

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Ferhat ABBAS Sétif 1  
Faculté des Sciences



جامعة فرحات عباس سطيف 1  
كلية العلوم

Département : Physique

## MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences de la matière

FILIERE : PHYSIQUE

SPECIALITE : Physique spatiale

### Thème

**Variation du gradient radial de la rotation  
différentielle du soleil sur deux cycles  
magnétiques**

Présenté par :  
Ouahab Said

Dirigé par :  
Dr. Amel Zaatri

Promotion: 2019/2020

---

*” L’Imagination est plus importante que la connaissance. La connaissance est limitée. L’imagination englobe le monde entier, stimule le progrès, suscite l’évolution. Sans imagination, pas de progrès.”*

*Albert Einstein.*

# Dédicace

A la mémoire de ma chère soeur Hanene.

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Rien au monde ne vaut tes encouragements et tes conseils qui me manquent tellement, j'avais envie que tu sois présente pour ma soutenance mais malheureusement Dieu a voulu autrement. Ne t'inquiète pas soeurette, j'ai bien l'intention de tenir les promesses que je t'ai faite, j'aurai mon diplôme de doctorat, je deviendrai astrophysicien et je continuerai à veiller sur Lina jusqu'à mon dernier souffle. Ce travail est pour toi ma soeur et que Dieu bénisse ton âme.

# Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à l'aide de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à la directrice de mon mémoire, Mme Amel Zaatri, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de la réalisation de ce travail.

Un grand merci à Khadidja Fadli, Fellahi Zohir et Sofiane Rahmani, pour leurs conseils concernant mon style d'écriture et leur aide, ils ont grandement facilité mon travail.

Ensuite , je tiens à témoigner toute ma gratitude et mon amour à ma mère et mon père et mes frères et ma soeur, mais amis, Zohir, Mamin, Nassim, Hichem, Omar, Mouhamed, Mouhamed L, Hatem, et tous les autres et les remercier de leur confiance et leur soutien inestimable.

# Table des matières

Table des figures	6
<b>I Base Théorique</b>	<b>9</b>
0.1 Introduction générale . . . . .	10
<b>1 Dynamique et activité solaire</b>	<b>13</b>
1.1 Introduction . . . . .	13
1.2 Modèle de la dynamo solaire . . . . .	15
1.3 Problème de la dynamo solaire . . . . .	16
<b>2 Héliosismologie</b>	<b>19</b>
2.1 Introduction . . . . .	19
2.2 Théorie de l'Héliosismologie . . . . .	21
2.2.1 Modèle d'équilibre et oscillations solaires . . . . .	21
2.2.2 Analyse des données Héliosismologiques . . . . .	25
<b>II Analyse de données</b>	<b>28</b>
<b>3 Mesure et analyse du gradient radial de la rotation différentielle du soleil</b>	<b>29</b>
3.1 But de l'étude . . . . .	29
3.2 Procédure . . . . .	31
3.3 Variation à long terme du gradient radial . . . . .	32
3.3.1 Comportement moyen du gradient . . . . .	32
3.3.2 Le gradient radial dans les deux hémisphères . . . . .	35
3.3.3 Variation spatio-temporelle du gradient . . . . .	38
3.4 Corrélation du gradient radial avec le champ magnétique . . . . .	41

3.4.1	Coefficients de corrélation . . . . .	45
	<b>Conclusion</b>	<b>49</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>51</b>

# Table des figures

1.1	Le premier diagramme Papillon de l'histoire de l'astronomie établi par MAUNDER 1874-1904 en 1904 qui montre la distribution en latitude des taches solaires de 1877 jusqu'à 1902 . . . . .	14
1.2	Le diagramme papillon qui montre l'étalement des taches solaires en fonction de la latitude et du temps <b>2010</b> (disponible sur : <a href="http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/bfly.gif">http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/bfly.gif</a> )	15
1.3	Schéma présentant le processus de génération et de maintien de l'activité solaire sur un cycle (modèle de dynamo du champ moyen, <b>DIKPATI et GILMAN 2009</b> . . . . .	18
2.1	Les systèmes d'observation heliosismologiques : le réseau au sol GONG en haut, et les missions spatiales SOHO et SDO en bas. . . . .	20
2.2	Fréquences des modes p, f, et g en fonction du degré $l$ pour un modèle standard solaire , courtoisie de <b>J. CHRISTENSEN-DALSGAARD 2003b</b> . . . . .	22
2.3	Trajectoires des ondes acoustiques dans le Soleil. Les lignes bleues correspondent à des modes de bas degré pénétrant profondément l'étoile ; les lignes rouges à des modes de haut degré, superficiels. . . . .	23
2.4	Les harmoniques sphériques pour $l=4$ et différentes valeurs de $m$ . <b>ZAATRI 2009</b> . . . . .	25
2.5	Exemple de diagramme en anneaux 3D pour $n = 3$ mHZ à partir des données de GONG, de dimensions (128.128.512) .	27
3.1	Carte journalière du gradient radial de rotations une profondeur de 2 Mm . . . . .	30

3.2	Carte journalière du gradient radial de rotation a une profondeur de 7 Mm . . . . .	30
3.3	Plages de profondeurs utilisées dans l'étude du gradient radial. La ligne discontinue représente toute la profondeur présente dans les données de GONG, la ligne rouge représente l'intervalle des profondeurs utilisées dans notre étude. . . . .	31
3.4	Variation du gradient radial moyenné sur 253 Rotation Carrington en fonction de la latitude et de la profondeur . . . . .	32
3.5	Représentation de la variation du gradient radial en fonction du temps et de la latitude pour des profondeurs données. Les ligne verticales représentent les démarcations des cycles et la ligne horizontale représente l'équateur solaire . . . . .	34
3.6	Cartes synoptiques qui représentent le contraste entre le gradient radial au sud et au nord de l'hémisphère solaire en fonction du temps (rotations Carrington) et de la latitude (degré), et cela, à des profondeurs de 2 Mm,4 Mm et 6 Mm. Les lignes jaunes représentent (celle de gauche) la fin du cycle 23 donc le début du cycle 24 et (celle de droite) représente la fin du cycle 24 donc le début du cycle 24. . . . .	36
3.7	Cartes synoptiques qui représentent le contraste entre le gradient radial au sud et au nord de l'hémisphère solaire en fonction du temps (rotations Carrington) et de la latitude (degré), et cela, à des profondeurs de 8,12 et 16 Mm. Les lignes jaunes représentent (celle de gauche) la fin du cycle 23 donc le début du cycle 24 et (celle de droite) représente la fin du cycle 24 donc le début du cycle 24. . . . .	37
3.8	Représentation du gradient radial dans différentes latitudes du sud à travers toute la période d'étude. La ligne verte représente la moyenne du gradient radial sur les latitudes et les ligne jaunes représentent les démarcations des cycles. Le bleu représente la latitude $-52,5^\circ$ , le rouge $-37,5^\circ$ , l'orange $-22,5^\circ$ et le vert claire $-7,5^\circ$ . . . . .	38

3.9	Représentation du gradient radial dans différentes latitudes du nord à travers toute la période d'étude. La ligne verte représente la moyenne du gradient radial sur les latitudes et les ligne jaunes représentent les démarcations des cycles. L'orange représente la latitude 7,5°, le violet 22,5°, le rose 37,5° et l'orange claire 52,5° . . . . .	39
3.10	Carte synoptique du C. Magnétique au minimum d'activité du cycle 24 . . . . .	41
3.11	Carte synoptique du C.Magnétique au maximum d'activité du cycle 23 . . . . .	41
3.12	Représentation synoptique du gradient radial superposé par le champ magnétique en fonction du temps et de la latitude pour des profondeurs de 2 Mm,4 Mm,6 Mm et 8 Mm. . . .	42
3.13	Représentation synoptique du gradient radial superposé par le champ magnétique en fonction du temps et de la latitude pour des profondeurs de 10 Mm, 12 Mm, 14 Mm et 16 Mm.	43
3.14	Représentation du coefficient de corrélation entre le gradient radial de rotation et le champ magnétique sur 253 rotation Carrington . . . . .	45
3.15	Représentation du coefficient de corrélation entre le gradient radial de rotation et le champ magnétique sur le cycle 23 . .	46
3.16	Représentation du coefficient de corrélation entre le gradient radial de rotation et le champ magnétique sur le cycle 24 . .	47

Première partie

Base Théorique

## 0.1 Introduction générale

Le Soleil est le coeur de notre système solaire. C'est lui qui permet, par son attraction gravitationnelle, aux corps du système solaire de rester ensemble et qui fournit l'énergie nécessaire à divers processus physiques et chimiques ayant lieu dans le système solaire.

Il y'a de cela environ quatre décennies, des astronomes ont conclu que le phénomène de vibration du soleil est directement lié aux caractéristiques principales de cet astre ; cette découverte primordiale a donné naissance à une discipline fructueuse qui est : **l'Héliosismologie**

Depuis la découverte des oscillations solaires, les astronomes n'ont pas arrêté d'étudier ces dernières afin d'essayer de cerner les principales caractéristiques de l'intérieur solaire. Afin de mieux saisir l'importance et le rôle des oscillations solaires, on doit d'abord bien étudier et comprendre les différentes propriétés des oscillations acoustiques autour des modèles solaires résultant des calculs d'évolution du soleil. Les fréquences observées fournissent un diagnostic direct des propriétés internes du soleil : proposant ainsi la capacité à développer un modèle solaire fiable. En effet, les différences entre les fréquences observées et calculées peuvent être liées aux erreurs dans le modèle. Donc les fréquences peuvent être considérées comme contraintes pour le modèle. L'héliosismologie contribue donc à l'amélioration des modèles de la structure interne du soleil, et par conséquent, au renforcement de nos connaissances sur le fonctionnement du Soleil. L'avènement de l'héliosismologie a ouvert une nouvelle ère dans l'astrophysique stellaire dans l'étude des étoiles en général et le Soleil en particulier. En effet, avant l'héliosismologie, la modélisation de l'intérieur du Soleil ne considérait que les contraintes macroscopiques qui sont la masse, le rayon et la luminosité atteint à l'âge actuel qui est d'environ 4.6 Milliards d'années. L'héliosismologie a permis, grâce à la mesure précise des ondes acoustiques piégées à l'intérieur du Soleil, d'avoir une connaissance améliorée des différents paramètres et propriétés internes du Soleil tels que le profil de température, de pression, de densité et autres. On distingue deux types d'approches : la première ; considère le Soleil dans sa globalité ; il s'agit de l'héliosismologie globale. La seconde s'intéresse aux détails ou aux phénomènes locaux ; il s'agit de l'héliosismologie locale.

L'héliosismologie n'est pas seulement capable de nous clarifier sur la structure interne solaire mais elle est tout autant capable de nous expliquer la dynamique du Soleil qui à son tour, est dominée par la rotation différentielle qui rompt la dégénérescence des modes d'oscillation. En inversant les 'splittings' observés, la rotation en fonction du rayon et de la latitude a été dévoilé dans une image inattendue où la zone de convection du Soleil tourne différentiellement en latitude et en rayon tandis que la rotation devient uniforme dans la zone radiative. La transition entre la zone convective et la zone radiative est une couche de cisaillement appelée : la Tachocline. Toutefois, nous ne disposons d'aucune information sur l'asymétrie nord-sud, et c'est l'une des limites de l'héliosismologie globale.

En outre, il y'a des preuves qui confirment l'existence de flux le long des méridiens solaires mais qui ne sont pas des résultantes de la technique GH en raison de leur amplitude très faible par rapport à la vitesse angulaire. Néanmoins, leur mesure dans le Soleil est tout aussi importante que la rotation, et cela en raison du rôle qu'ils jouent dans les modèles de dynamo solaire pour Cerner l'activité solaire globale.

Afin d'avoir accès à ces informations manquantes dans les études héliosismologiques globales, les ondes acoustiques sont étudiées localement plutôt que dans l'intégralité du Soleil. Ceci est connu comme l'héliosismologie locale. Cette dernière, rassemble plusieurs techniques qui ont été utilisées avec succès pour étudier les champs de vitesse à grande échelle dans une vue 3D des couches sub-surfaciques, et à plus petite échelle, la structure et les flux sous les régions actives. Ce travail a été extrêmement motivé par la disponibilité de données d'oscillation acoustique disponible grâce à l'observation continue d'une partie du cycle solaires 23 et de l'intégralité du cycle 24 à partir du Global Oscillation Network Group (GONG) basé sur terre. Ce dernier nous offre la possibilité d'étudier les variations à long terme des champs d'écoulement en fonction de la latitude, de la longitude, de la profondeur et du changement du niveau d'activité magnétique, qui à son tour, nous aide à trouver quelques indices sur les mécanismes du fameux cycle de 11 ans.

Dans ce ce manuscrit, Je consacrerai le chapitre 1 à un aperçu de la théorie de la dynamo solaire et aussi l'importance d'avoir des mesures pré-

cises des champs d'écoulement à l'intérieur du Soleil le long des lignes de latitudes (circulation méridionale) et des lignes de longitudes (rotation) qui sont des entrées cruciales des modèles de dynamo du cycle solaire. Ensuite, le chapitre 2 sera un aperçu sur héliosismologie et ses fondements théoriques pour établir la nature et les propriétés des oscillations solaires ainsi que l'effet d'un champ d'écoulement sur les fréquences des modes solaires. Ensuite, un bref résumé sur l'observation des oscillations à partir de l'espace et via des réseaux au sol est donné. Enfin, deux méthodes d'investigation des données hélio sismiques, l'héliosismologie globale et locale, sont discutées.

Dans le chapitre 3, je présente les résultats de mon analyse des données de GONG, qui s'étendent de Juillet 2001 Jusqu'à juin 2020, les données sont un ensemble de vitesses de rotation en fonction des latitudes, longitudes, temps et profondeurs allant du premier Mm sous la surface jusqu'à environ 16 Mm. Ces données sont utilisés pour mesurer le gradient radial de rotation. Cette grandeur physique est, en effet, cruciale dans l'établissement d'un modèle de dynamo, et sa mesure exacte à partir de l'observation peut présenter une excellente contrainte pour ce dernier. Le gradient radial de rotation est analysé sur toute la période du cycle 24 et sur une partie du cycle 23 pour des latitude allant jusqu'à environ  $60^\circ$  nord et sud et sur des profondeur allant jusqu'à environ 16Mm sous la surface solaire. Une étude de corrélation entre cet ingrédient et le champs magnétique est effectuée afin de déduire son importance pour l'activité solaire.

Finalement, Je résume les résultats obtenus dans ce mémoire et j'aborde les perspectives pour les travaux futurs.

# Chapitre 1

## Dynamique et activité solaire

### 1.1 Introduction

Depuis l'avènement de la science, notamment l'astronomie, l'observation et l'explication de la Dynamique solaire a été un véritable problème. C'est jusqu'au 17<sup>ème</sup> siècle, qui marque l'apparition du télescope qu'il y'a eu un avancement considérable dans ce domaine. Le télescope a permis aux astronomes d'effectuer, ce qui a été considéré comme les premiers pas vers le déchiffrement de la dynamo solaire, des observations continues sur l'échelle de temps de la surface solaire, en particulier, il s'agit d'observations de taches solaires. Tout d'abord, il y'a eu la découverte du fameux cycle solaire par **SCHWBE.H 1838**, ce dernier remarqua la présence d'un cycle régulier dans l'évolution temporelle du nombre de taches solaires d'environ 10 ans. Ensuite, **WOLF 1852** modifia cette période à  $11.111 \pm 0,038$  ans, et cela, en rassemblant des observations de taches solaire sur plusieurs années, et c'est ainsi que le cycle 1 fut défini en 1761.

