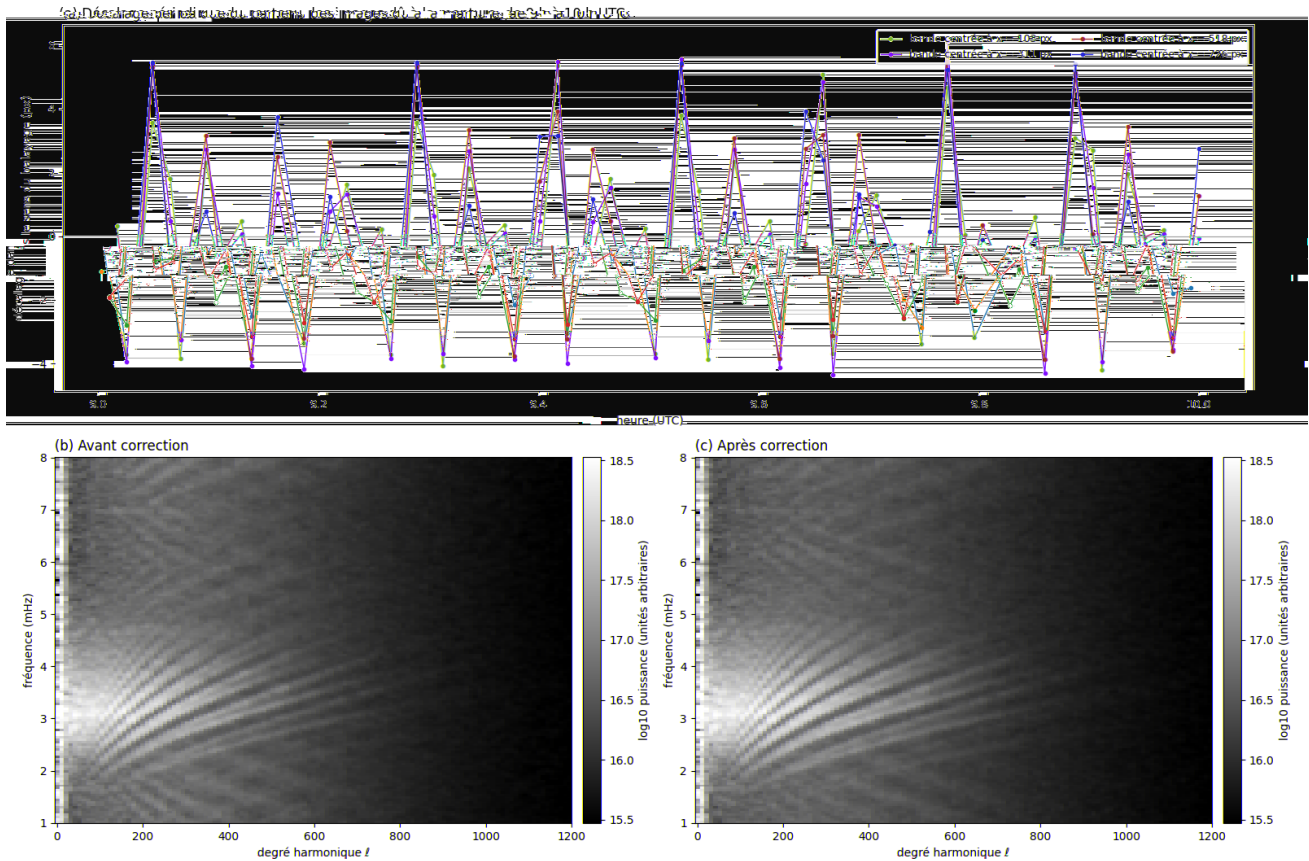
accord avec SOHO s'améliore même, l'écart le plus grand passant de 46 à 24 microhertz.

6 Une bande proche du mode f

La Fig. 8 agrandit la région du mode f. Une bande de puissance y est nettement visible du degré 250 au degré 900. Sa pente est proche de celle de la courbe théorique du mode f, mais elle est systématiquement décalée vers les basses fréquences : 4 % plus bas vers le degré 300, et 8 % plus bas vers le degré 900. Elle est présente avant comme après la correction de la monture, et se retrouve sur les séances des 13 et 14 septembre.

