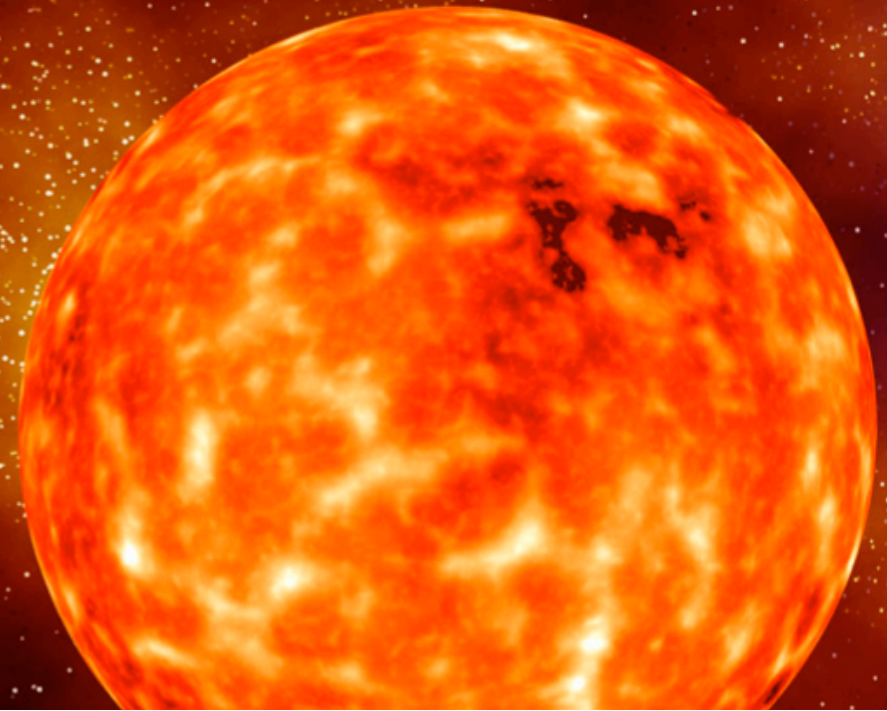


# DYNAMISME STELLAIRE : ROTATION ET MAGNÉTISME DANS LES ÉTOILES ISOLÉES ET SYSTÈMES MULTIPLES

Tugdual Ceillier

Directeur : Rafael A. García

CEA/IRFU/SAp - AIM



Tugdual Ceillier

Cursus :

École Polytechnique

M2R Astronomie & Astrophysique

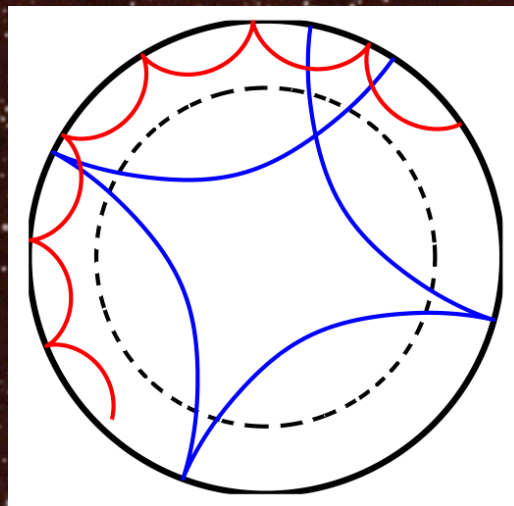
- Roland Lehoucq, professeur à l'É.P. m'a mis en contact avec Rafael García pour mon stage de M1.
- Passion de toujours pour l'Astrophysique.



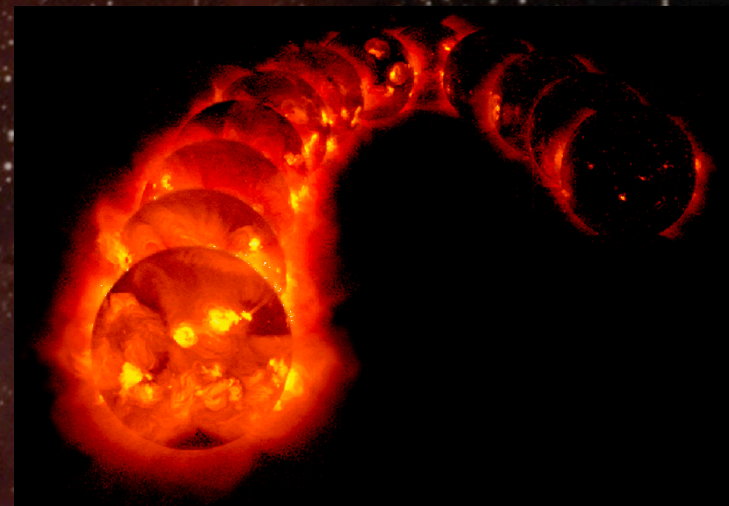
- Dynamisme Stellaire : Rotation et Magnétisme dans les étoiles isolées et systèmes multiples