Ensuite, il y'a eu l'importante découverte de la Rotation de Carrington (c'est la période de rotation du Soleil autour de son axe et qui vaut 25,187 jours, . **CARRINGTON 1858** remarqua qu'au minimum du cycle, les taches solaires sont concentrées dans une sorte de ceinture d'une largeur de  $20^\circ$  au nord et au sud à l'équateur solaire, mais pendant le maximum d'activité, cette ceinture s'élargit à  $40^\circ$  nord et sud. Cette propriété est visible dans la figure 1.1 à travers le diagramme des papillons conçu par **MAUNDER 1874-1904**, et dans la figure 1.2, on retrouve le diagramme des papillons de notre époque qui réunit l'étalement des taches solaire de 1980 jusqu'à ces jours-ci en fonction de la latitude et du temps (années) où

on distingue clairement l'enchaînement des cycles magnétiques. Carrington a remarqué aussi que plus la latitude des taches solaires est élevée, plus leur déplacement zonal est lent, c'est ce qu'on appelle la rotation différentielle est c'est la base de tout le travail fait dans ce mémoire.

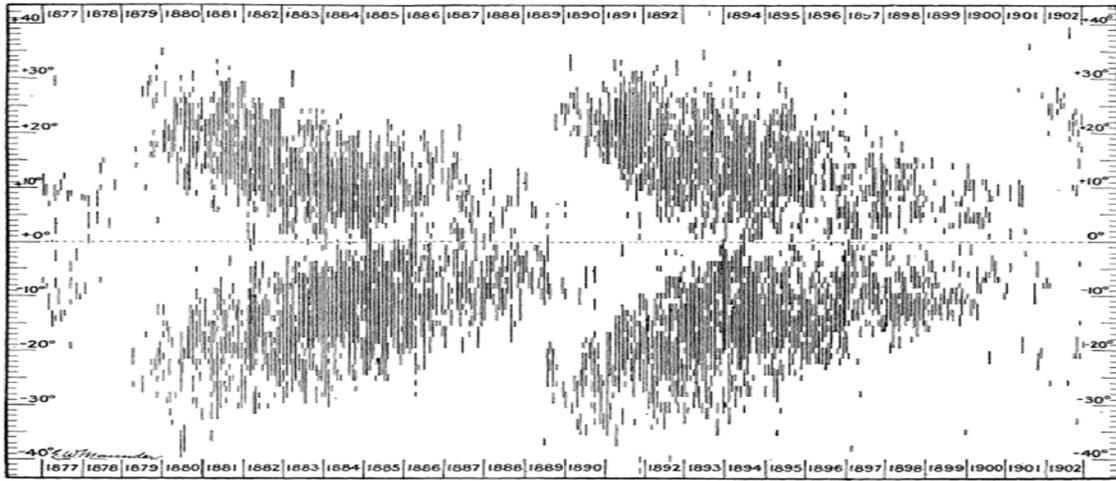


FIG. 8.—DISTRIBUTION OF SPOT-CENTRES IN LATITUDE. ROTATION BY ROTATION. 1877-1902.

FIGURE 1.1 – Le premier diagramme Papillon de l’histoire de l’astronomie établi par MAUNDER 1874-1904 en 1904 qui montre la distribution en latitude des taches solaires de 1877 jusqu’à 1902

Le travail de Maunder a été la base d’une découverte fondamentale dans l’astronomie solaire, qui a permis l’établissement des fondamentaux de la théorie de l’origine et l’évolution de l’activité solaire. **HALE 1908** a réussi à percer le mystère de l’origine magnétique des taches solaires, et cela par son travail qui consiste à détecter **l’effet Zeeman** (voir **MALHERBE 2010** dans le spectre des taches solaires).

Toutes ces découvertes ont formé une base pour d’énormes travaux orientés vers la modélisation des propriétés magnétohydrodynamiques du plasma solaire (modèle MHD), et cela pour pouvoir un jour arriver à reproduire et pourquoi pas prédire les différents mécanismes et phénomènes solaires.

La figure 1.2, le diagramme d’en haut décrit la représentation spatiale des taches solaires en latitude, et celui d’en bas, décrit la surface du disque observé occupé par ces dernière et cela de façon journalière.

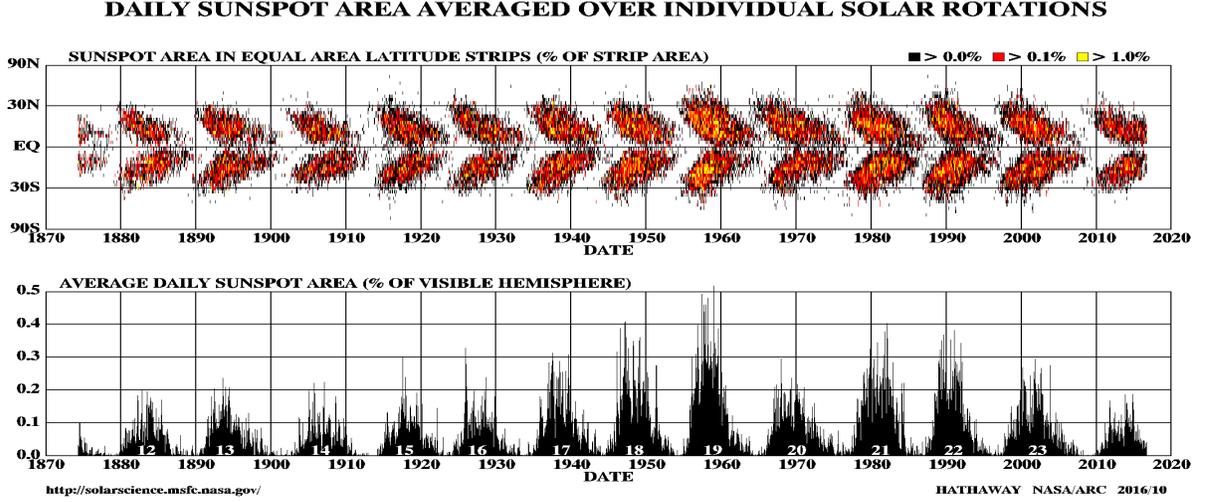


FIGURE 1.2 – Le diagramme papillon qui montre l'étalement des taches solaires en fonction de la latitude et du temps **2010** (disponible sur : <http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/bfly.gif>)

## 1.2 Modèle de la dynamo solaire

Dans le soleil et n'importe quelle étoile de son genre, les différents mouvements du plasma solaire sont non-relativistes et ce dernier est électriquement neutre et non dégénéré. Dans ce cas, nous pouvons considérer les lois d'Ohm et d'Ampère. Ce qui conduit à la possibilité de combiner les équations de Maxwell en une seule équation d'évolution temporelle pour le champ magnétique  $B$ . Cette équation s'appelle l'équation d'induction magnétohydrodynamique (équation de la MHD, voir **MALHERBE 2010**), qui s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B - \eta \nabla \times B) \quad (1.1)$$

avec :

$$\eta = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$$

Ou :

$B$  : le champ magnétique.  $\eta$  : la diffusivité magnétique.  $\sigma$  : la conductivité électrique.  $c$  : la vitesse de la lumière.  $U$  : le champ d'écoulement.

pour plus de détails voir **ZAATRI 2009**.

### 1.3 Problème de la dynamo solaire

Le problème majeur de la dynamo solaire est de réussir à générer un champ d'écoulement  $u$  capable de soutenir le champ magnétique  $B$ . Le champ magnétique  $B$  est transporté de la zone convective vers la surface solaire par la circulation méridienne, ensuite il est étiré par la rotation différentielle. (**Gael BULDGEN, SÉBASTIEN et NOELS 2019**).

Cela se voit facilement en réécrivant le terme inductif dans l'équation d'induction comme suit :

$$\nabla \times (u \times B) = (B \cdot \nabla)u - (u \cdot \nabla)B - B(\nabla \cdot u) \quad (1.2)$$

Ce qui nous conduit, après la séparation du champ magnétique et le champ d'écoulement, aux deux équations suivantes : (**CHARBONNEAU 2010, ZAATRI 2009**)

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \eta_t \left( \nabla^2 - \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \right) A - \frac{u_p}{r \sin \theta} \cdot \nabla (r \sin A) + \alpha \bar{B} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_\phi}{\partial t} = & -\frac{1}{r} \left[ \frac{\delta}{\delta r} (r u_r B_\phi) + \frac{\delta}{\delta \theta} (u_\theta B_\phi) \right] + r \sin \theta (B_p \cdot \nabla) \Omega \\ & - e_\phi \cdot [\nabla \eta_t \times \nabla \times B_\phi e_\phi] + \eta_t \left( \nabla^2 - \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \right) B_\phi \end{aligned} \quad (1.4)$$

Le terme source :  $r \sin \theta (B_p \cdot \nabla) \Omega$  dans l'équation de l'évolution temporelle de  $B_\phi$  reflète **la production du champ toroïdal  $B_\phi$  due à l'étirement du champ poloïdal  $B_p$  par le gradient de la rotation différentielle**, ce dernier est le but de notre étude. Le terme source  $[\alpha B]$  présent dans l'équation de l'évolution temporelle de  $B_p$  représente la régénération du champ poloïdal causé par la torsion du champ toroïdal due à turbulence (l'effet alpha), le terme advectif qui inclut la circulation méridienne  $U_p$  représente **le transport du champ magnétique par la circulation méridienne** (la circulation ne crée pas et ne détruit pas le champ magnétique).

Pour construire un modèle solaire capable de reproduire la dynamo solaire le plus précisément possible, il faut prendre en compte tous les phénomènes de ce dernier : la circulation méridienne, le gradient de rotation et l'effet alpha. Donc il est impératif de bien définir leur variations temporelle

et spatiale.

Le modèle ici défini est présenté dans la figure 1.3 ci-dessous, il est dit :  
Modèle de transport  $\alpha\Omega$  de la dynamo du champ moyen. Sa description est donnée comme suit :

Le zone radiative du soleil est représentée par la boule rouge et la surface solaire par le bleu. Entre les deux c'est la zone de convection où la dynamo est générée.

[a] : Représente l'étirement du champ poloïdal par la rotation différentielle du soleil.

[b] : Représente le champ toroïdal généré par le cisaillement causé par la rotation différentielle.

[c] : Quand le champ toroïdal est suffisamment fort, des noeuds bouillonnants se crée par torsion à cause de la turbulence, ce qui cause la formation de taches solaires.

[d] [e] [f] : des flux additionnels émerges

[h] : quelques flux sont transportés par la circulation méridionale de l'équateur vers les pôles. Ces champs poloïdaux ont des polarités opposées à ceux qui sont générés au début.

[i] : Ces champs poloïdaux aux polarités inversées sont cisailés à nouveau par la rotation différentielle pour générer le nouveau champ toroïdal avec une polarité opposée a ceux qui sont montrés dans [b].

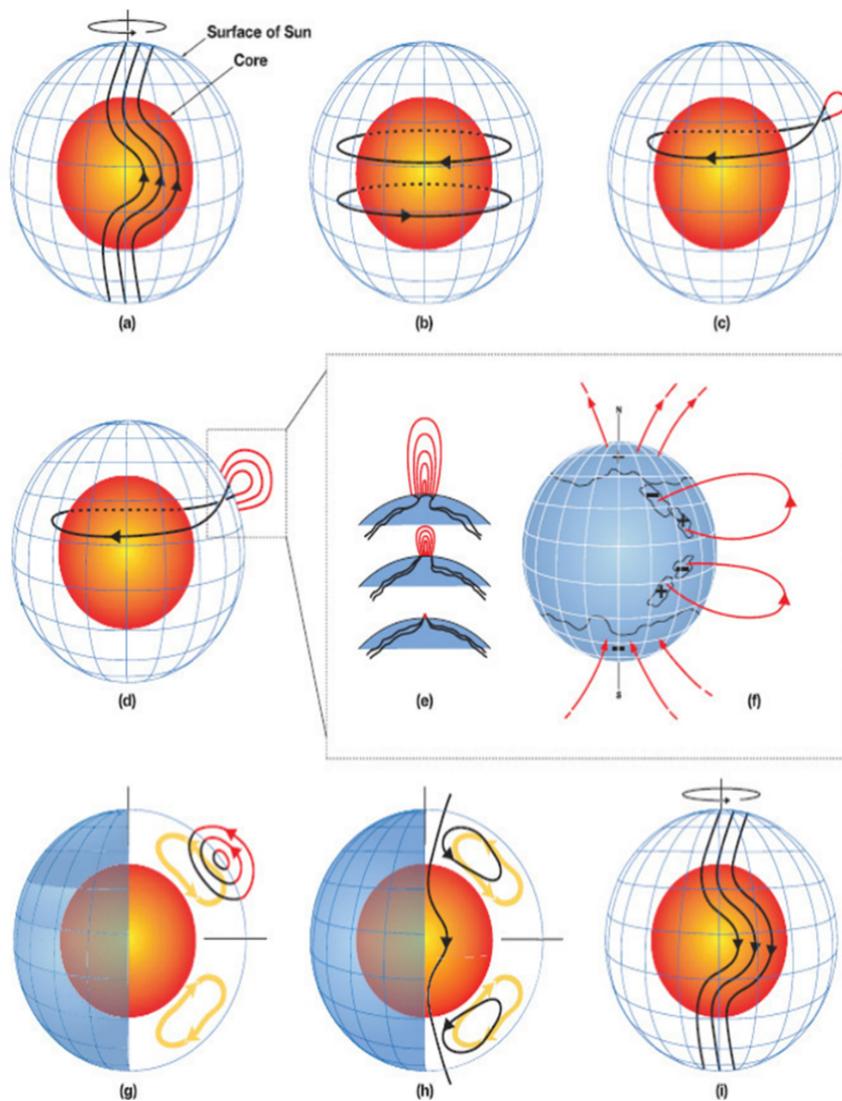


FIGURE 1.3 – Schéma présentant le processus de génération et de maintien de l'activité solaire sur un cycle (modèle de dynamo du champ moyen, **DIKPATI et GILMAN 2009**)

# Chapitre 2

## Héliosismologie

### 2.1 Introduction

Comme on l'a spécifié dans le chapitre précédent, le soleil peut être considéré comme une sphère de fluide (plasma à haute température) à trois dimensions. Cette sphère vibre suivant des modes bien définis. Ces modes constituent une propriété unique au soleil et aux étoiles de son genre, et pour bien comprendre ces modes d'oscillation, les astronomes recoururent à une science relativement nouvelle appelée : Héliosismologie.

L'Héliosismologie constitue une science très fiable pour réunir des informations sur la structure interne et la dynamique du soleil.

L'héliosismologie a connu un développement considérable s'étalant sur plusieurs décennies avant d'accomplir une avancée extraordinaire avec l'avènement du satellite SOHO (Solar and heliospheric observatory) en 1995. Tout d'abord, il y'a eu, ce qui peut être considéré comme l'aube de l'Héliosismologie , **LEIGHTON, NOYES et SIMON 1962** ont été l'un des premiers à observer certaines oscillations sur la surface du soleil qui ont une période de l'ordre de 5 minutes. Puis, il y'a eu la théorie proposée par **ULRICH 1970, LEIBACHER et STEIN 1970** qui décrit les oscillations solaires comme la manifestation d'ondes acoustiques se propageant à l'intérieur du soleil. Enfin, **DEUBNER, ULRICH et RHODES 1979** confirmèrent cette théorie en superposant les observations aux prédictions théoriques. De nos jours, c'est principalement le réseau GONG (Global Oscillations Network Group), le satellite SOHO (Solar Heliopheric Observatory) et le satellite SDO (Solar dynamics observatory) qui délivrent les données héiosismologiques. Pour notre étude, on va utiliser uniquement les données de GONG,

qui est un réseau mondial constitué de six télescopes identiques, conçu pour avoir des observations 24/7 du Soleil. Le réseau sert à plusieurs fins, y compris la fourniture de données d'exploitation à utiliser dans la prévision de la météorologie spatiale et l'étude de la structure interne du soleil et sa dynamique à l'aide de l'héliosismologie. GONG observe les oscillations solaires qui sont détectées à partir de mesures précises de l'effet Doppler (décalage Doppler des raies spectrales reflétant directement un mouvement de la photosphère) en délivrant une image du soleil chaque minute.