Cette bande ne correspond pas au mode f tel qu'il est mesuré. Les fréquences publiées par MDI [15] vont jusqu'au degré 300 : le mode f s'y trouve de 0,7 à 1,2 % *au-dessus* de la courbe théorique, soit une douzaine de microhertz, et jamais en dessous. Plus loin encore, il reste à quelques microhertz de la théorie jusqu'au degré 700, et passe 13 microhertz en dessous au degré 880 [16]. Notre bande, elle, est plus de dix fois plus basse. Les variations du mode f au fil du cycle d'activité solaire ne l'expliquent pas non plus : elles valent quelques centièmes de microhertz, soit une variation du rayon du Soleil d'environ 5 km [17], très loin des dizaines de microhertz mesurées ici.

Cet écart n'est toutefois pas le même partout. Vers le degré 300, il vaut 69 microhertz, à peine plus que la largeur de la bande elle-même : à cet endroit, la bande reste compatible avec le mode f. Vers le degré 750, il atteint 195



Cédric Champeau · 15 septembre 2026, 07:49-13:49 UTC · MLAstro SHG 700 · raie 5434,53 Å

Fig. 7. – Correction de l'irrégularité de la monture. (a) Glissement reconstitué du contenu des images, pour les quatre bandes, entre 9 h et 10 h UTC. (b) Diagramme avant correction. (c) Après correction, avec la même échelle de gris.

Tableau 7. – Les mêmes mesures avant et après correction.

Mesure	Sans correction	Après correction
Fréquence du maximum	$3,14 \pm 0,05$ mHz	$3,14 \pm 0,05$ mHz
Puissance des oscillations, degrés 100 à 400	$6,79 \pm 0,04$	$9,86 \pm 0,06$
Puissance juste sous la limite de piégeage	$1,87 \pm 0,01$	$2,34 \pm 0,01$
Contraste, degrés 30 à 100	$28,0 \pm 0,4$	$33,3 \pm 0,5$
Contraste, degrés 100 à 200	$13,8 \pm 0,1$	$19,5 \pm 0,2$
Contraste, degrés 200 à 400	$4,79 \pm 0,04$	$7,21 \pm 0,05$
Contraste, degrés 400 à 600	$1,90 \pm 0,01$	$2,62 \pm 0,01$
Écart des crêtes aux valeurs de SOHO	$-0,046$ à $+0,010$ mHz	$-0,024$ à $+0,007$ mHz

microhertz, soit quatre fois la résolution en fréquence, et l'écart devient net. La nature de cette bande reste donc à établir.

7 Discussion

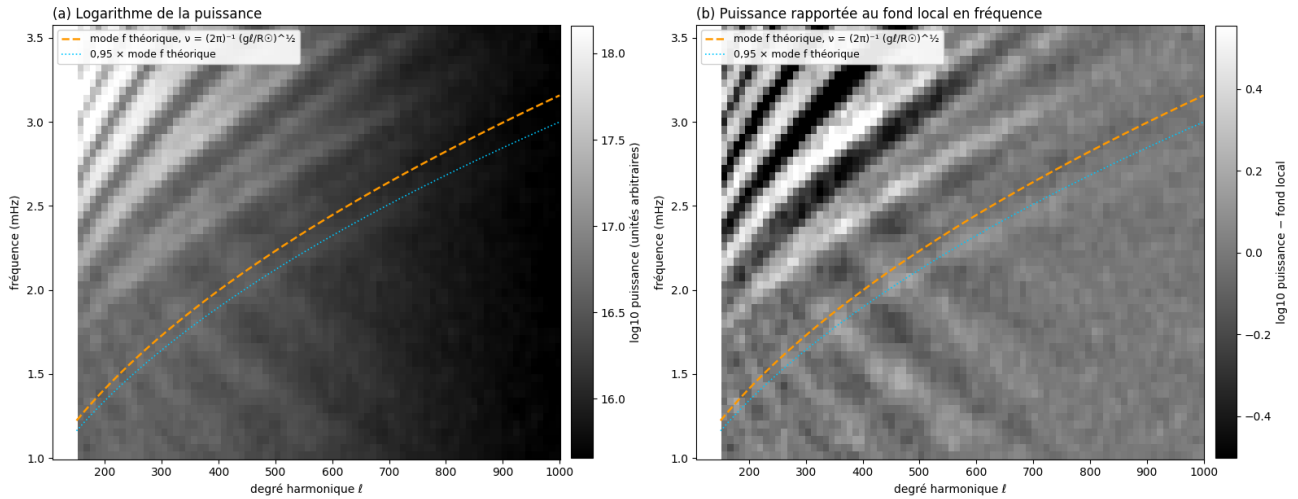
7.1 Comparaison avec les observations au sol