Satellite Kepler  
et préparer PLATO



Oscillations stellaires



Rotation et activité stellaire



# PLAN

## I. Contexte de la thèse : l'Astérosismologie

## II. Travail réalisé ou en cours

- a) Rotation interne
- b) Rotation de surface
- c) Activité magnétique

## III. Projets futurs

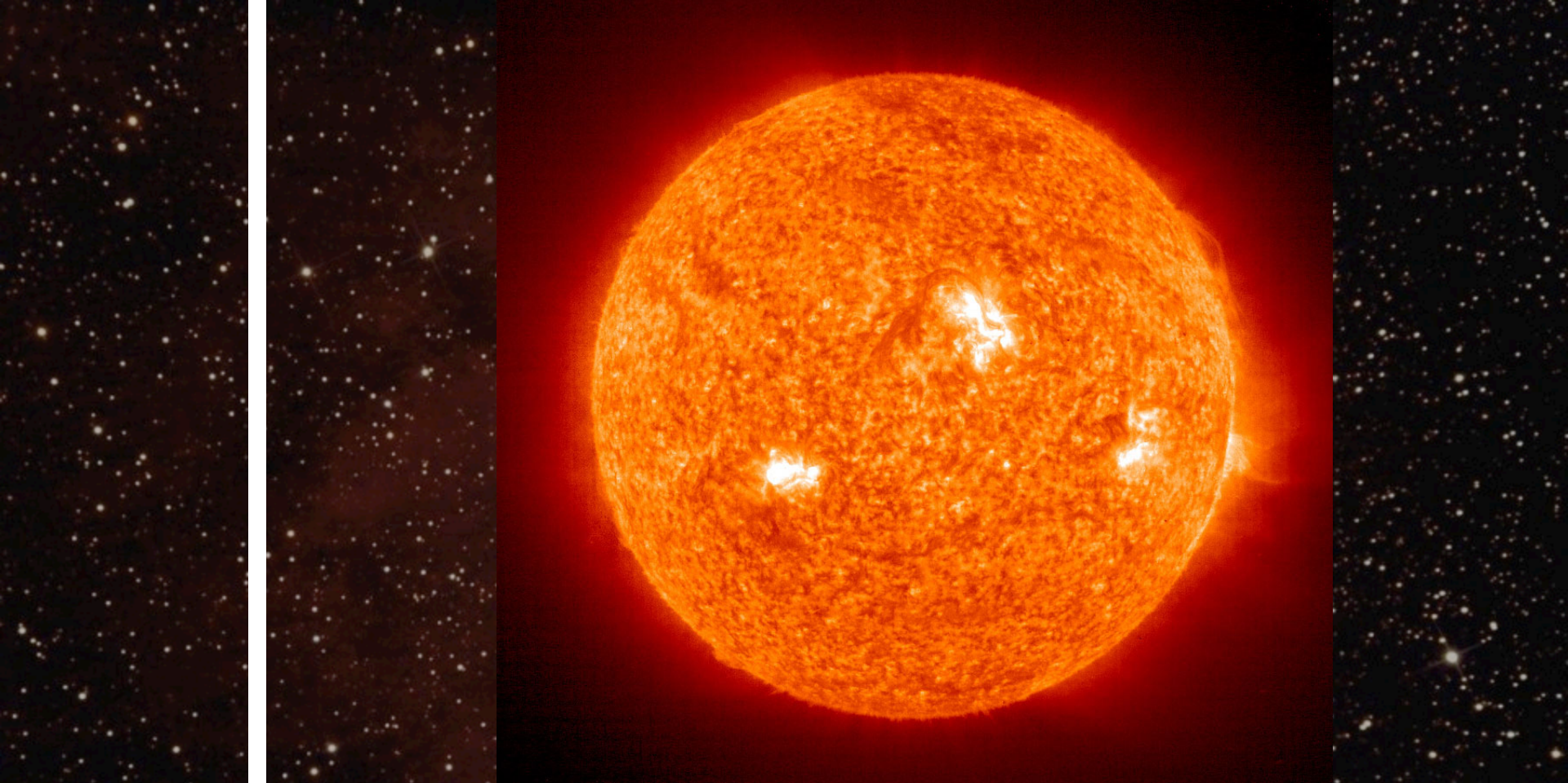
- a) Influence d'un champ magnétique fossile
- b) Étude de la rotation différentielle



The background of the slide is a deep space image showing a dense field of stars against a dark, reddish-brown nebula. A solid blue horizontal bar spans the width of the slide, containing the title text.