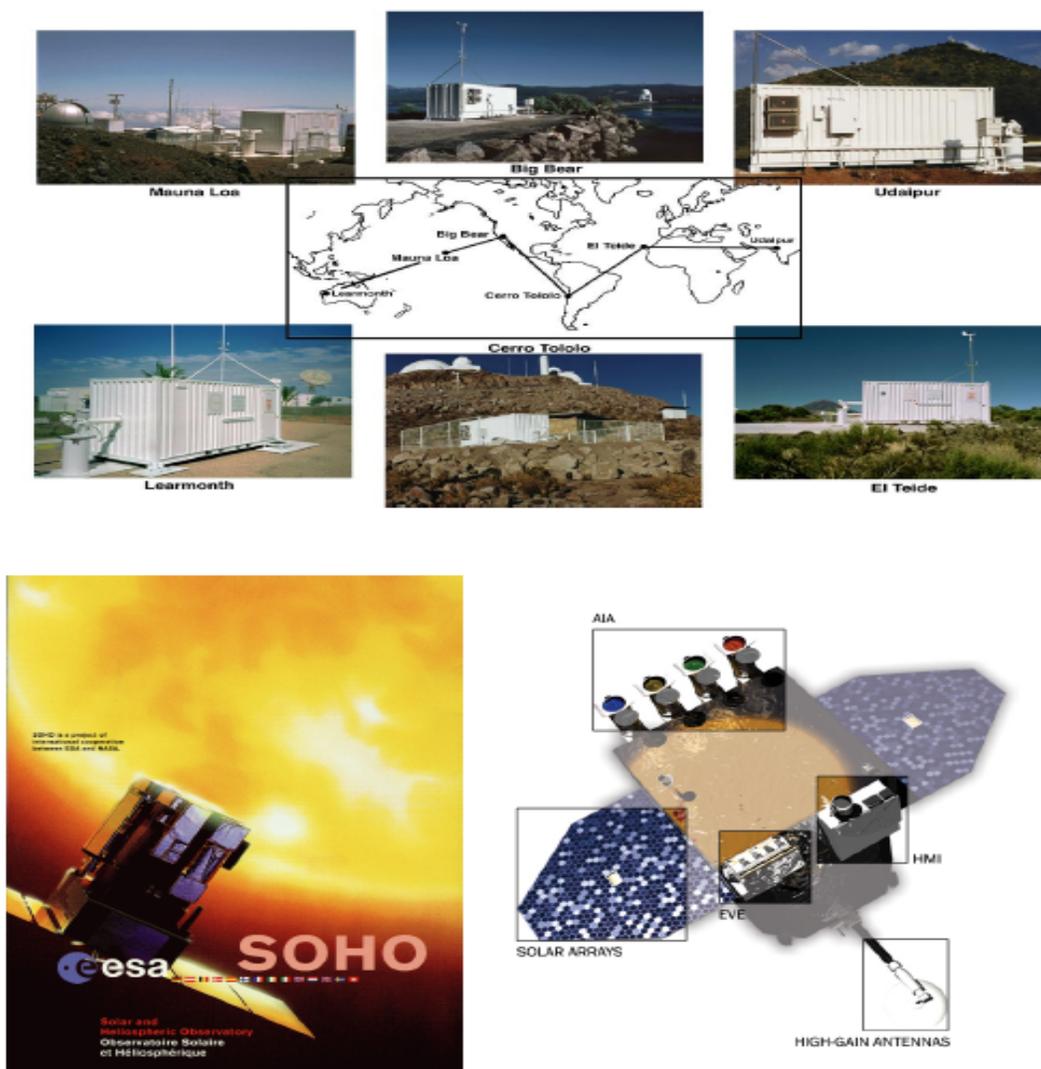


FIGURE 2.1 – Les systèmes d’observation héliosismologiques : le réseau au sol GONG en haut, et les missions spatiales SOHO et SDO en bas.

## 2.2 Théorie de l'Héliosismologie

### 2.2.1 Modèle d'équilibre et oscillations solaires

Comme on va le voir dans ce chapitre, les oscillations solaires peuvent être assimilées à de faibles perturbations qui influent sur le modèle d'équilibre du soleil. Pour cause, leurs faibles amplitudes vis à vis de l'échelle caractéristique du soleil. Ce qui nous conduit à des équations linéaires déduites par l'analyse des perturbations appliquée au modèle d'équilibre solaire. (**GIZON et BIRCH 2005**)

#### **Théorie des oscillations solaires**

Le soleil est maintenu en équilibre grâce à la concurrence de deux forces majeures : la force de pression qui tend à le faire exploser et la force de gravité qui tend à le faire imploser. Ainsi toute perturbation au sein du soleil aura pour force de rappel l'une des forces citées ci-haut. Ainsi, au sein du soleil, on distingue la présence de deux principaux modes de vibration, les modes de gravité (les modes  $g$ ) et les modes acoustiques ou modes de pression (les modes  $p$ ).

Chaque mode est défini principalement par 3 nombres entiers (harmoniques sphériques) :

$n$  : L'ordre radial du mode, nombre de noeuds le long du rayon de l'étoile.

$l$  : L'ordre du mode, nombre total de lignes de noeuds.

$m$  : L'ordre azimutal du mode, nombre de lignes de noeuds qui passent par les pôles de vibrations.

#### **Les modes de gravité (les modes $g$ )**

Les modes de gravité ou modes  $g$  ont pour force de rappel la poussée d'Archimède et sont de basses fréquences, Ils sont piégés dans la zone radiative et sont évanescents dans la zone convective. Leur amplitude est plus importante près du coeur du Soleil et constituent donc un outil potentiel de diagnostic plus qu'intéressant pour explorer cette région. Comme ils sont évanescents dans la région convective, leur amplitude à la surface est très faible, ce qui rend leur détection délicate. (**MASSINISSA 2006, APPOURCHAUX et al. 2009**).

### Les modes acoustiques (les modes $p$ )

Les modes piégés dans l'étoile sont des modes de pression ou modes  $p$ . Ce sont des modes acoustiques (HOWE 2009, KIEFER et al. 2018), dont la force de rappel est le gradient de pression. Ils se propagent dans une cavité définie par la surface et un point de retournement interne (voir figure 2.3). (pour plus de détails sur les modes  $p$ , voir Jorgen CHRISTENSEN-DALSGAARD 2014).

La figure 2.2, montre les fréquences des modes cités ci-dessus en fonction de l'ordre  $l$ , mesurées en utilisant un modèle solaire standard.

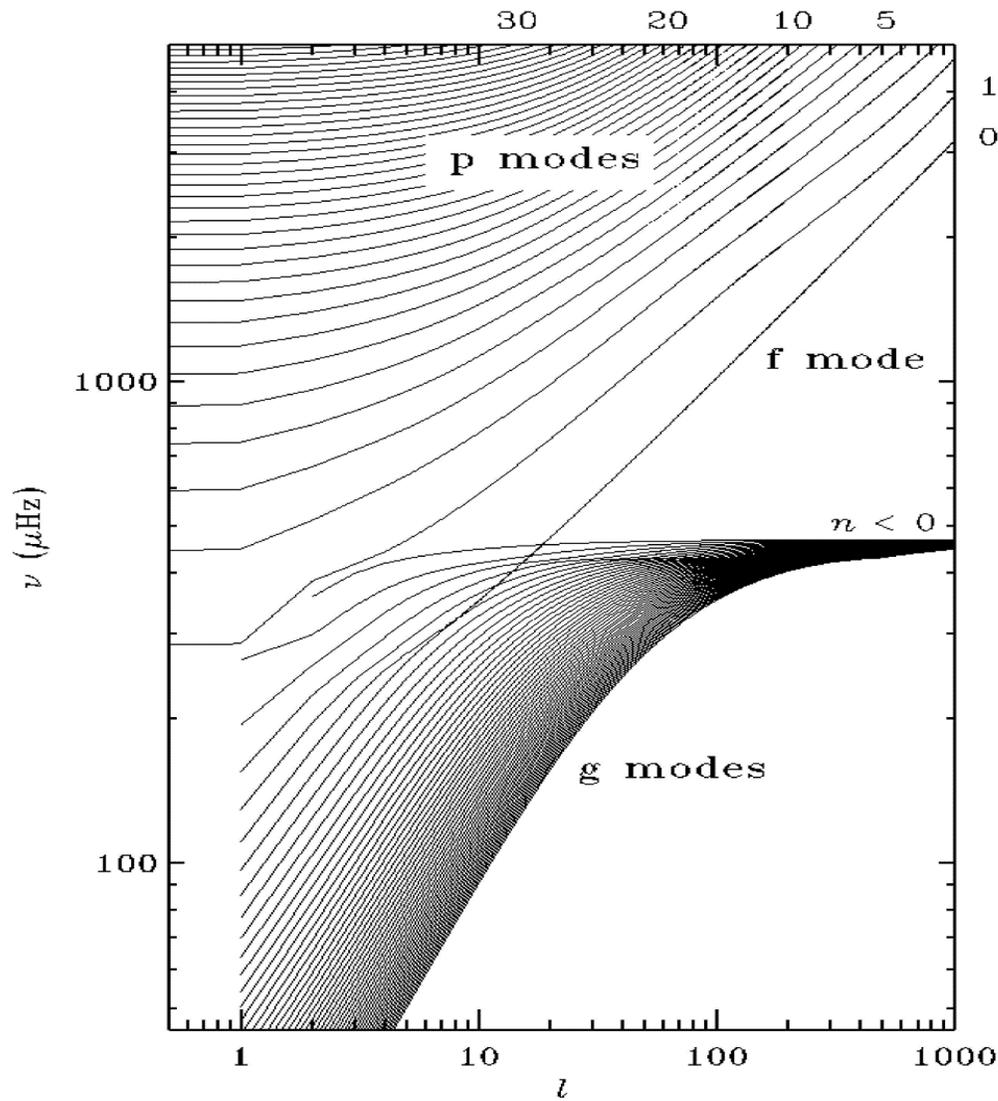


FIGURE 2.2 – Fréquences des modes  $p$ ,  $f$ , et  $g$  en fonction du degré  $l$  pour un modèle standard solaire, courtoisie de J. CHRISTENSEN-DALSGAARD 2003b

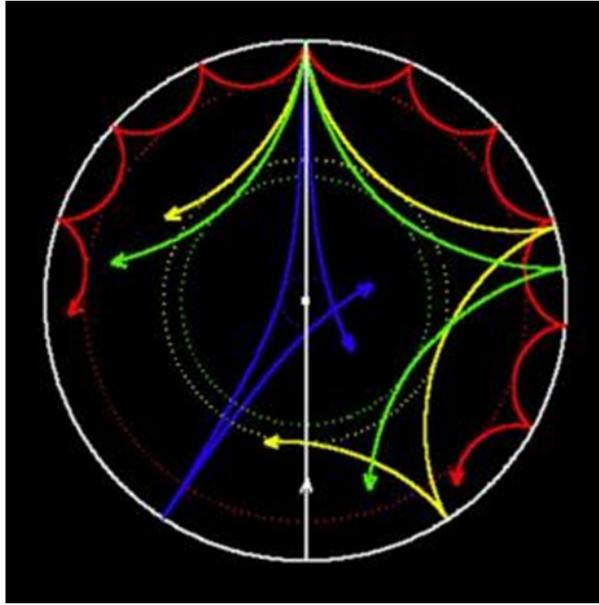


FIGURE 2.3 – Trajectoires des ondes acoustiques dans le Soleil. Les lignes bleues correspondent à des modes de bas degré pénétrant profondément l'étoile ; les lignes rouges à des modes de haut degré, superficiels.

### Le modèle d'équilibre solaire

Tout évidemment, le soleil étant une étoile comme les autres, il doit obéir aux équations de base de l'évolution stellaire. Donc, en modélisant le soleil comme étant un corp céleste avec une symétrie sphérique (modèle de la boule de feu) et sans la présence d'un champ magnétique quelconque, on obtient un modèle hydrodynamique qui se compose de 4 équations :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial}{\partial t} + v \cdot \nabla \right) v = -\nabla P + \rho g \quad (2.2)$$

$$\rho T \left( \frac{\partial}{\partial t} + v \cdot \nabla \right) S = \rho \epsilon - \nabla \cdot F \quad (2.3)$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho \quad (2.4)$$

l'équation (2.1) c'est **l'équation de conservation de masse**, (2.2) c'est **l'équation de la dynamique**, (2.3) c'est **l'équation de conservation de l'énergie** et (2.4) **l'équation de Poisson**. Ces équations constituent un système d'équation qui est connu comme **le modèle d'équilibre du Soleil**.

$\rho$  représente la densité,  $P$  la pression,  $T$  la température,  $v$  la vitesse,  $S$  l'entropie spécifique,  $\epsilon$  le taux de réaction nucléaire,  $\phi$  le potentiel gravitationnel et  $F$  le flux total d'énergie. Pour en savoir plus sur les modèles solaires standards. (voir **FORESTINI 1999, PROVOST 1997**)

### Les équations d'oscillations linéaires solaires

Donc pour obtenir les équations d'oscillation solaire, il faut perturber chacune des quantités physiques présentes dans le modèle de l'équilibre solaire. Après avoir linéarisé le système d'équations, on obtient le système suivant :

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (2.5)$$

$$\rho \frac{v l}{\partial t} + \nabla p' + \rho' \nabla \Phi + \rho \nabla \Phi' = 0 \quad (2.6)$$

$$\rho T \frac{\partial}{\partial t} (x i \cdot \nabla S + S') = -\nabla \cdot F' + (\rho \epsilon)' \quad (2.7)$$

$$\nabla^2 \Phi' = 4\pi G \rho' \quad (2.8)$$

$\xi$  est le déplacement dû à la perturbation,  $v = \frac{d\xi}{dt}$  c'est la vitesse de perturbation. Les quantités avec des primes sont des perturbations eulériennes (dans une position bien définie). La solution de ce système d'équations est donnée sous la forme d'harmoniques sphériques :

$$Y_l^m = (\vartheta, \phi) = (-1)^m c_{l,m} P_l^m(\cos \vartheta) \exp(im\phi) \quad (2.9)$$

avec :

$$c_{l,m}^2 = \frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!}$$

$l$  est le degré de l'harmonique sphérique,  $m$  est l'ordre azimutal,  $\phi$  la longitude,  $\vartheta$  la colatitude et  $P$  sont les polynômes de Lagrange. la figure 2.4 représente des harmonique sphérique pour  $l = 4$  et une variété de  $m$ .

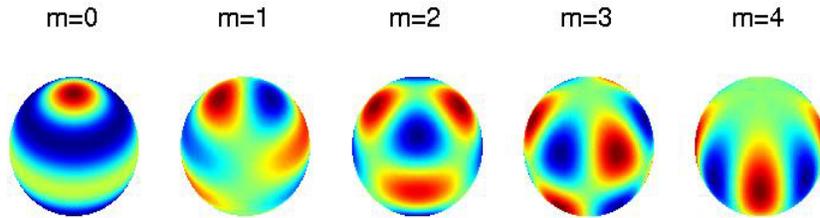


FIGURE 2.4 – Les harmoniques sphériques pour  $l=4$  et différentes valeurs de  $m$ . **ZAATRI 2009**

### 2.2.2 Analyse des données Héliosismologiques

Les données héliosismologiques, selon leur nature, sont traitées de deux manières différentes dites Héliosismologie globale et héliosismologie locale. Les données utilisées dans ce mémoire ont été traitées par cette dernière. Celle-ci est basée sur des images du soleil à haute résolution. La surface du soleil est ainsi divisée en petites parties traitées séparément.

En héliosismologie globale, on regarde le soleil comme une étoile. Alors qu'en héliosismologie locale, on utilise les images du soleil à haute résolution.

#### Héliosismologie Globale

Comme précisé avant, l'héliosismologie globale traite les oscillations solaires sur l'intégralité du soleil. Elle consiste à définir les fréquences d'oscillation des modes normaux qui sont quantifiés par leurs 3 nombres caractéristiques  $(l,m,n)$ . (voir **Gaël BULDGEN 2018**)

Le principal outil d'analyse des données sismiques brutes fournis par G.O.N.G est la transformée de Fourier (**BROWN 1996**). Pour une bonne approximation, chaque mode est assimilé à un oscillateur harmonique amorti, pour lequel la puissance en fonction de la fréquence est une fonction de Lorentz. Les données spatialement résolues en les projetant sous une forme d'har-

moniques sphériques pour obtenir des séries temporelles qui sont ensuite soumis à la transformées de Fourier. La gamme de fréquence inférieure des oscillations est dominée par les variations causées par la granulation. Celle-ci doit d'abord être filtrée avant l'analyse des modes. l'héliosismologie globale ne permet de résoudre que les modes de bas et moyen degré. (**CORBARD 1998**).