Deubner [3] distinguait trois ou quatre crêtes depuis le sol ; le diagramme présenté ici en sépare six, et permet de les identifier par comparaison avec SOHO.

Que le mode f n'apparaisse pas clairement n'est pas surprenant. Gizon et Birch [8] comparent deux diagrammes obtenus au même moment, l'un depuis l'espace avec SOHO, l'autre depuis le sol avec le réseau TON, dans des conditions proches de celles de ce travail : la crête du mode f y est nettement plus faible vue du sol. Avec une lunette de 102 mm et un ciel médiocre, son absence est cohérente avec ce que montrent les observations au sol publiées.

7.2 Limites

- **La turbulence atmosphérique.** Le mode f se distingue surtout parmi les petites ondes, c'est-à-dire précisément là où la turbulence efface le plus la puissance.
- **La correction de la monture.** Elle ne traite que le glissement dans le sens du balayage, avec trois rythmes et quatre bandes. Le glissement est mesuré sur les données que l'on corrige ensuite ; le témoin montre que le gain vient bien de la monture, mais on ne peut pas exclure qu'une petite part de signal solaire aux mêmes rythmes ait été affectée.
- **Les valeurs de référence aux degrés 199 et 252.** Elles ont été relevées sur une figure publiée, faute de listes de fréquences couvrant ces degrés : on repère où passent les crêtes sur l'image, et on convertit leur position grâce aux graduations des axes. La précision d'une telle lecture est du même ordre que les écarts mesurés, si bien



Cédric Champeau · 15 septembre 2026, 07:49-13:49 UTC · MLAstro SHG 700 · raie 5434,53 Å · erreur de monture corrigée

Fig. 8. – La région du mode f , après correction de la monture. (a) La puissance telle quelle. (b) La même puissance après soustraction du fond, ce qui fait ressortir les structures fines. En orange, la position théorique du mode f d'après Gizon et Birch [8] ; en cyan, la même courbe abaissée de 5 %.

qu'on ne peut pas distinguer ce qui vient du Soleil, de l'instrument, ou de la lecture. La comparaison aux listes publiées n'est possible qu'au degré 168 et en dessous.

- **Une seule séance.** Les séances disponibles n'ont pas été combinées entre elles.

8 Conclusions et perspectives

Nous n'avons pas identifié de publication présentant une mesure équivalente réalisée par un amateur, après recherche dans les bases bibliographiques, les archives de préprints, et les sites et forums de la communauté des spectrohéliographes amateurs : les oscillations de cinq minutes du Soleil sont ici détectées avec un spectrohéliographe amateur, et leurs familles d'ondes séparées une à une. Six crêtes sont résolues jusqu'au degré 800, et leurs fréquences sont compatibles, dans la précision permise par la lecture de la figure publiée, avec celles du diagramme de SOHO. Le traitement par lot de JSol'Ex et son interpréteur Python rendent cette mesure accessible.

Un doute subsiste sur le mode f : une bande est visible près de sa position attendue, mais elle ne correspond pas aux fréquences publiées.

Plusieurs pistes restent ouvertes : intégrer la correction de la monture au traitement dans JSol'Ex, combiner plusieurs séances pour gagner en précision, et étendre la comparaison aux tables publiées vers les degrés élevés. Au-delà du degré 190, en effet, les fréquences de référence ne sont plus données par les tables courantes des observatoires, mais par des analyses spécialisées.

9 Remerciements et déclarations d'utilisation de l'IA

Cet article a été rédigé avec l'assistance de l'intelligence artificielle Claude (Anthropic). Le protocole de mesure ainsi que la chaîne de traitement ont été conçus par l'auteur à partir de la littérature scientifique. L'implémentation informatique de cette chaîne a été menée en coopération avec l'IA : elle a produit le code Python, l'auteur en a

dirigé la conception, relevé et fait corriger de nombreuses erreurs, et validé la version finale. De la même manière, l'analyse des résultats a été rédigée avec l'assistance de l'IA, qui a proposé des interprétations et des comparaisons avec la littérature. L'auteur a relu et validé le texte final.