# I. Contexte de la thèse

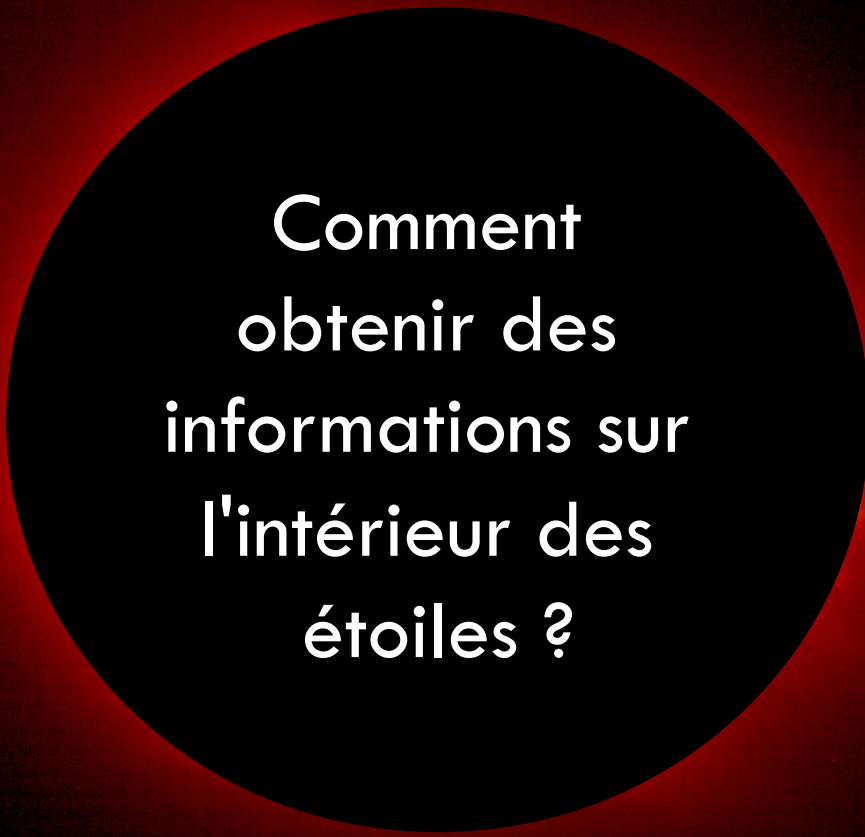




## Observer et étudier les étoiles

➤ Photons : informations sur la photosphère



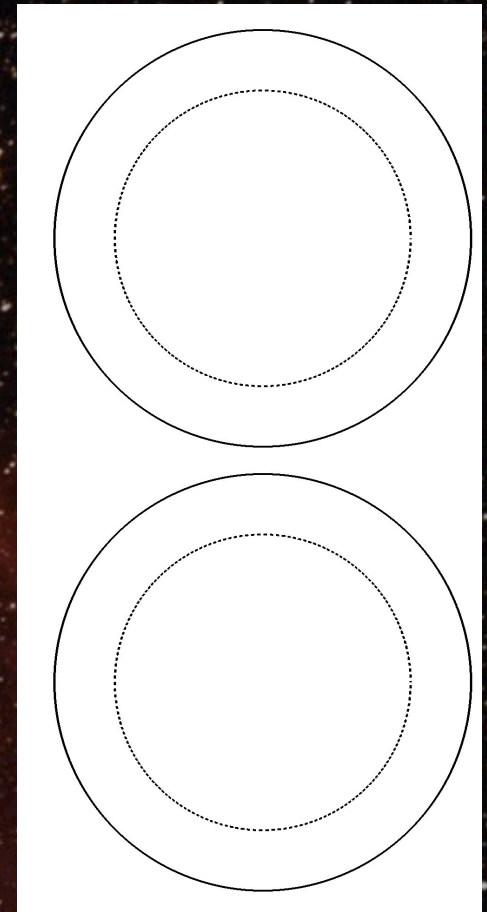
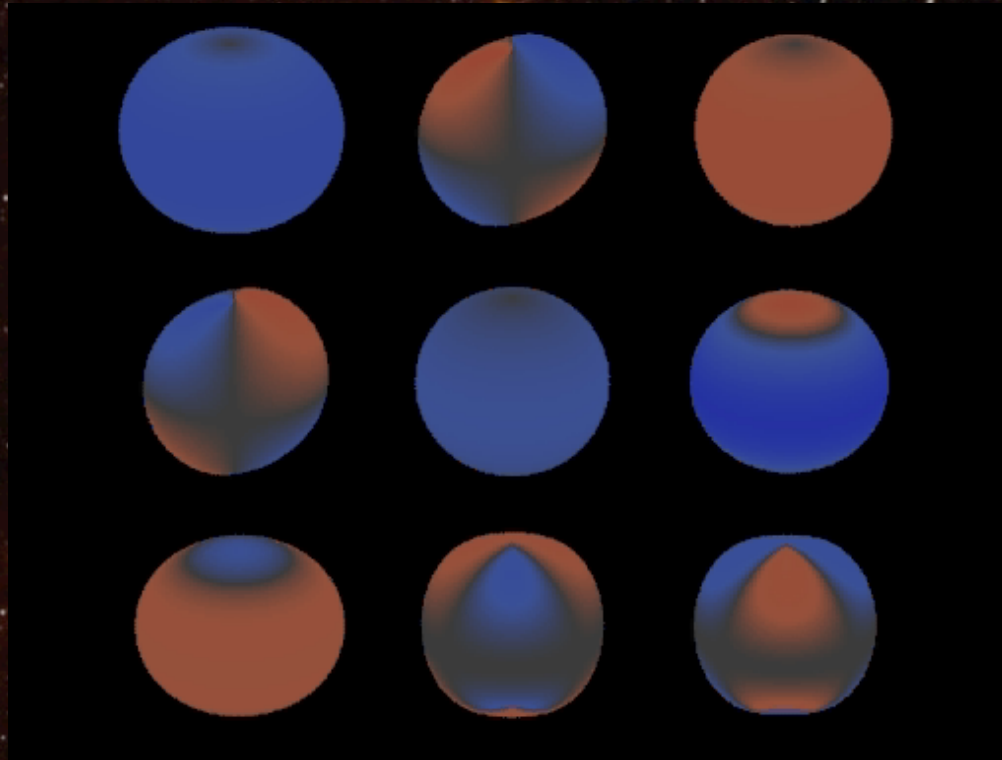


Comment  
obtenir des  
informations sur  
l'intérieur des  
étoiles ?

Observer et étudier les étoiles

Il ne faut plus regarder les étoiles mais les écouter !





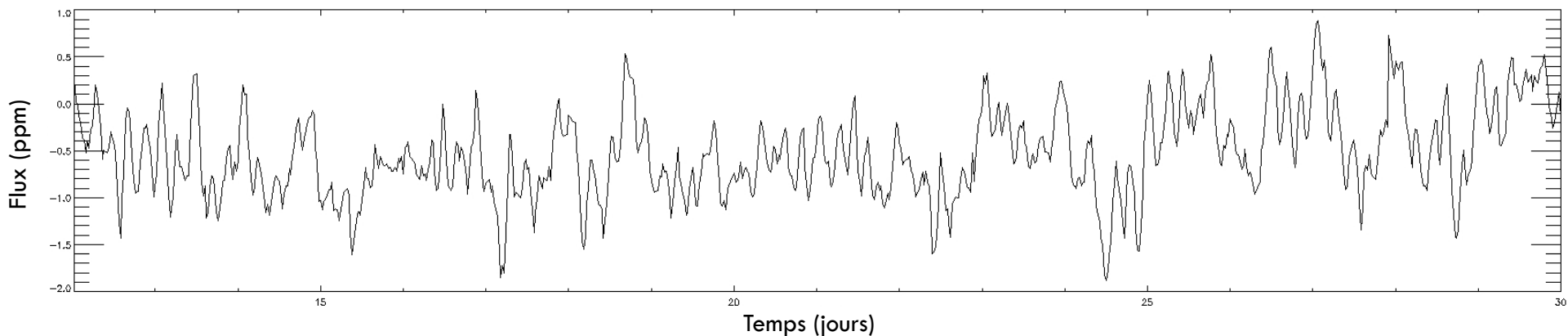
## I. Contexte : l'Astérosismologie

Les étoiles comme des cavités résonnantes : des modes propres se développent.