Pour plus de détail sur l'Héliosismologie globale et la façon de détecter les fréquences des modes globaux, voir (**J. CHRISTENSEN-DALSGAARD 2003a**). l'héliosismologie globale peut nous donner des mesures sur la rotation interne du soleil, elle peut servir dans la comparaison entre les modèles solaires standard et les fréquences théoriques, avoir le profil de densité et la vitesse du son (**ANTIA H . 1994a**) et la détermination de la profondeur de la zone de convection (**ANTIA 2019**).

### **Héliosismologie Locale**

Les modes globaux sont d'une grande utilité pour l'étude de la dynamique et de la structure du soleil. Mais malheureusement, ils n'apportent pas une vision complète des différentes complexités du soleil. En effet, avec l'héliosismologie en mode global, il n'est pas possible de détecter les variations longitudinales ou les flux dans les plans méridionaux. Pour compléter l'héliosismologie globale, des techniques d'héliosismologie locale ont été mis au point pour cerner les perturbations locales du soleil (**GIZON et BIRCH 2005**). L'héliosismologie locale fournit une vue tridimensionnelle de l'intérieur solaire, ce qui est important pour comprendre les flux à grande échelle ainsi que les structures magnétiques et leurs interactions dans l'intérieur solaire. (Pour plus de détails, voir **ABDELATIF T. E. 1986 et Braun**). Cette méthode est la base du traitement des données que nous avons utilisé dans ce travail afin d'explorer la variation du gradient radial de la rotation différentielle durant presque deux cycles solaires ainsi que sa relation avec l'activité solaire.

L'héliosismologie locale emploie 3 principales techniques qui sont : la technique du Time-distance, l'holographie acoustique et les diagrammes en anneaux (**HINDMAN, HABER et TOOMRE 2006, ROTH, M. DORR, H.P. ZAATRI, A. THOMPSON, M.J. 2009**). Cette dernière est la méthode utilisée pour traiter les données brutes de GONG que nous avons

employé dans notre analyse. L'analyse des diagrammes en anneaux des spectres de puissance propre aux oscillations solaires obtenus à partir des données des Dopplergramme de GONG est effectuée avec le but d'étudier les champs de vitesse dans la partie extérieure de la zone de convection. Les spectres de puissance tridimensionnels sont adaptés à un modèle qui a un profil lorentzien en fréquence afin d'obtenir les deux composantes des flux sub-surface en fonction du nombre d'ondes horizontales et l'ordre des modes d'oscillation. Cette information est ensuite inversée en utilisant la méthode des moyennes localisées de façon optimale et la méthode des moindres carrés régularisée pour déduire la variation de la vitesse d'écoulements horizontaux en fonction de la profondeur. Cette technique nous donne des résultats sous forme de diagramme (exemple la figure 2.5).

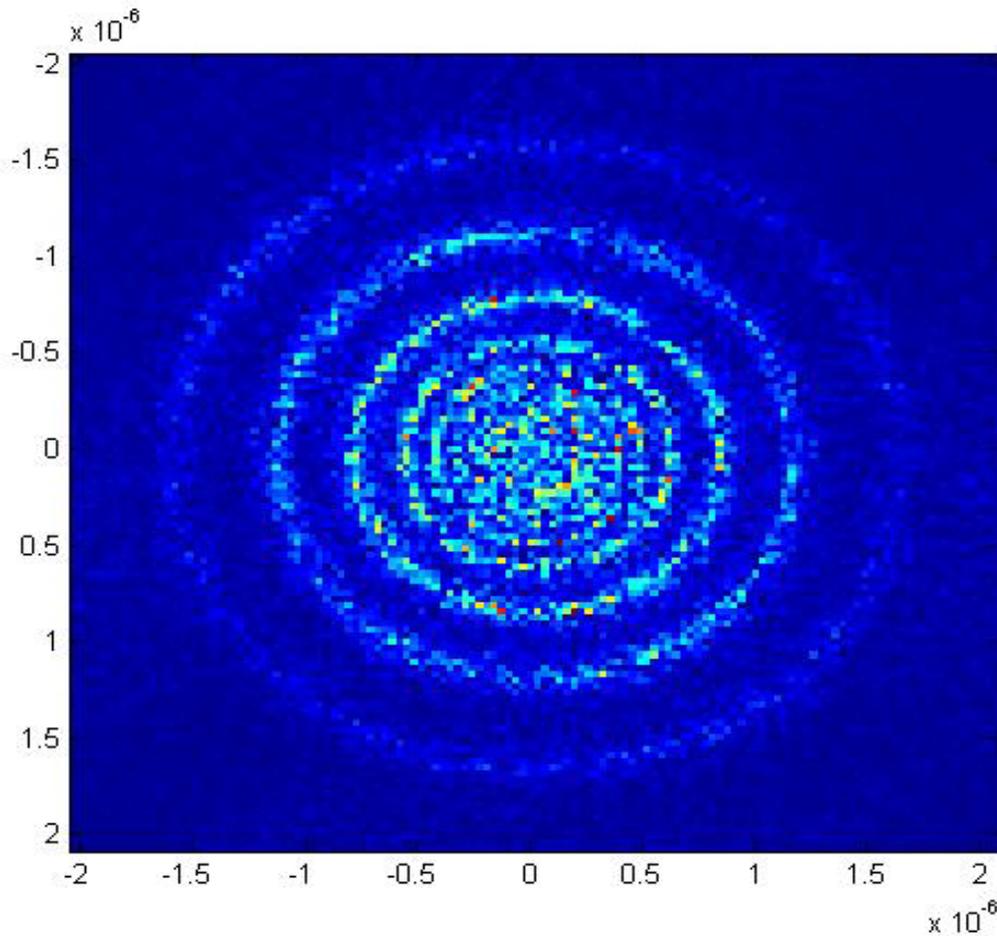


FIGURE 2.5 – Exemple de diagramme en anneaux 3D pour  $n = 3$  mHZ à partir des données de GONG, de dimensions (128.128.512)

Deuxième partie  
Analyse de données

# Chapitre 3

## Mesure et analyse du gradient radial de la rotation différentielle du soleil

### 3.1 But de l'étude

Le but de ce mémoire est d'étudier la variation du gradient radial de rotation (grr) sur presque 20 années de données fournies par les observations continues de GONG (une image chaque minute). Ce gradient est calculé à partir des vitesses horizontales délivrées par le groupe GONG après traitement des Dopplergrammes par la méthode des diagrammes en anneaux (<ftp://gong2.nso.edu/mring>), un exemple de carte journalière de vitesses horizontales est donné pour deux profondeurs dans les figures 3.1 et 3.2. Chaque vecteur de la carte est la résultante de deux composantes ( $V_x$  et  $V_y$ , résidu de la rotation et vitesse méridionale, respectivement). Les vitesses sont moyennées sur des régions s'étendant sur  $15^\circ$  en latitude et en longitude et dont les centres sont espacés de  $7.5^\circ$ . Le gradient radial de rotation est calculé en fonction de la profondeur, de la latitude et de la longitude en dérivant  $V_x$  en fonction du rayon.

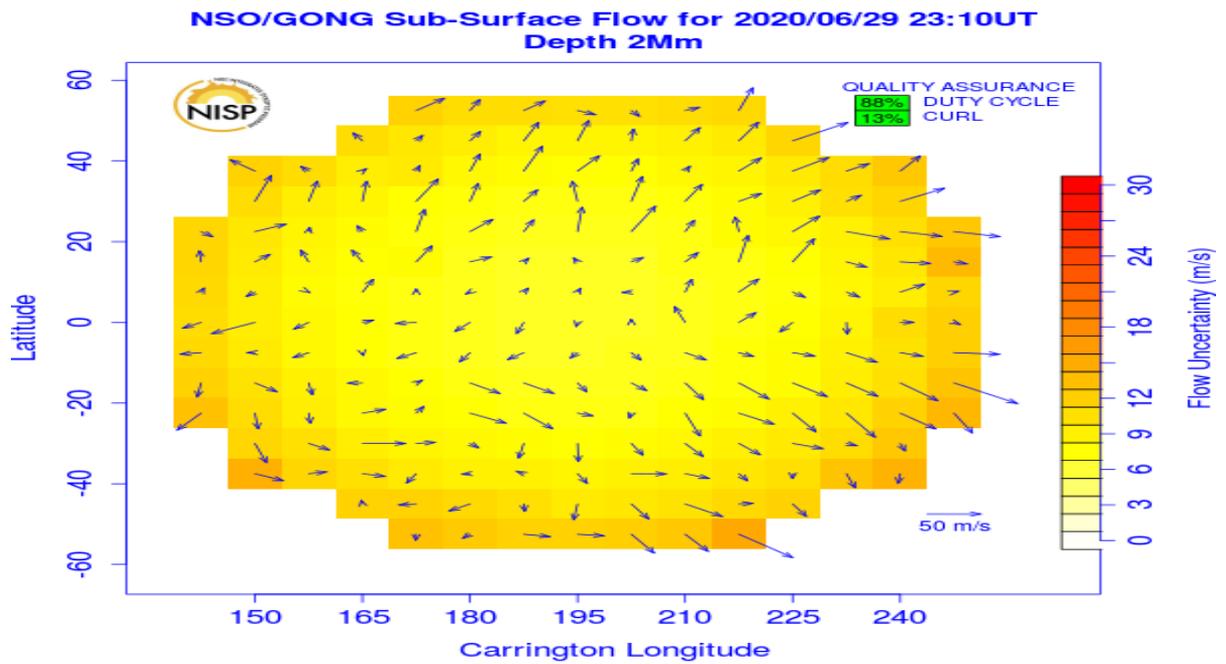


FIGURE 3.1 – Carte journalière du gradient radial de rotations une profondeur de 2 Mm

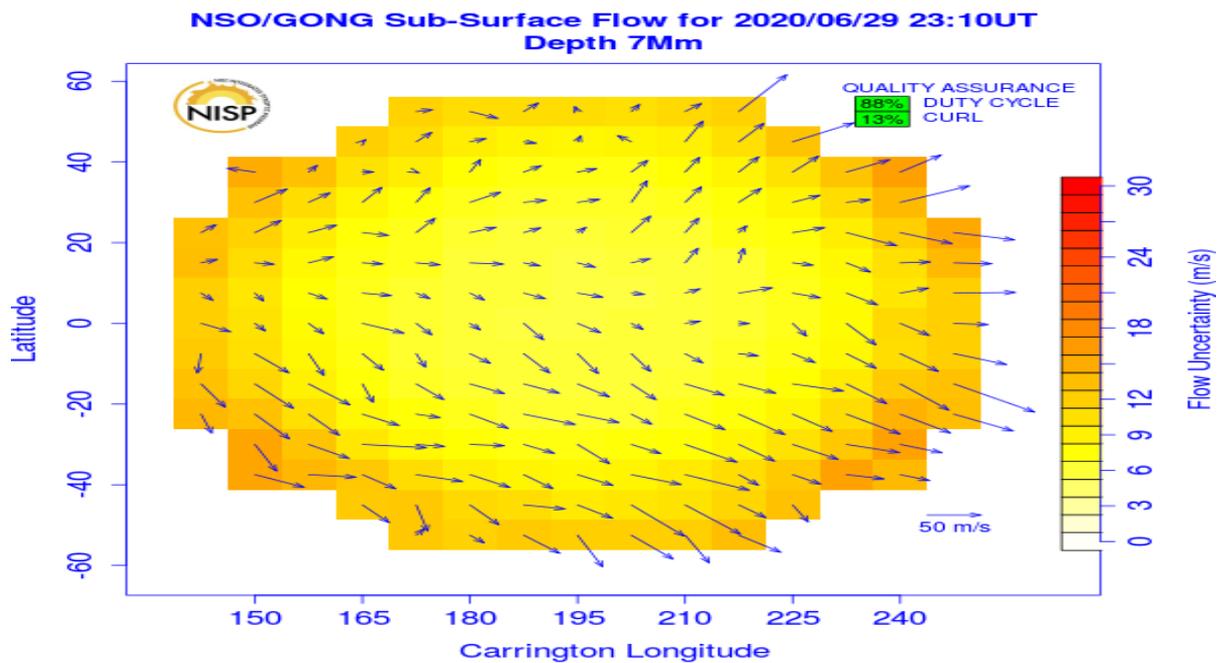


FIGURE 3.2 – Carte journalière du gradient radial de rotation a une profondeur de 7 Mm

## 3.2 Procédure

Le gradient radial de rotation est calculé dans la plage de profondeurs [2 Mm, 16 Mm] pour l'ensemble des latitudes disponibles  $[-52.5^\circ, 52.5^\circ]$ . Le gradient radial est généré pour 253 rotations Carrington (de la rotation Carrington 1979 jusqu'à 2231, c.-à-d. de Juillet 2001 jusqu'à Juin 2020). Le gradient radial est généré, en premier, sous forme de cartes synoptiques montrant sa variation en latitude et en temps (longitude Carrington) pour différentes profondeurs. L'intervalle des profondeurs sélectionnées est montré dans la figure 3.3. Ces cartes sont par la suite moyennées en longitude pour toutes les latitudes et profondeurs. Ainsi, une matrice [253,15,24] est générée, elle rassemble la variation temporelle et spatiale du gradient radial de rotation. La période étudiée est la phase du déclin de l'activité du cycle solaire 23 et tout le cycle 24 et une petite partie du début du cycle 25. Dans ce travail, nous avons utilisé le langage IDL (Interactive Data Language) pour l'analyse de toutes les données utilisées. Ce langage est très répandu dans la communauté des astronomes, notamment celle des physiciens solaires.

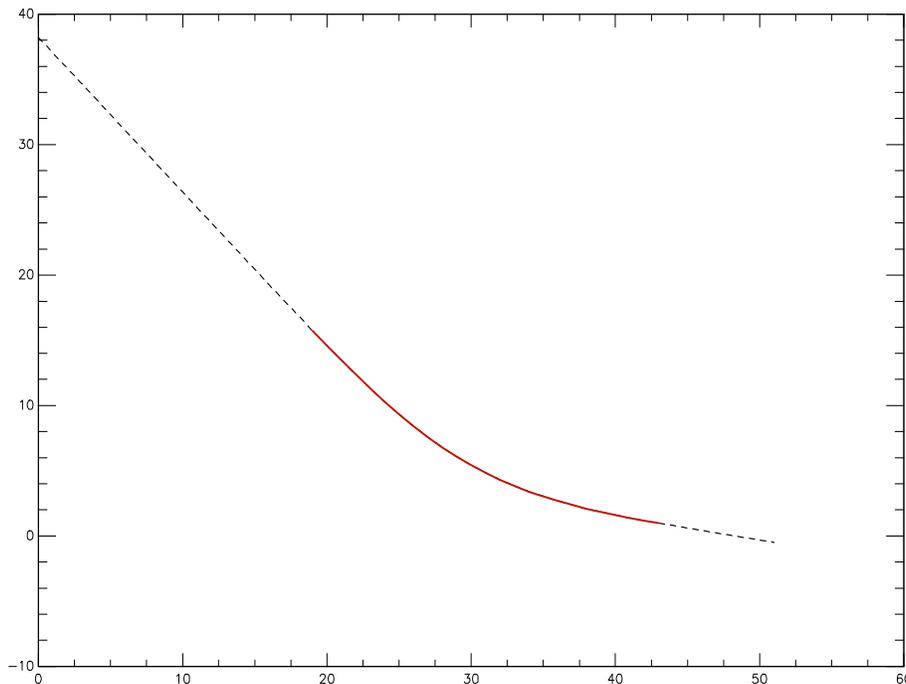


FIGURE 3.3 – Plages de profondeurs utilisées dans l'étude du gradient radial. La ligne discontinue représente toute la profondeur présente dans les données de GONG, la ligne rouge représente l'intervalle des profondeurs utilisées dans notre étude.