Merci à Minh Nguyen, de MLAstro, pour l'identification de l'erreur périodique de la monture et pour la mesure de son amplitude.

Références

- [1] R. B. Leighton, R. W. Noyes, et G. W. Simon, « Velocity Fields in the Solar Atmosphere. I. Preliminary Report », *The Astrophysical Journal*, vol. 135, p. 474, 1962, doi: 10.1086/147285.
- [2] R. K. Ulrich, « The Five-Minute Oscillations on the Solar Surface », *The Astrophysical Journal*, vol. 162, p. 993, 1970, doi: 10.1086/150731.
- [3] F.-L. Deubner, « Observations of low wavenumber nonradial eigenmodes of the Sun », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 44, p. 371, 1975.
- [4] J. Christensen-Dalsgaard, « Helioseismology », *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, p. 1073, 2002, doi: 10.1103/RevModPhys.74.1073.
- [5] T. Sekii *et al.*, « Initial Helioseismic Observations by Hinode/SOT », *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 59, p. S637, 2007, doi: 10.1093/pasj/59.sp3.s637.
- [6] J. Christensen-Dalsgaard, *Lecture Notes on Stellar Oscillations*, 5^e éd. Aarhus Universitet, 2014.
- [7] J.-M. Malherbe, F. Cornu, et I. Bualé, « Solex observations for the BASS2000 database, a collaboration PRO-AM », 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://arxiv.org/abs/2305.14804>
- [8] L. Gizon et A. C. Birch, « Local Helioseismology », *Living Reviews in Solar Physics*, vol. 2, p. 6, 2005, doi: 10.12942/lrsp-2005-6.

- [9] I. I. Yakovkin et V. G. Lozitsky, « Strong Zeeman effects in the Fe I 5434.5 Å line observed in a sunspot on August 17, 2024 », 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://arxiv.org/abs/2608.06316>
- [10] N. Bello González, M. Flores Soriano, F. Kneer, O. Okunev, et N. Shchukina, « Acoustic waves in the solar atmosphere at high spatial resolution. II. Measurement in the Fe I 5434 Å line », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 522, p. A31, 2010, doi: 10.1051/0004-6361/201014052.
- [11] C. Champeau, « JSol'Ex, version 5.4.2 archivée sur Zenodo ». Zenodo, 2026. doi: 10.5281/zenodo.22666115.
- [12] H. B. Snodgrass et R. K. Ulrich, « Rotation of Doppler features in the solar photosphere », *The Astrophysical Journal*, vol. 351, p. 309, 1990, doi: 10.1086/168467.
- [13] Wikimedia Commons, « MDI medium angular degree power spectrum ». [En ligne]. Disponible sur: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MDI_medium_angular_degree_power_spectrum.png
- [14] E. J. Rhodes Jr., A. G. Kosovichev, J. Schou, P. H. Scherrer, et J. Reiter, « Measurements of Frequencies of Solar Oscillations from the MDI Medium-l Program », *Solar Physics*, vol. 175, p. 287-310, 1997, doi: 10.1023/a:1004963425123.
- [15] Solar Oscillations Investigation (JSOC/Stanford University), « Fréquences des modes solaires, série mdi.vw_V_sht_modes du programme medium- ℓ de SOHO/MDI ». [En ligne]. Disponible sur: http://jsoc.stanford.edu/MDI/MDI_Global.html
- [16] M. C. Rabello-Soares, S. G. Korzennik, et J. Schou, « Analysis of MDI High-Degree Mode Frequencies and their Rotational Splittings », *Solar Physics*, vol. 251, p. 197-224, 2008, doi: 10.1007/s11207-008-9231-7.
- [17] H. M. Antia, S. Basu, J. Pintar, et B. Pohl, « Solar Cycle Variation in Solar f-Mode Frequencies and Radius », *Solar Physics*, vol. 192, p. 459-468, 2000, doi: 10.1023/a:1005204800696.