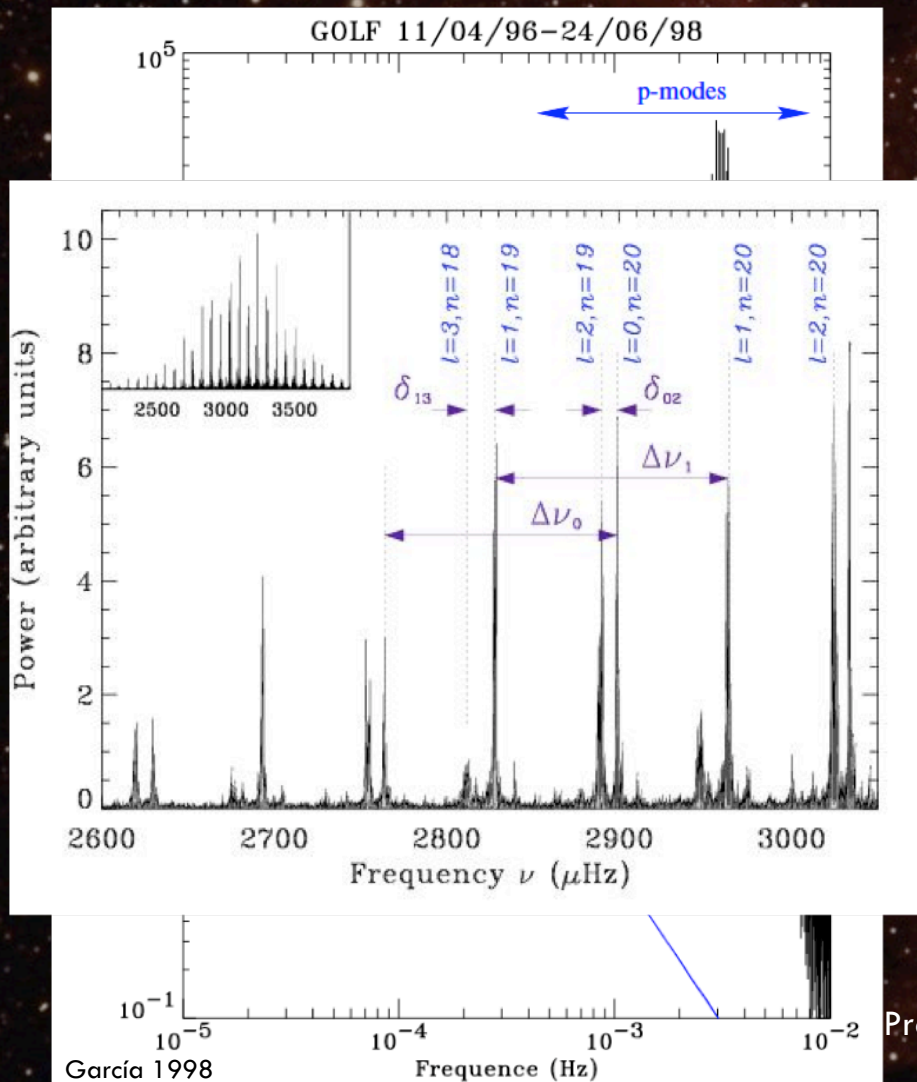
# I. Contexte de la thèse

## □ « Écouter » la luminosité des étoiles





# I. Contexte de la thèse



- Obtenir des informations : le spectre de puissance



# I. Contexte de la thèse

- Les avancées de l'Astérosimologie
  - Sondage des intérieurs de milliers d'étoiles (CoRoT, Kepler)
  - Estimations de paramètres stellaires
    - Structure : Masse, Rayon, BZC
      - Distinction de l'état évolutif des géantes rouges
    - Dynamique : Rotation interne, Convection



# I. Contexte de la thèse

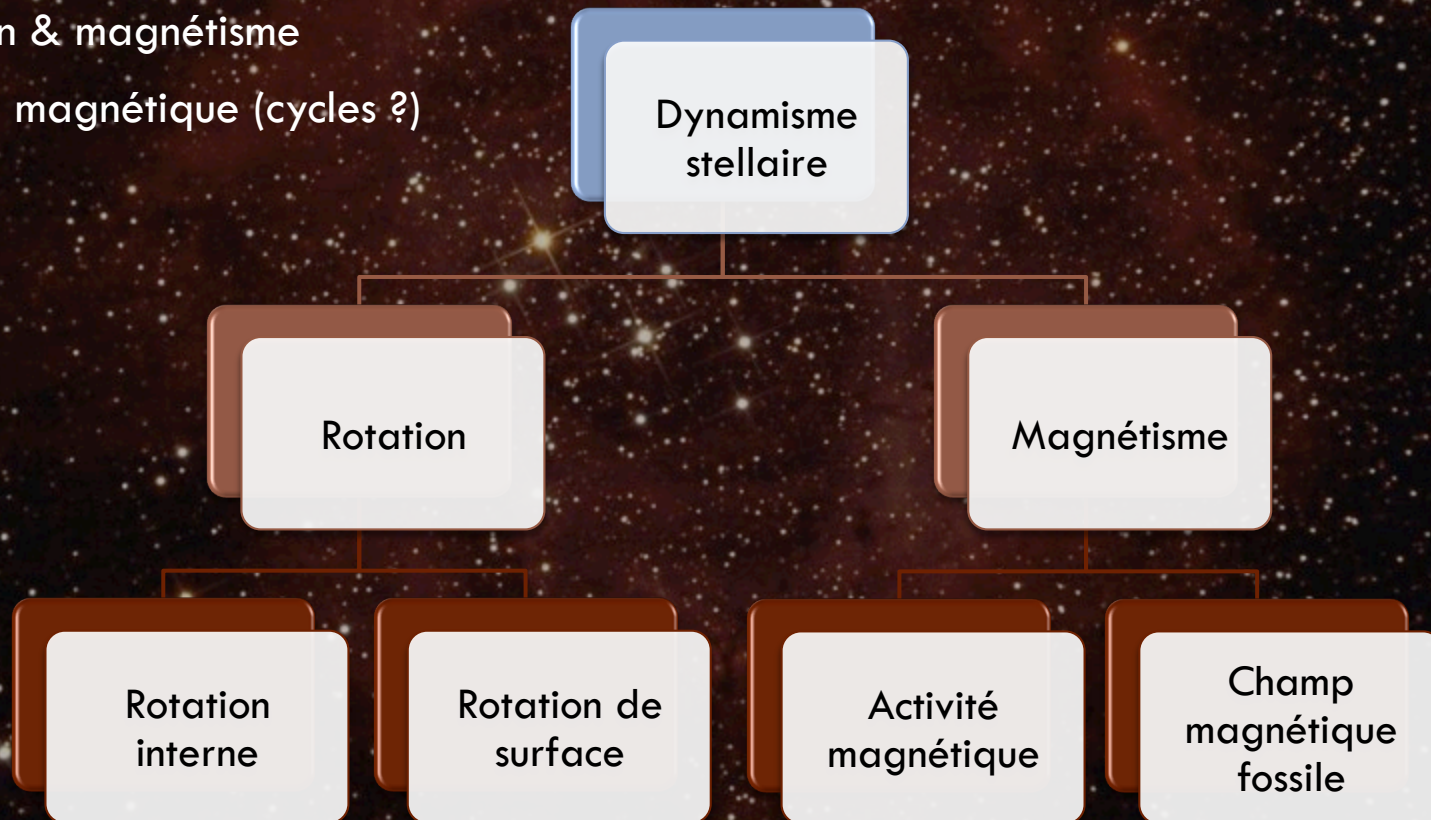
- Objectifs de la thèse : Dynamisme stellaire
  - Étudier l'influence de la rotation et du magnétisme sur l'évolution stellaire
  - Comprendre l'activité magnétique (cycles ?) des étoiles



# I. Contexte de la thèse

## □ Objectifs de la thèse : Dynamisme stellaire

- Rotation & magnétisme
- Activité magnétique (cycles ?)