### 3.3 Variation à long terme du gradient radial

#### 3.3.1 Comportement moyen du gradient

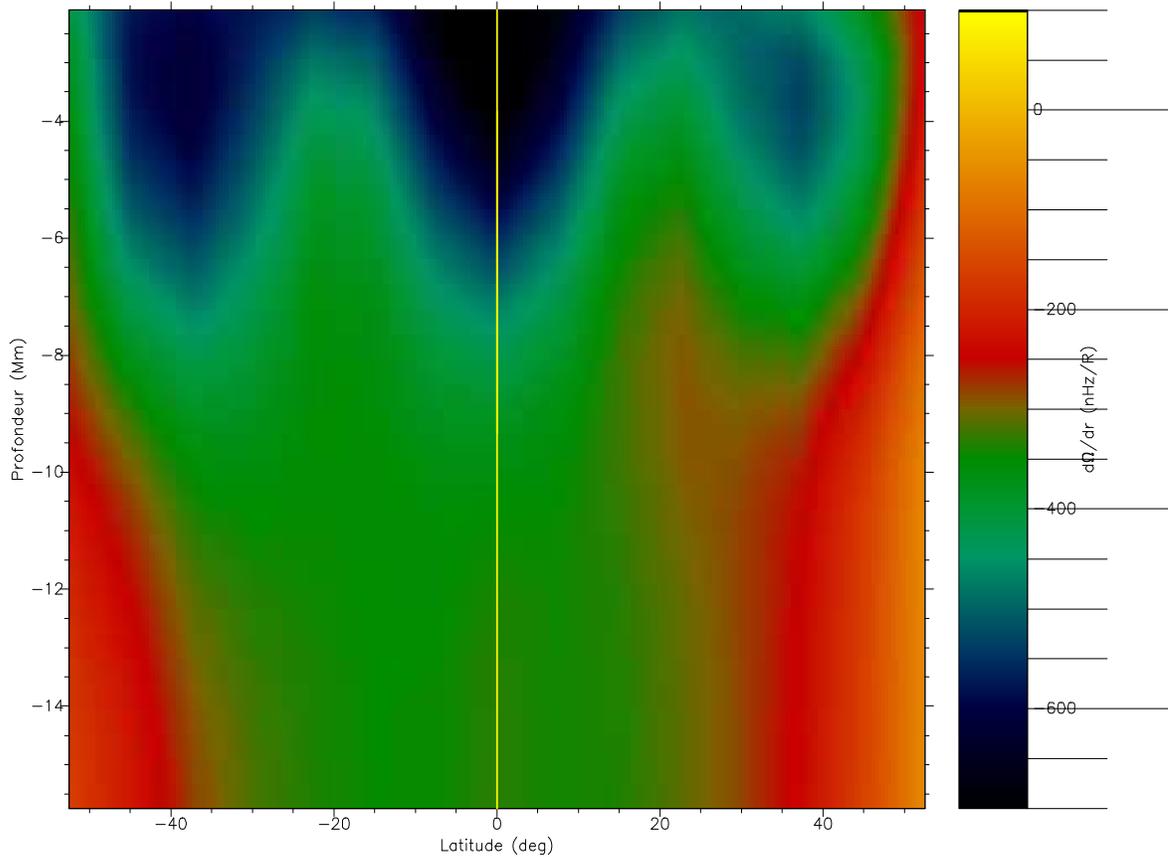


FIGURE 3.4 – Variation du gradient radial moyenné sur 253 Rotation Carrington en fonction de la latitude et de la profondeur

La variation en latitude et en profondeur du gradient radial est déterminée aux latitudes jusqu'à 52,5 et à des profondeurs comprises entre 2 et 16 Mm.

La figure 3.4 représente le gradient radial de rotation moyenné sur toute la période de l'étude en fonction de la profondeur et la latitude. On remarque que le gradient radial est négatif sur toute la plage spatiale considérée. L'amplitude de ce gradient près de la surface (entre 2 Mm et 8 Mm), est très élevée au niveau des basses et moyennes latitudes (ceinture d'activité). Cette tendance est plus importante dans l'hémisphère sud que dans

l'hémisphère nord. Dans les profondeurs au delà de 8 Mm, on remarque que le gradient devient de plus en plus homogène mais toujours plus prononcé dans l'hémisphère sud.

Pour être plus rigoureux, on doit mettre en valeur le comportement du gradient radial près de la surface et en profondeurs, donc on a établie des cartes synoptiques de ce dernier sur toute la période d'étude mais cette fois pour des profondeurs bien définîtes et les résultats sont illustrés dans la figure 3.5.

Dans la figure 3.5, on remarque que dans les profondeurs allant de 2 à 8 Mm, la majorité du gradient fort est situé au niveau de la ceinture équatoriale (ou d'activité comprise entre  $-20^\circ$  et  $20^\circ$ ) et il atteint même la barre des 900 nHz/R, ensuite, le gradient présente un affaiblissement avec la latitude. Le gradient diminue à nouveau entre  $25^\circ$  et  $40^\circ$  que les augmentations moyennes pour des latitudes allant jusqu'à  $45^\circ$ . De  $45^\circ$  et au-delà, le gradient diminue considérablement avec la latitude. À mesure que nous nous incrustant plus profondément (entre 8 et 16Mm), l'amplitude du gradient diminue à toutes les latitudes et le contraste latitudinaire devient moins prononcé jusqu'à ce que le gradient devienne à peu près constant (environ 350 nHz/R) de l'équateur aux latitudes allant jusqu'à  $40^\circ$ . On observe également que les amplitudes du gradient sont plus faibles dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud.

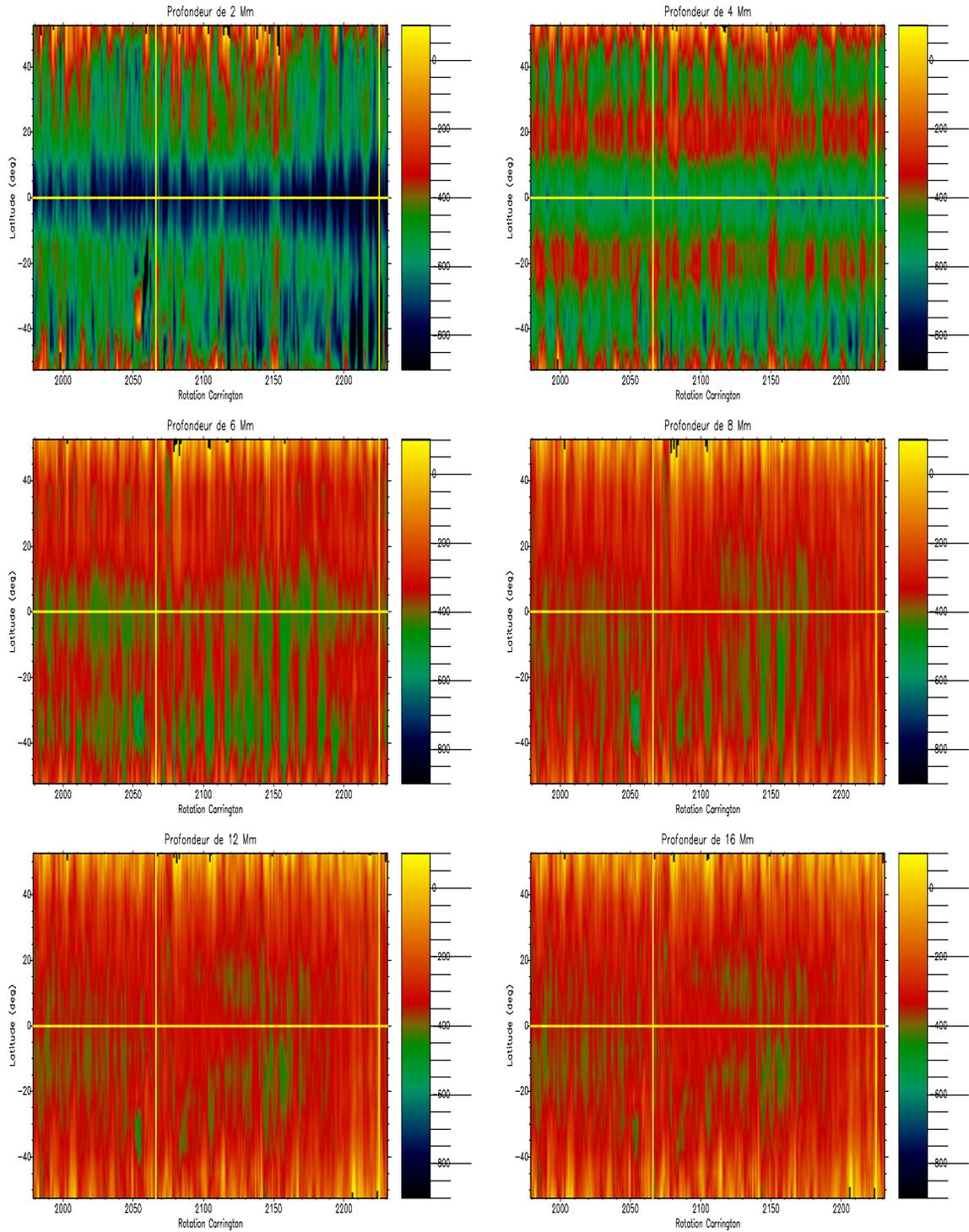


FIGURE 3.5 – Représentation de la variation du gradient radial en fonction du temps et de la latitude pour des profondeurs données. Les ligne verticale représentent les démarcations des cycles et la ligne horizontale représente l'équateur solaire

### 3.3.2 Le gradient radial dans les deux hémisphères

Le gradient radial est étudié pour des profondeurs allant jusqu'à 16 Mm mais cette analyse n'a accès qu'aux composantes asymétriques de la rotation. Afin de confronter ces résultats avec ceux obtenus à partir de l'analyse des Ring Diagramme, j'ai établi des cartes synoptiques à différentes profondeurs pour les latitudes des deux hémisphères avec le même axe de temps de l'étude. La figure 3.6 et 3.7 représentent le comportement du gradient radial dans les deux hémisphères en fonction de la profondeur et des deux intervalles de latitude  $[-45^\circ, -7,5^\circ]$  pour le sud et  $[7,5^\circ, 45^\circ]$  pour le nord.

Dans les figures 3.6 et 3.7, on voit clairement le contraste entre le gradient radial au sein de l'hémisphère sud et celui de l'hémisphère nord, ce dernier est concentré dans le sud, aussi, on remarque que plus la profondeur augmente, plus le gradient perd en intensité jusqu'à devenir presque constant dans l'hémisphère nord au-delà de 6 Mm (environ 250 nHz/R), par contre au niveau de l'hémisphère sud, on remarque la présence de traces de gradient avec 350 nHz/R d'intensité. Les latitudes au-delà de  $45^\circ$  ont été exclues d'une part à cause du gradient positif présent au niveau de ces latitudes qui est considéré comme une aberrance au sein des cartes synoptiques car il cache en quelque sorte les gradients négatifs forts de courte durée, et d'une autre part, à cause de **l'effet du foreshortening** dans ces latitudes, qui peut amener à des résultats ambigus.

Dans le futur, l'analyse des images à haute résolution fournies par l'expérience HMI (Heliosismic and Magnetic Imager) à bord du satellite SDO nous en dira plus sur l'emplacement et la puissance du gradient positif présent dans les latitudes élevées (au-delà de  $60^\circ$ ).

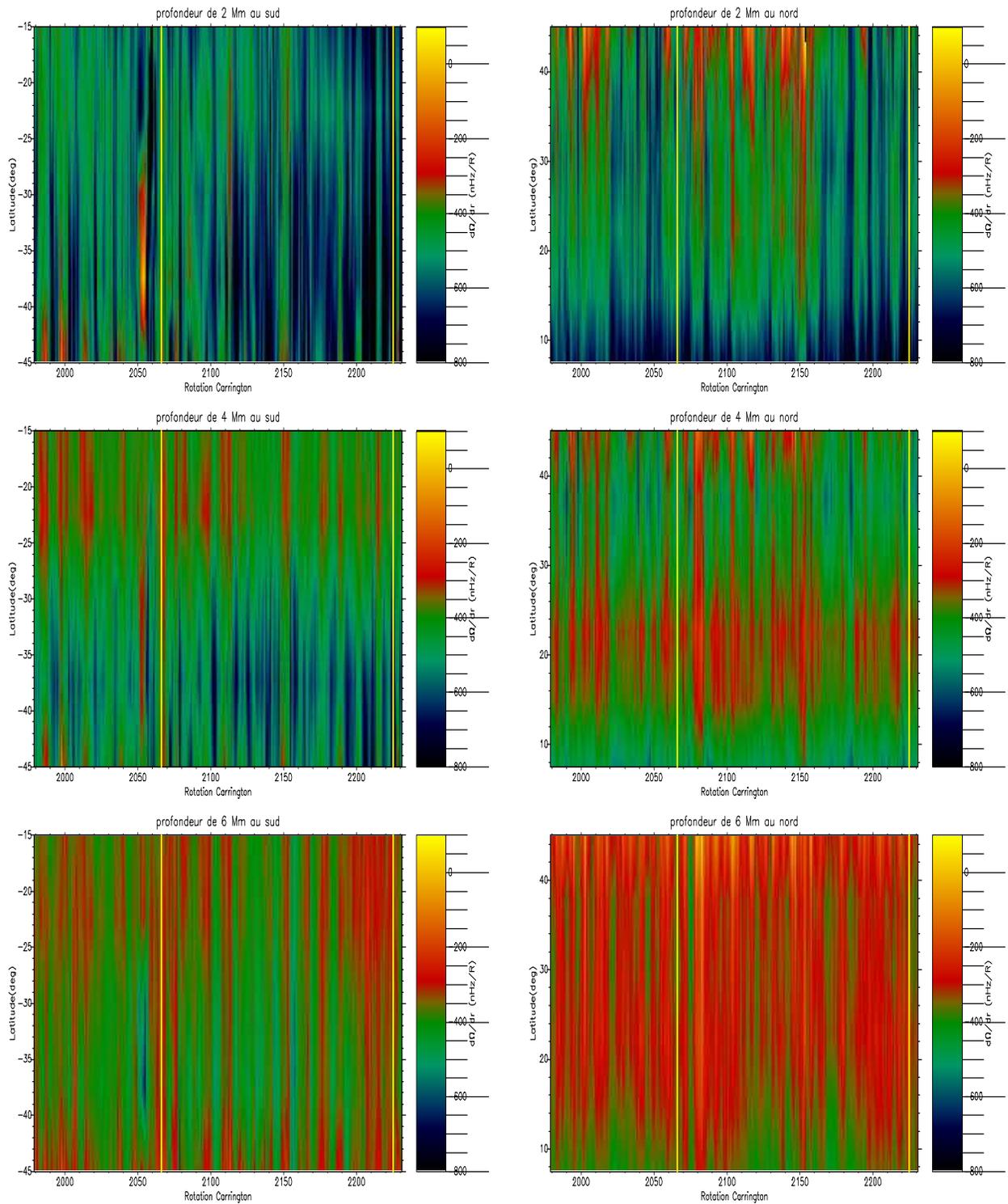


FIGURE 3.6 – Cartes synoptiques qui représentent le contraste entre le gradient radial au sud et au nord de l’hémisphère solaire en fonction du temps (rotations Carrington) et de la latitude (degré), et cela, à des profondeurs de 2 Mm, 4 Mm et 6 Mm. Les lignes jaunes représentent (celle de gauche) la fin du cycle 23 donc le début du cycle 24 et (celle de droite) représente la fin du cycle 24 donc le début du cycle 25.

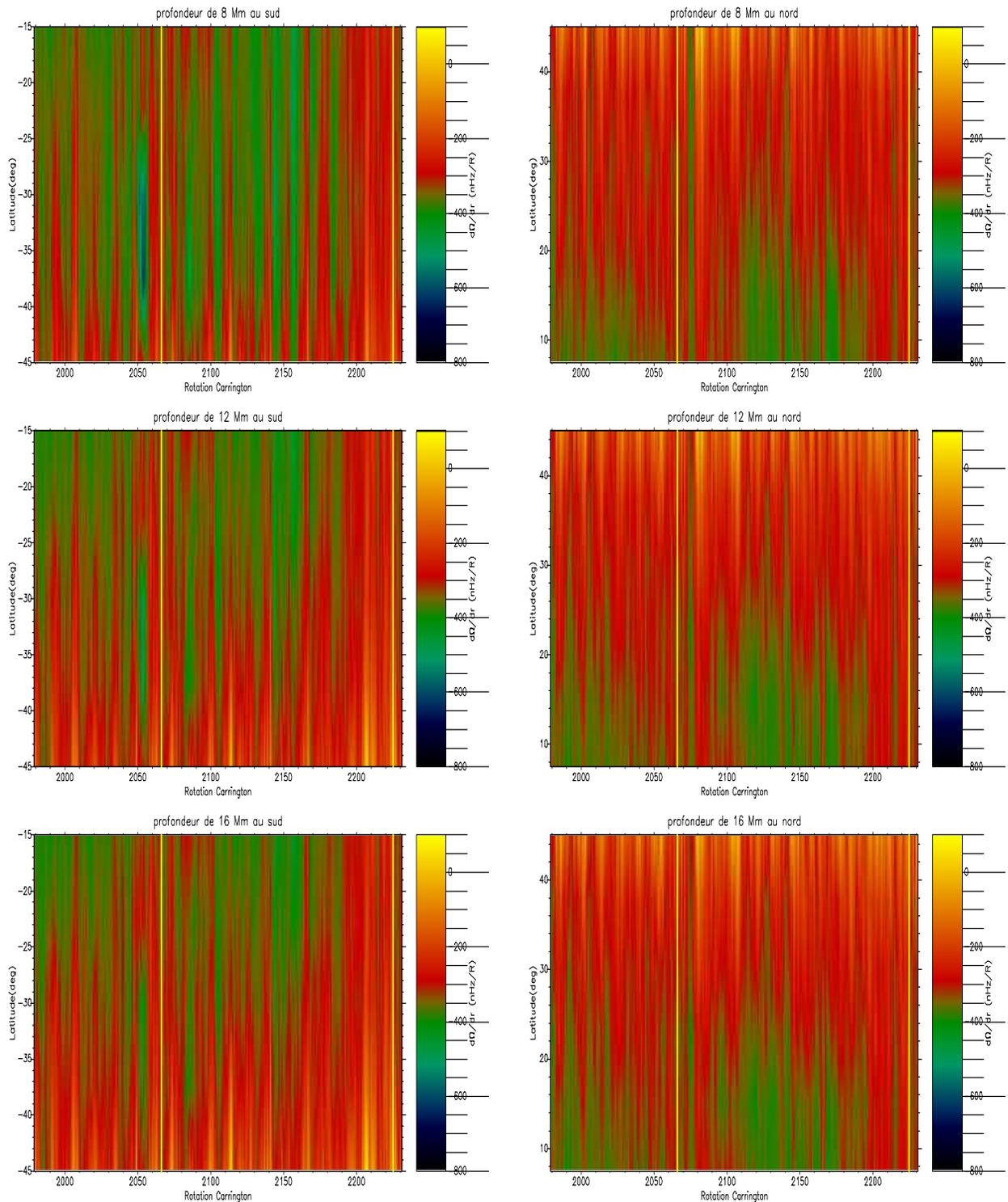


FIGURE 3.7 – Cartes synoptiques qui représentent le contraste entre le gradient radial au sud et au nord de l’hémisphère solaire en fonction du temps (rotations Carrington) et de la latitude (degré), et cela, à des profondeurs de 8,12 et 16 Mm. Les lignes jaunes représentent (celle de gauche) la fin du cycle 23 donc le début du cycle 24 et (celle de droite) représente la fin du cycle 24 donc le début du cycle 24.

### 3.3.3 Variation spatio-temporelle du gradient

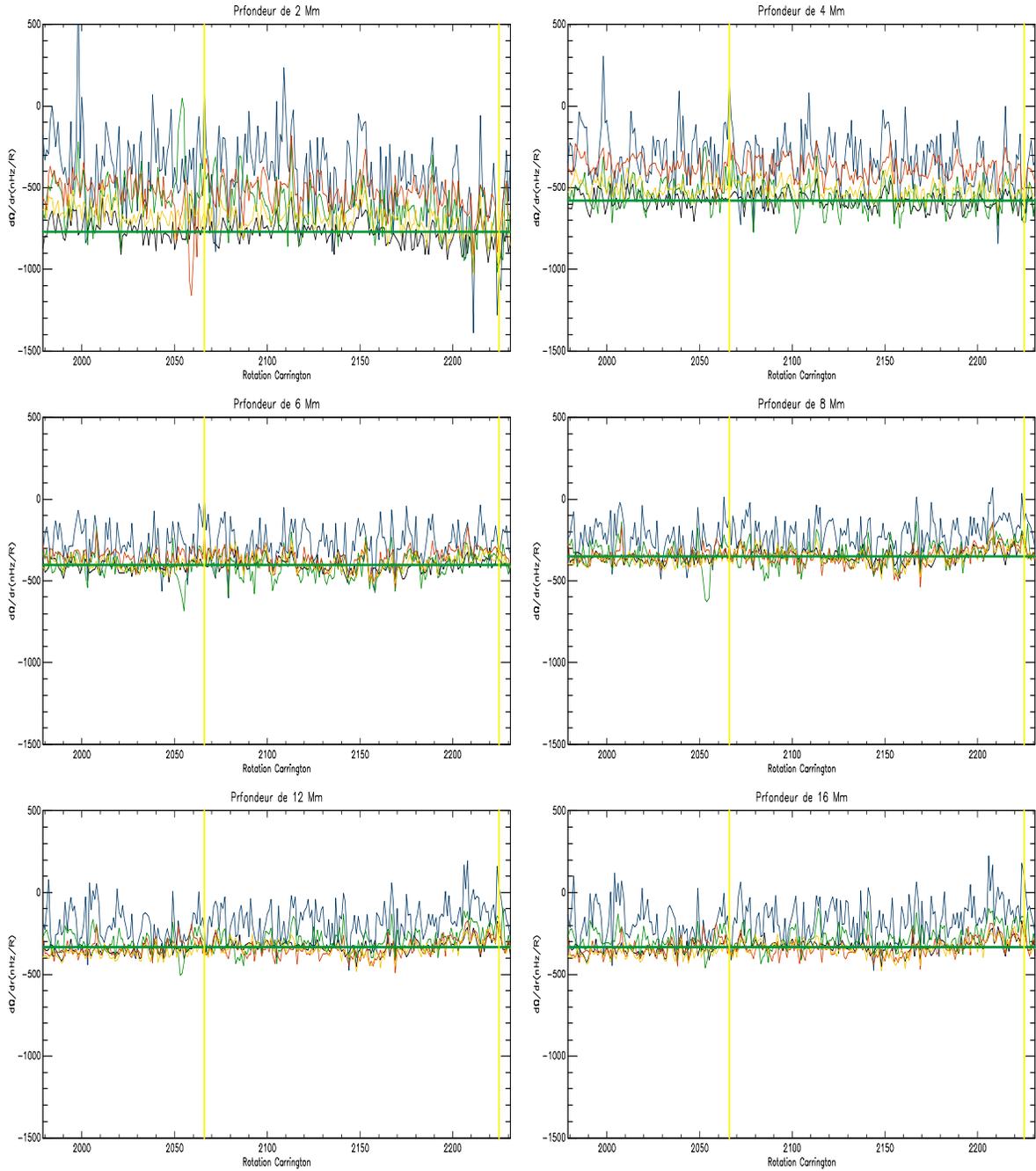


FIGURE 3.8 – Représentation du gradient radial dans différentes latitudes du sud à travers toute la période d'étude. La ligne verte représente la moyenne du gradient radial sur les latitudes et les ligne jaunes représentent les démarcations des cycles. Le bleu représente la latitude  $-52,5^\circ$ , le rouge  $-37,5^\circ$ , l'orange  $-22,5^\circ$  et le vert claire  $-7,5^\circ$ .

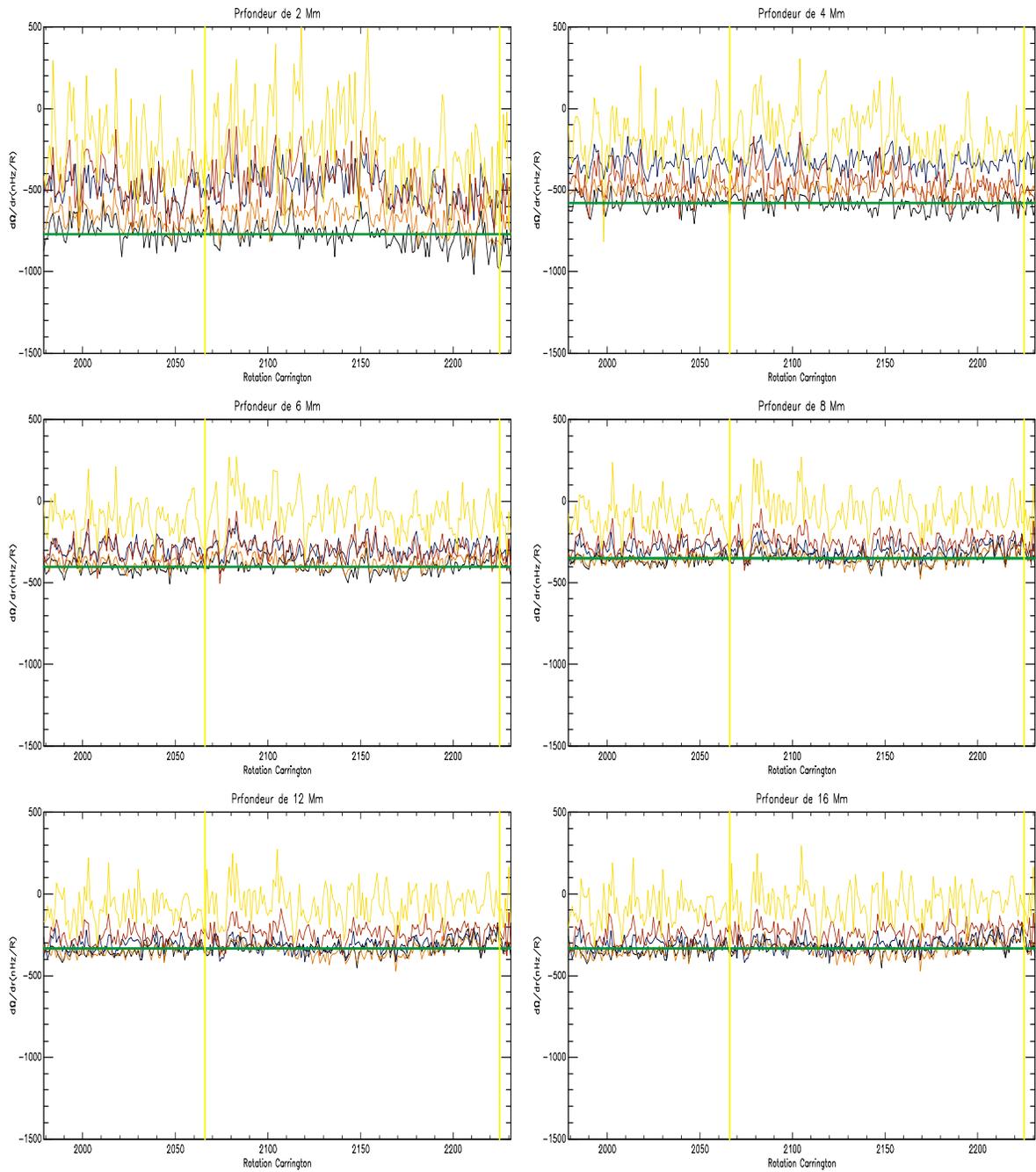


FIGURE 3.9 – Représentation du gradient radial dans différentes latitudes du nord à travers toute la période d'étude. La ligne verte représente la moyenne du gradient radial sur les latitudes et les ligne jaunes représentent les démarcations des cycles. L'orange représente la latitude  $7,5^\circ$ , le violet  $22,5^\circ$ , le rose  $37,5^\circ$  et l'orange claire  $52,5^\circ$ .

Comme précisé au par avant, on remarque la présence d'un gradient radial fort près de la surface solaire, Afin de mieux voir la variation spatio-temporelle de ce dernier dans les couches superficielles de la photosphère et en profondeurs et surtout la variation des amplitudes du gradient radial, j'ai tracé ( dans les figures 3.8 et 3.9) les valeurs d'intensité du gradient comprises entre  $-1500 \text{ nHz/R}$  et  $500 \text{ nHz/R}$ , en fonction du temps et de la latitude (plusieurs latitudes a la fois) pour des profondeurs données et cela pour les deux hémisphères, ce fort gradient est observé sur l'ensemble de la période d'étude (253 Rotation Carrington).

Dans la figure 3.8, on remarque, comme au par avant, que le gradient radial est fort près de la surface, mais par contre, maintenant on voit que la moyenne du gradient radial sur toutes les latitude (tracé en vert) pour toutes les profondeurs. On remarque que près de la surface, ce dernier a une valeur moyenne de  $750 \text{ nHz/R}$  a  $2 \text{ Mm}$  de profondeur et  $600 \text{ nHz/R}$  a  $4 \text{ Mm}$ , mais plus la profondeur augmente, plus cette moyenne s'affaiblit jusqu'à devenir stable au delà de  $6 \text{ Mm}$  avec une amplitude moyenne de  $350 \text{ nHz/R}$ .

Au niveau de la figure 3.9, nous remarquons que le gradient radial au nord a des amplitudes et des valeurs moyenne du gradient très similaire a ceux du sud notamment dans la surface, aussi, nous remarquons que le gradient radial du sud n'a presque pas de valeurs positives, par contre, ce dernier est présent de façon abondante dans l'hémisphère nord avec des amplitudes positives relativement faibles et cela sur toutes les profondeurs.

### 3.4 Corrélation du gradient radial avec le champ magnétique

Pour arriver à conclure que la variation du gradient radial de rotation est directement liée à l'activité solaire, il faut étudier la corrélation entre le gradient et les variables physiques définissant l'activité solaire. Dans ce mémoire, nous allons confronter la variation du gradient radial de rotation et la variation du champ magnétique solaire, et cela sur tout le long de la période d'étude. Pour ce faire, nous utilisons les carte synoptiques du champ magnétique observé par les instruments MDI/SOHO et HMI/SDO en nombre de 253 (même période que celle correspondant à l'étude du gradient). Des exemples de cartes synoptiques du champ magnétique sont données dans les figures 3.10 et 3.11, pour une période de faible activité et autre de forte activité, respectivement . Ces cartes ont été adaptées à la résolution spatiale des vitesses horizontales ayant servi au calcul du gradient, donc moyennées sur des régions de 15/15 en latitude et en longitude. Les résultats sont représentés par les figures 3.12 et 3.13.