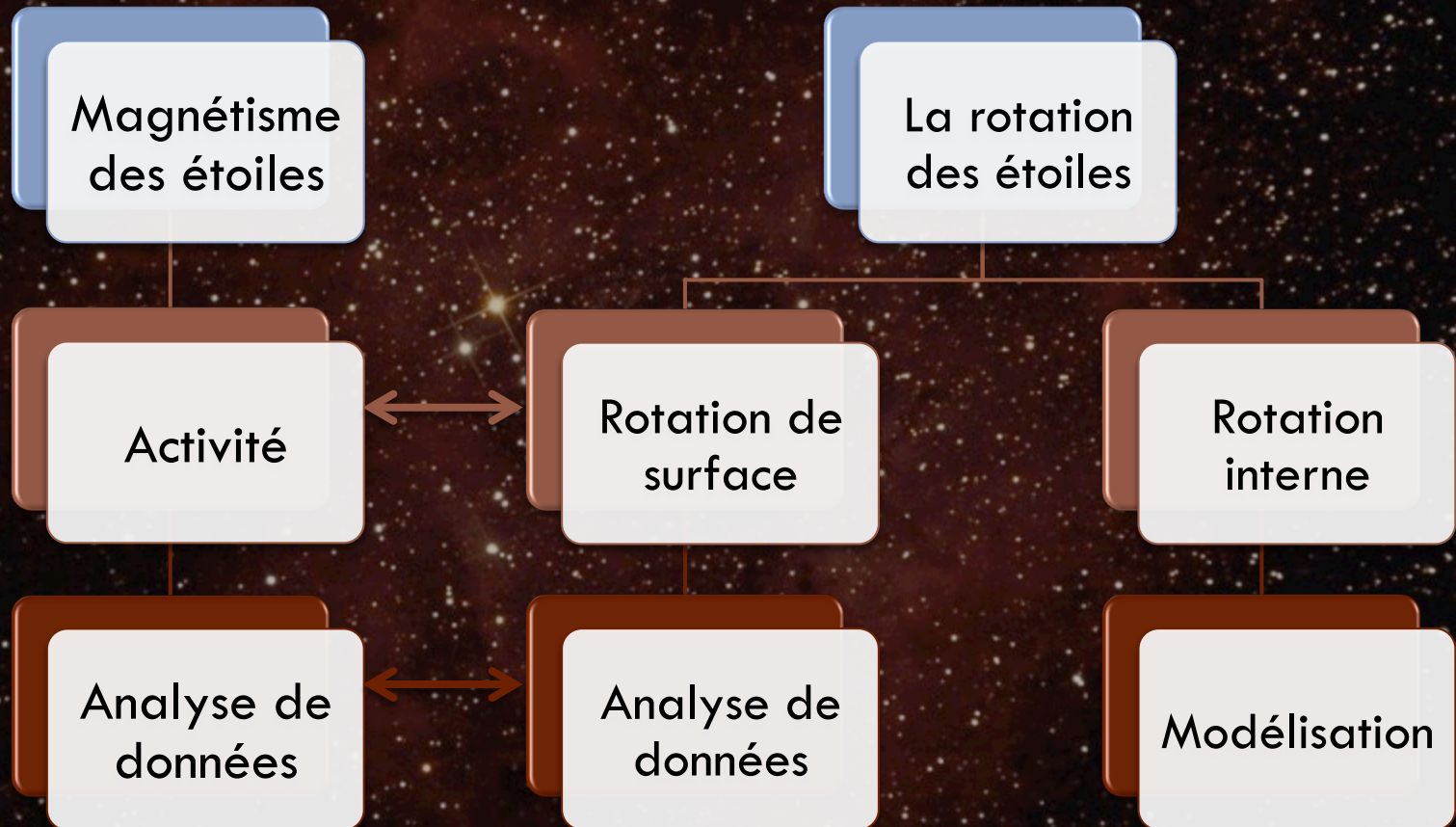


## II. Travail réalisé ou en cours

- Rotation interne
- Rotation de surface
- Activité magnétique



## II. Travail réalisé ou en cours





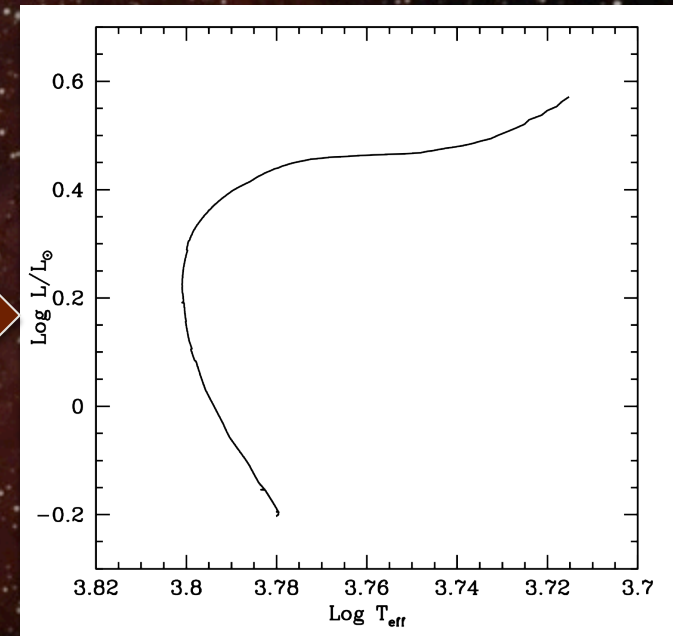
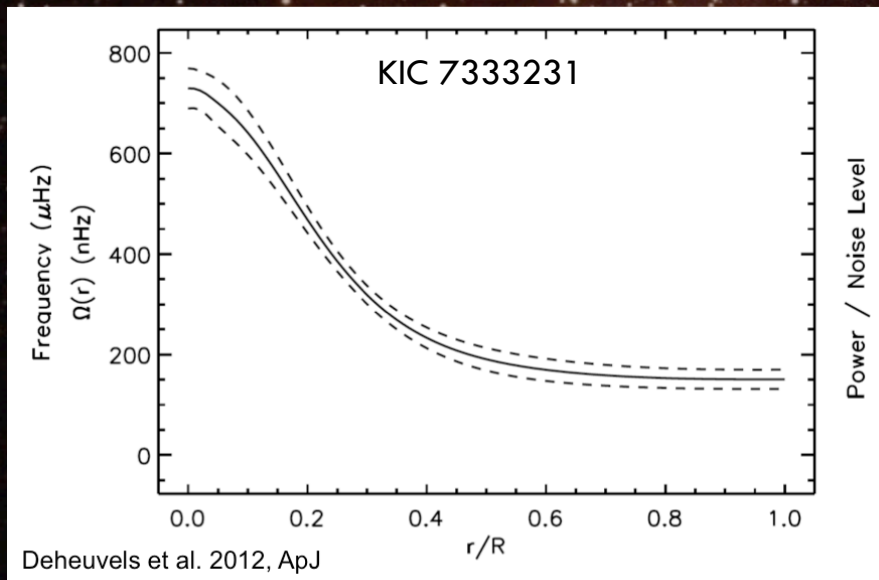