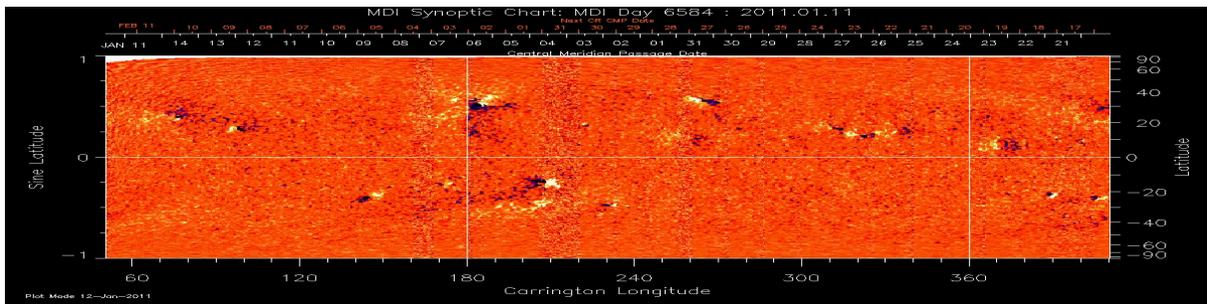


FIGURE 3.10 – Carte synoptique du C. Magnétique au minimum d'activité du cycle 24

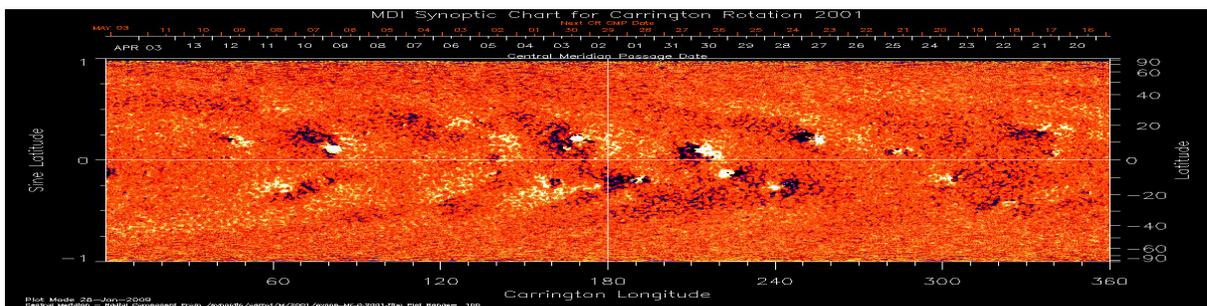


FIGURE 3.11 – Carte synoptique du C.Magnétique au maximum d'activité du cycle 23

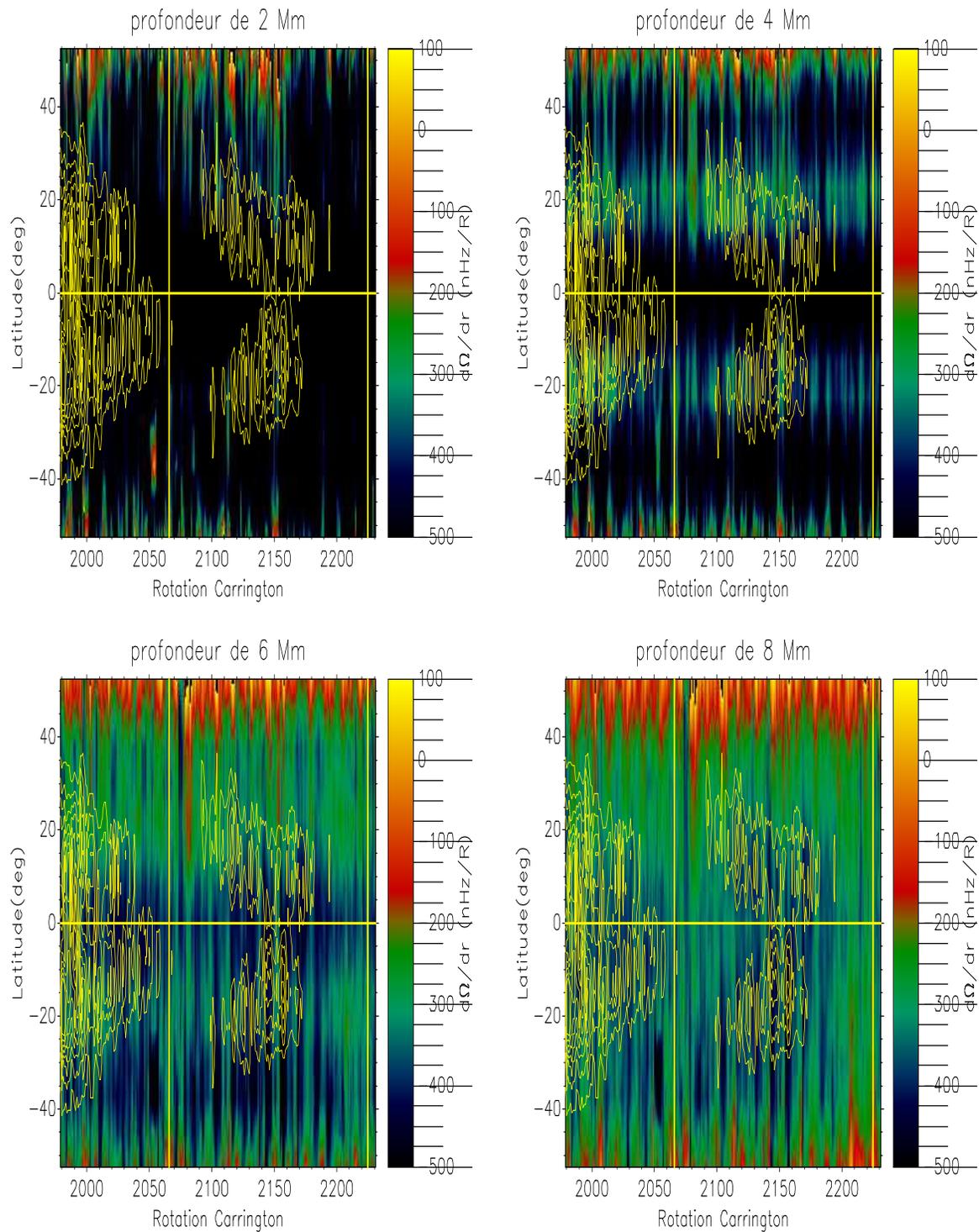


FIGURE 3.12 – Représentation synoptique du gradient radial superposé par le champ magnétique en fonction du temps et de la latitude pour des profondeurs de 2 Mm, 4 Mm, 6 Mm et 8 Mm.

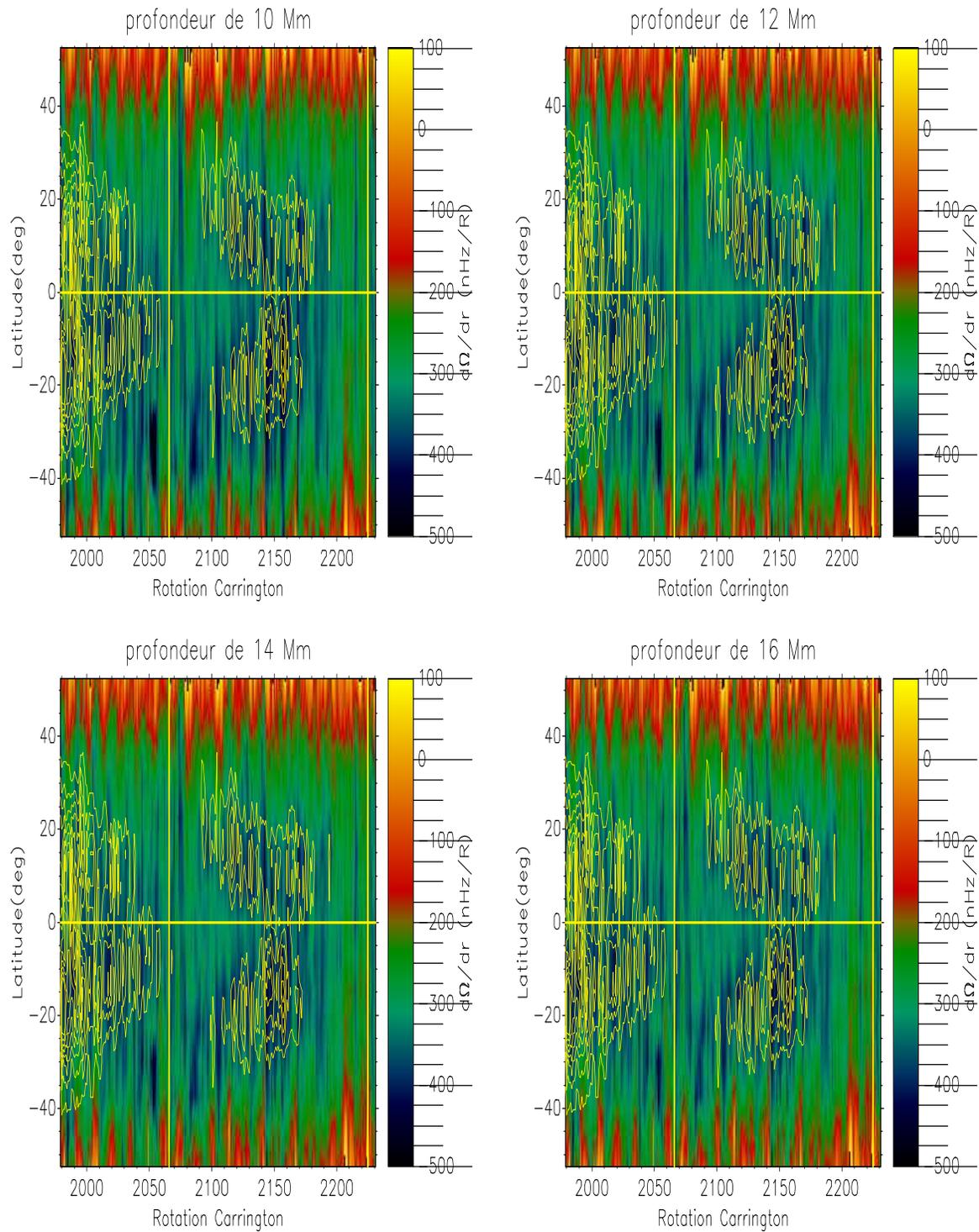


FIGURE 3.13 – Représentation synoptique du gradient radial superposé par le champ magnétique en fonction du temps et de la latitude pour des profondeurs de 10 Mm, 12 Mm, 14 Mm et 16 Mm.

La figure 3.12, représente la variation spatio-temporelle du gradient radial de rotation pour des profondeurs allant de 2 Mm à 6 Mm à laquelle on superpose le champ magnétique de surface. Pour ces couches sous-photosphériques, nous remarquons qu'il n'y a pas de corrélation entre le gradient radial de rotation et le champ magnétique. Ceci est valable pour les deux hémisphères et pour les deux cycles magnétiques étudiés.

La figure 3.13, représente la variation spatio-temporelle du gradient radial de rotation pour des profondeurs allant de 10 Mm, 12Mm, 14Mm et 16 Mm à laquelle on superpose le champ magnétique de surface. Pour ces couches plus profondes, on constate une corrélation entre le champ magnétique et le gradient radial de rotation, en effet, les fortes amplitudes de ce dernier se positionnent au niveau des régions avec un fort champ magnétique (là où l'activité a lieu). Cette corrélation est présente au niveau des deux cycles 23 et 24 et une forme semblable au diagramme des papillons et aussi visible au niveau de la variation du gradient radial de rotation, ce qui renforce la relation de la variation du gradient radial de rotation à l'activité solaire.

Cette corrélation peut être expliquée par la complexité de la génération du champ magnétique, ce dernier est généré en profondeur avant d'être transporté vers la surface solaire.

Dans ce cas, on peut conclure que le champ magnétique et le gradient radial de rotation sont étroitement liés.

### 3.4.1 Coefficients de corrélation

Bien évidemment, toute étude de corrélation doit considérer le coefficient de corrélation entre les deux signaux. Dans les figures 3.14, 3.15 et 3.16, nous avons représenté le coefficients de corrélation entre le gradient radial de rotation et le champ magnétique pour toutes la période d'étude, le cycle 23 et le cycle 24, respectivement.

Pour Toutes la période d'étude

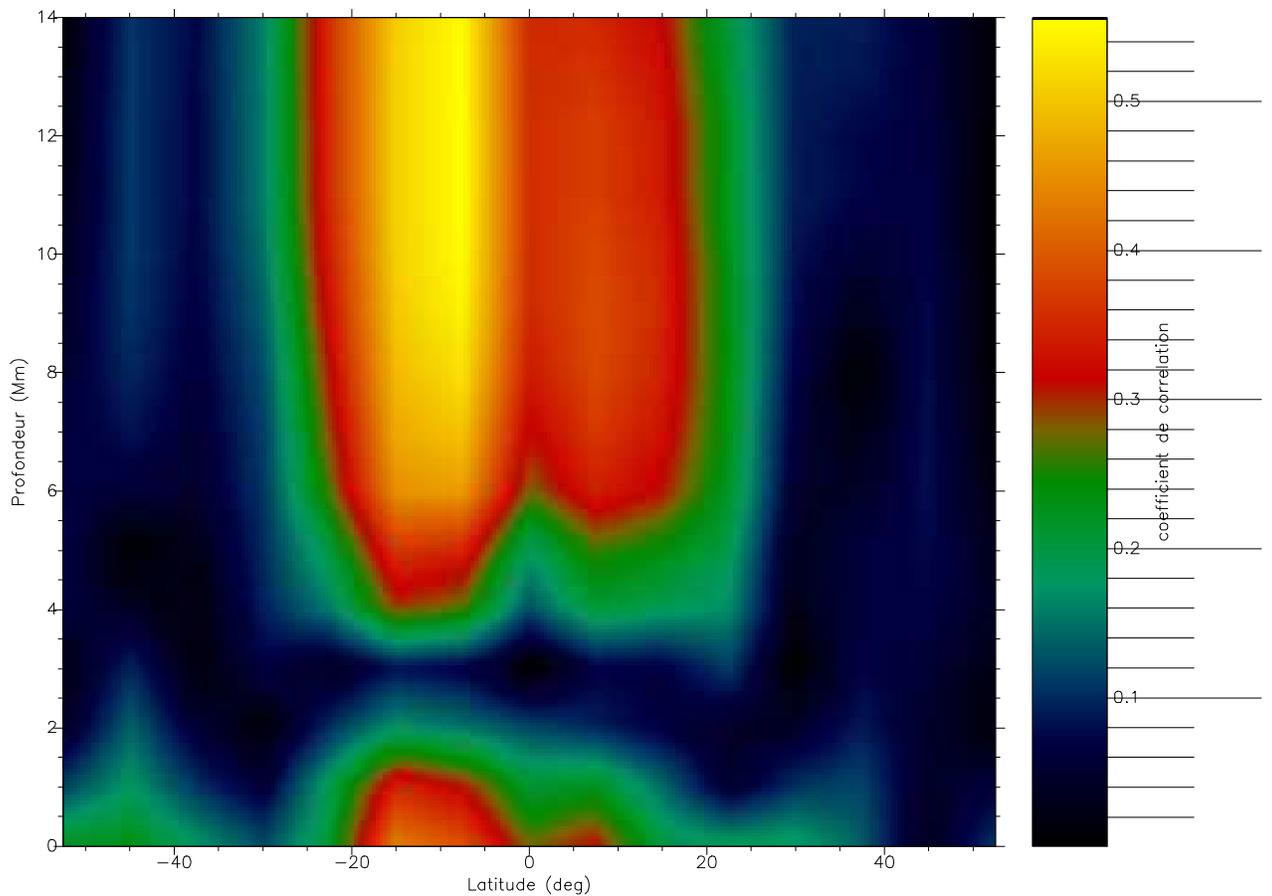


FIGURE 3.14 – Représentation du coefficient de corrélation entre le gradient radial de rotation et le champ magnétique sur 253 rotation Carrington

Dans la figure 3.14, nous remarquons que le coefficient de corrélation est très faible pour les latitudes supérieures à 20 dans les deux hémisphères, et aussi dans les couches situées au dessus de 4Mm de profondeur. par contre, dans la ceinture d'activité et dans les profondeurs au delà de 4 Mm, le

coefficient commence à augmenter jusqu'à atteindre une valeur supérieure à 0.5, ce qui signifie qu'il y'a une bonne corrélation entre le gradient de rotation et le champ magnétique au niveau des couche profondes et à des latitudes proche de l'équateur, ce qui explique la forme du diagramme papillon du gradient.