## II. Travail réalisé ou en cours

- Rotation interne
- Rotation de surface
- Activité magnétique

## II. Travail réalisé ou en cours

### □ Rotation interne : modélisation

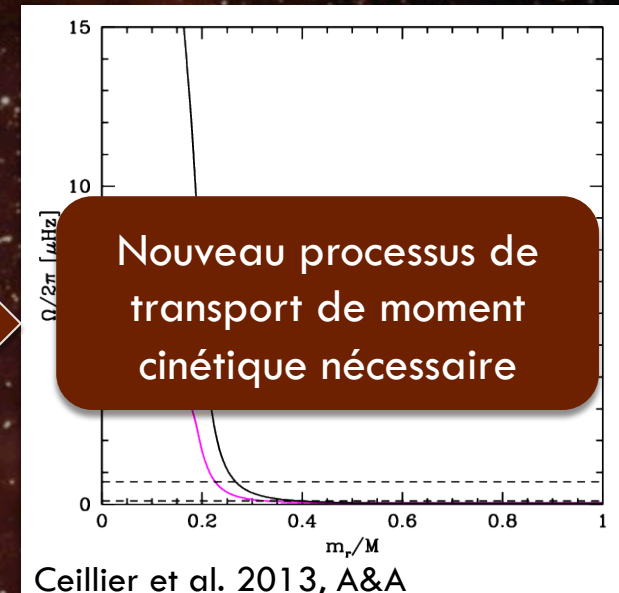
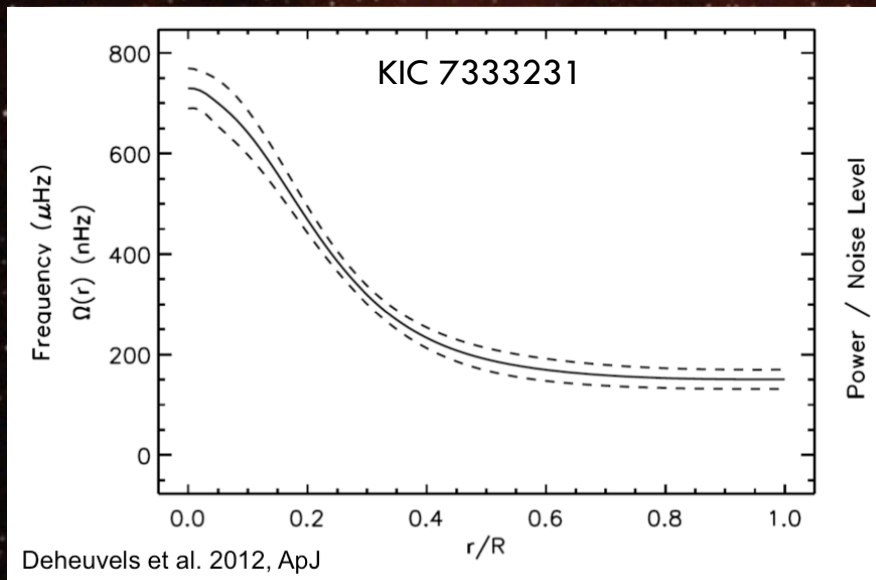
Modélisation stellaire 1D avec rotation : Code de Genève