### Pour le cycle solaire 23

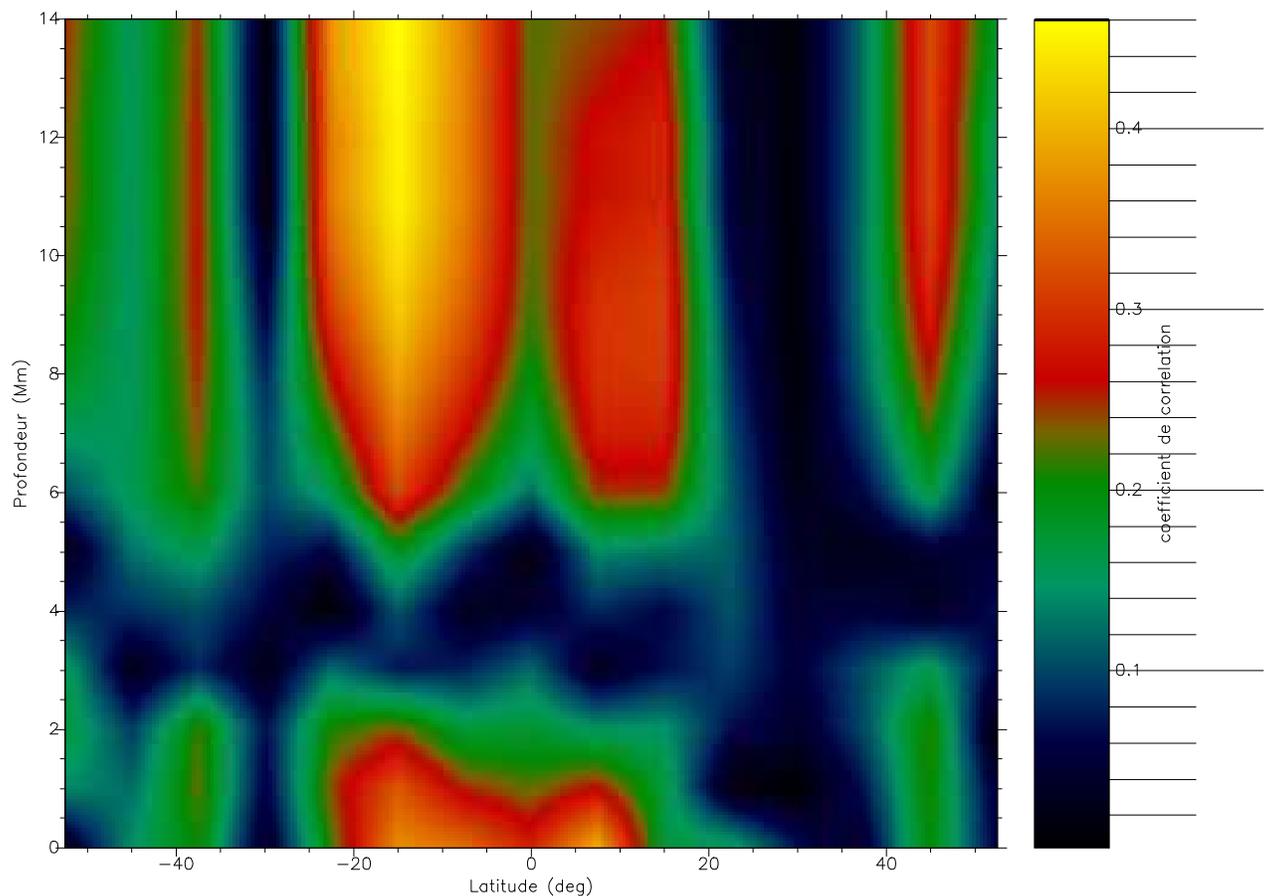


FIGURE 3.15 – Représentation du coefficient de corrélation entre le gradient radial de rotation et le champ magnétique sur le cycle 23

Au niveau de la figure 3.15, le coefficient de corrélation entre le gradient radial et le champ magnétique du cycle 2, comme le coefficient de toutes la période d'étude, a ses plus grandes valeurs au niveau de la ceinture d'activité a des profondeur au delà de 6 Mm, à l'exception de la présence d'une plus faible corrélation au niveau des latitudes supérieurs a 40° et à des profondeurs au delà de 6 Mm.

## Pour le cycle solaire 24

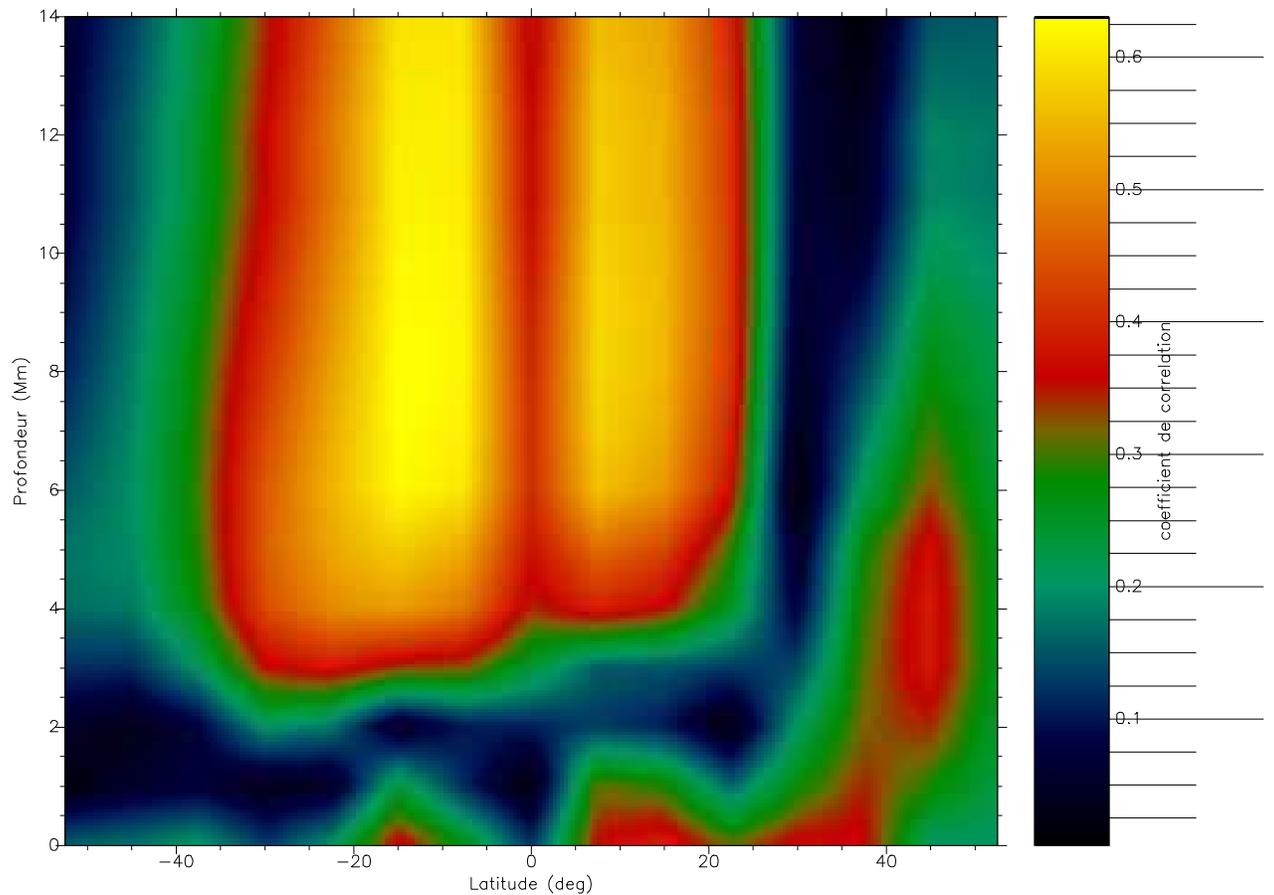


FIGURE 3.16 – Représentation du coefficient de corrélation entre le gradient radial de rotation et le champ magnétique sur le cycle 24

Dans la figure 3.16, le coefficient de corrélation entre le gradient radial et le champ magnétique du cycle 24 pour ces valeurs les plus importantes ( $> 0.5$ ) s'étend sur des latitudes allant jusqu'à  $40^\circ$  au sud et  $30^\circ$  au nord et ça à des profondeurs allant de 3 Mm jusqu'à 16 Mm avec la présence d'un faible coefficient ( $< 0.4$ ) au delà de  $40^\circ$  au nord et à des profondeurs comprises entre 2 Mm et 8 Mm.



# Conclusion

L'analyse à long terme de la variation du gradient radial de la rotation du soleil peut être d'un grand apport dans la compréhension et modélisation de la dynamo solaire.

L'étude de la variation à long terme du gradient radial de rotation a été accomplie par l'analyse des vitesses horizontales obtenue du traitement d'image des observations de GONG. Dans ce travail, nous avons considéré les couches sous-photosphériques s'étendant de 2 Mm à 16 Mm de profondeur, et allant de l'équateur à  $52,5^\circ$  en latitude dans deux hémisphères. La dimension temporelle traitée est d'environ 19 ans [Juillet 2001 - Juin 2020], qui inclut la phase du déclin d'activité du cycle 23 et les deux phases du cycle 24 et une petite partie du cycle 25.

Le gradient radial de rotation est négatif sur pratiquement toute la période et l'espace considéré.

L'étude de l'asymétrie du gradient radial a déterminé que le gradient radial de rotation est plus fort dans l'hémisphère sud que dans l'hémisphère nord, ce qui est cohérent avec l'activité magnétique sur toute la période étudiée.

Le gradient radial de rotation et le champ magnétique ne sont pas corrélés dans les couches sous-photosphériques situées au dessus de 6Mm et cela pour toute la période étudiées. Par contre, au niveau des couche plus profondes (de 6Mm à 16 Mm) il y'a une bonne corrélation entre les deux signaux. Cette corrélation est présente dans les deux cycles magnétiques et dans les deux hémisphères ce qui indique la relation forte entre la variation du gradient radial et la dynamique solaire.

Ainsi, le gradient radial de rotation prend la forme d'un diagramme papillon, où les régions de forte activité correspondent aux régions de fortes amplitudes du gradient radial de rotation.

Ce travail nous a dirigés vers plusieurs études possibles sur la variation du gradient radial solaire :

- Dans une future étude, nous pourrions nous concentrer sur les régions de fort gradient de rotation et étudier en détail toute l'activité solaire ayant eu lieu avant et après l'apparition d'un tel gradient, afin de réfléchir à un éventuel prédicteur de l'activité solaire.
- La corrélation du gradient radial avec l'activité magnétique solaire peut être soutenue par l'étude d'éventuelles corrélations avec d'autres indices de l'activité solaire.
- La possibilité d'améliorer notre analyse avec l'utilisation des données à hautes résolutions fournies par l'instrument HMI à bord du satellite SDO.

# Bibliographie

- ABDELATIF T. E., Lites B. W. Thomas J. H. (1986). “The interaction of solar  $p$ -modes with a sunspot. i - observations”. In : *ApJ* 311, p. 1015-1024.
- ANTIA, Sarbani Basu H. M. (2019). “Changes in the solar rotation over two solar cycles”. In : *astro-ph.SR*. DOI : [arXiv:1908.05282v1](https://arxiv.org/abs/1908.05282v1).
- ANTIA H., M. Basu S. (1994a). “Nonasymptotic helioseismic inversion for solar structure.” In : *AA* 107, p. 421-444.
- APPOURCHAUX, T. et al. (2009). “The quest for the solar  $g$  mode”. In : *ArXiv e-prints*. *Accepted for publication in Astr. - Sol. and Stel. Astrophys.*
- BROWN, T. M. (1996). “Techniques for observing solar oscillations. In T. Roca- Cortés and F. Sánchez, editors, VI Canary Islands Winter School of Astrophysics : The structure of the Sun”. In : *Cambridge University Press.*, p. 1-45.
- BULDGEN, Gaël (2018). “School of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, UK.” In : p. 1001-1026.
- BULDGEN, Gaël, SÉBASTIEN et Salmon Arlette NOELS (2019). “Global Helioseismology”. In : *astro-ph.SR*. DOI : [arXiv:1912.02003v1](https://arxiv.org/abs/1912.02003v1).
- CARRINGTON (1858). “On the distribution of solar spots in latitude”. In : *MNRAS* 19.1.
- CHARBONNEAU, Paul (2010). “Dynamo Models of the Solar Cycle”. In : *Living Rev. Solar Phys.* 7.3. DOI : <http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-3>.
- CHRISTENSEN-DALSGAARD, J. (2003a). “Helioseismology”. In : *Reviews of Modern Physics* 74.4, p. 1073-1129.
- (2003b). *Lecture notes on Stellar Oscillations*. 5th edition. Aarhus Universitet.
- CHRISTENSEN-DALSGAARD, Jorgen (2014). *Stella oscillations*. Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.
- CORBARD, Thierry (1998). “Inversion des mesures héliosismologiques : la rotation interne du soleil”. Thèse de doct. Université de Nice.
- DEUBNER, F. L., R. K. ULRICH et E. J. RHODES (1979). “Solar  $p$ -mode oscillations as a tracer of radial differential rotation”. In : *AA* 72, p. 177-185.
- DIKPATI, M. et P. A. GILMAN (2009). “Flux transport solar dynamos. In M. Thompson and A. B. et al., editors”. In : *The origin and dynamics of Solar magnetism*, p. 67-75.
- FORESTINI, M. (1999). *Principes fondamentaux de structure stellaire*. Report. Gordon et Breach Science Publishers.
- GIZON, Laurent et Aaron C. BIRCH (2005). “Locale Helioseismology”. In : *Living Rev. Solar Phys.* 2.6. DOI : <http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-6>.
- H.HATHAWAY, David (2010). “The Solar Cycle”. In : *Living Rev. Solar Phys.* 7.1, p. 891-921. DOI : <http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-1>.

- HALE (1908). “On the probable existence of a magnetic field in sun-spots”. In : *ApJ* 28, p. 315-343. DOI : <http://dx.doi.org/10.1002/andp.19053221004>.
- HINDMAN, B. W., D. A. HABER et J. TOOMRE (2006). “Helioseismically determined near-surface flows underlying a quiescent filament”. In : *ApJ* 653, p. 725-732.
- HOWE, Rachel (2009). “Solar Interior Rotation and its Variation”. In : *astro-ph.SR*. DOI : [axXiv:0902.2406v2](https://arxiv.org/abs/0902.2406v2).
- KIEFER, René et al. (2018). “GONG p-mode parameters through two solar cycles”. In : *Solar Physics*. DOI : [arXiv:1810.09324v1](https://arxiv.org/abs/1810.09324v1).
- LEIBACHER, J. et R. F. STEIN (1970). “A new description of the solar five-minute oscillation.” In : *Astroph. Lett.* 7, p. 191.
- LEIGHTON, R. B., R. W. NOYES et G. W. SIMON (1962). “Velocity fields in the solar atmosphere. i. preliminary report”. In : *ApJ* 135.474.
- MALHERBE, Jean-Marie (2010). “Introduction à la physique du Soleil”. In : *Ecole thématique*, p. 137.
- MASSINISSA, Hadjara (2006). “ÉTUDE ET MISE EN OEUVRE DES TECHNIQUES TEMPS-DISTANCE EN HÉLIOSISMOLOGIE”. Thèse de doct. UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENNE.
- MAUNDER (1874-1904). “Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitudes”. In : *MNRAS* 64, p. 747-761.
- PROVOST, J. (1997). “Theoretical solar models. In J. Provost and F. X. Schmider”. In : *Sounding solar and stellar interiors*, p. 121-136.
- ROTH, M. DORR, H.P. ZAATRI, A. THOMPSON, M.J. (2009). In preparation, to be submitted to *Sol. Phys.*
- SCHWABE, H. (1838). “Schwabe’s observations of sunspot variations(1838)”. In : *RASC* 17", p. 409-412.
- ULRICH, R. K. (1970). “The five-minute oscillations on the solar surface”. In : *ApJ* 162, p. 993.
- WOLF, M. (1852). “On the periodic return of the solar spots”. In : *MNRSA*, p. 13-29.
- ZAATRI, Amel (2009). “Study of the dynamics of the subsurface layers of the sun using local helioseismology”. Thèse de doct. UNIVERSITE DE NICESOPHIA ANTIPO-LIS UFR Sciences.