## II. Travail réalisé ou en cours

### □ Rotation interne : modélisation



➔ Deheuvels, ..., Ceillier et al. 2014, A&A 564

Pinsonneault et al. 1989  
Turck-Chièze et al. 2010  
Marques et al. 2013



## II. Travail réalisé ou en cours

- Rotation interne
- Rotation de surface
- Cycles d'activité



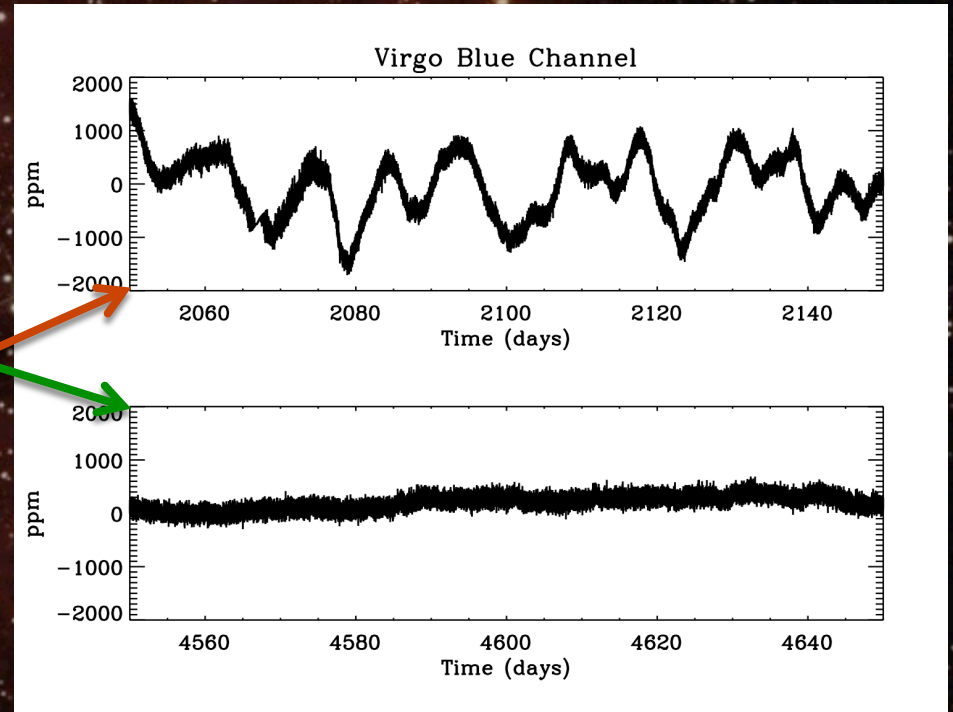
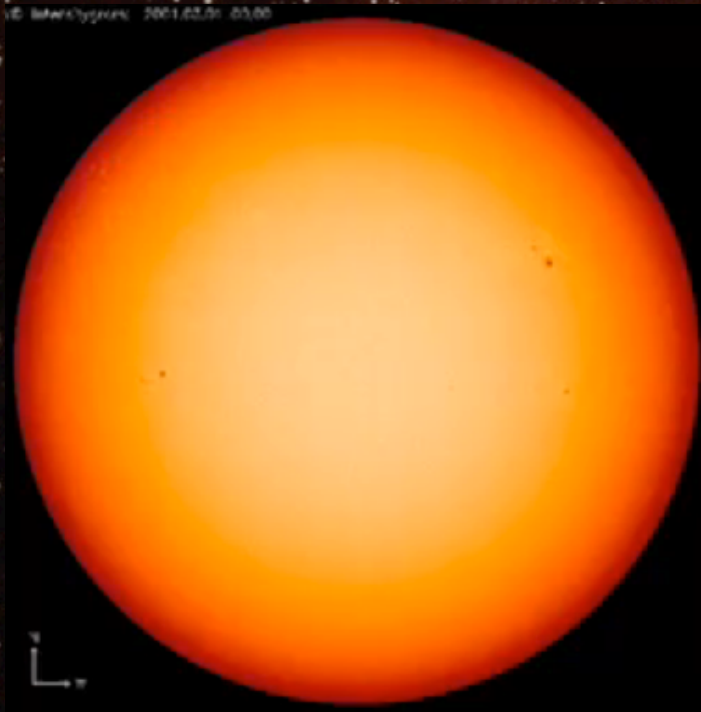
## II. Travail réalisé ou en cours

- Extraire la rotation de surface des étoiles
  - Contraindre les profils de rotation interne
  - Estimer l'âge des étoiles (gyrochronologie)
  - Dériver l'inclinaison de l'étoile (spectroscopie)
  - Étudier la rotation différentielle en latitude
  - Interactions étoile-planète :  
étoiles isolées / systèmes multiples



## II. Travail réalisé ou en cours

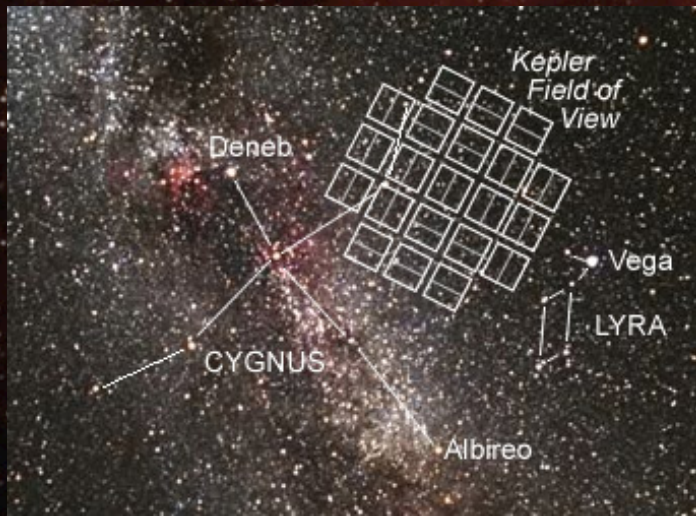
### □ Principe de détection de la rotation de surface





## II. Travail réalisé ou en cours

### □ L'instrument : le satellite *Kepler*



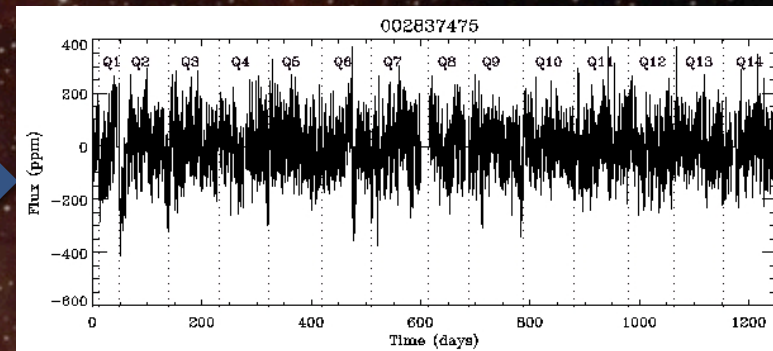
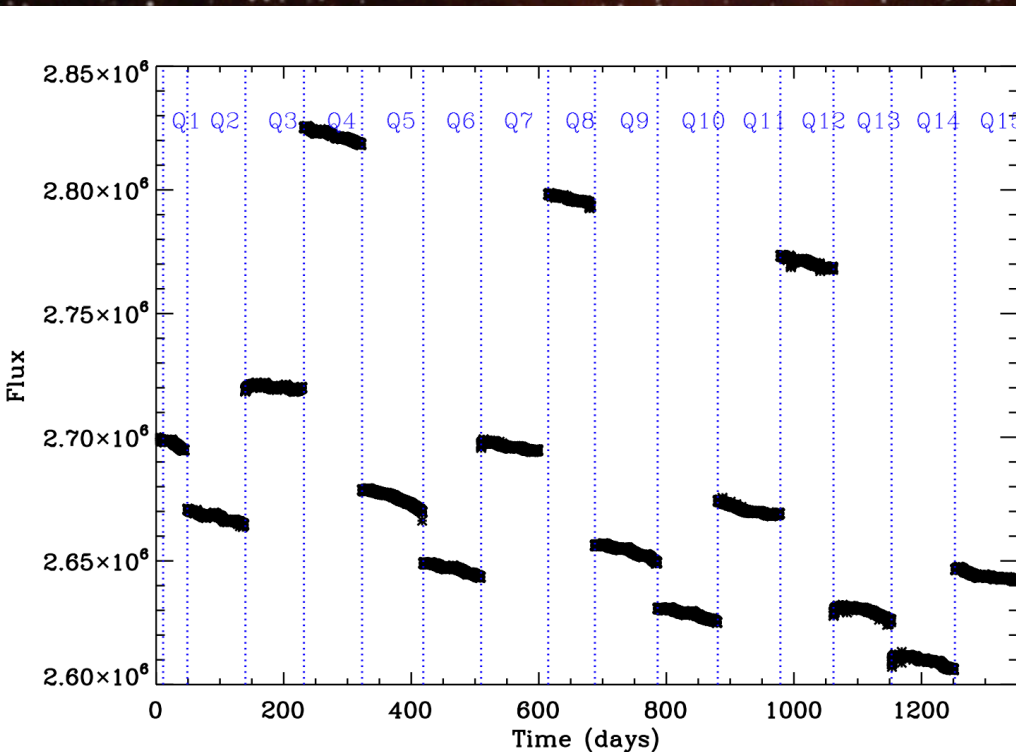
Borucki et al. 2010





## II. Travail réalisé ou en cours

### □ Méthodologie – Correction des données



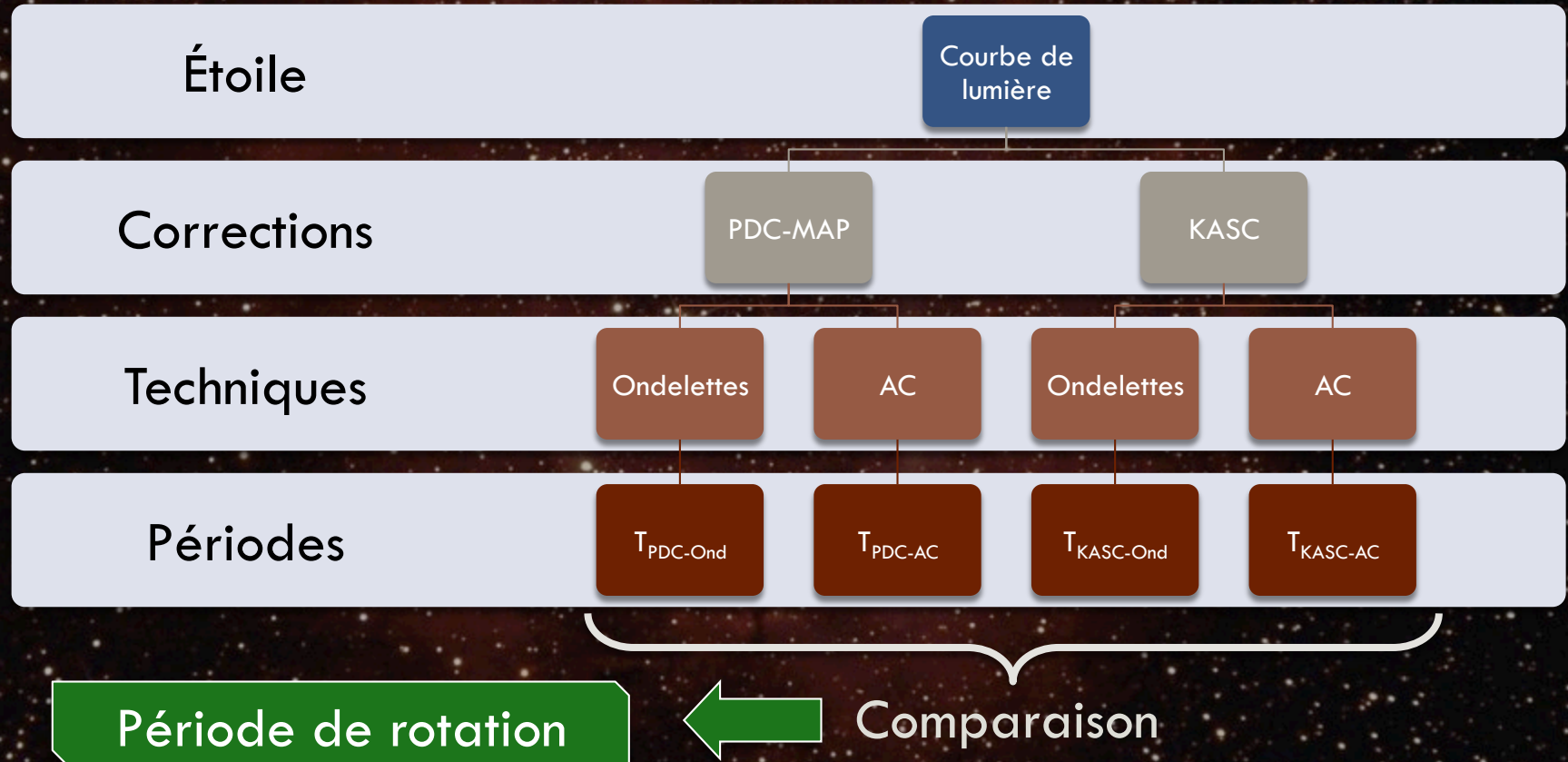
Présentation orale  
CoRoT Week 11, Mars 2013, Tenerife

Conserver le signal stellaire / Éliminer les effets instrumentaux



## II. Travail réalisé ou en cours

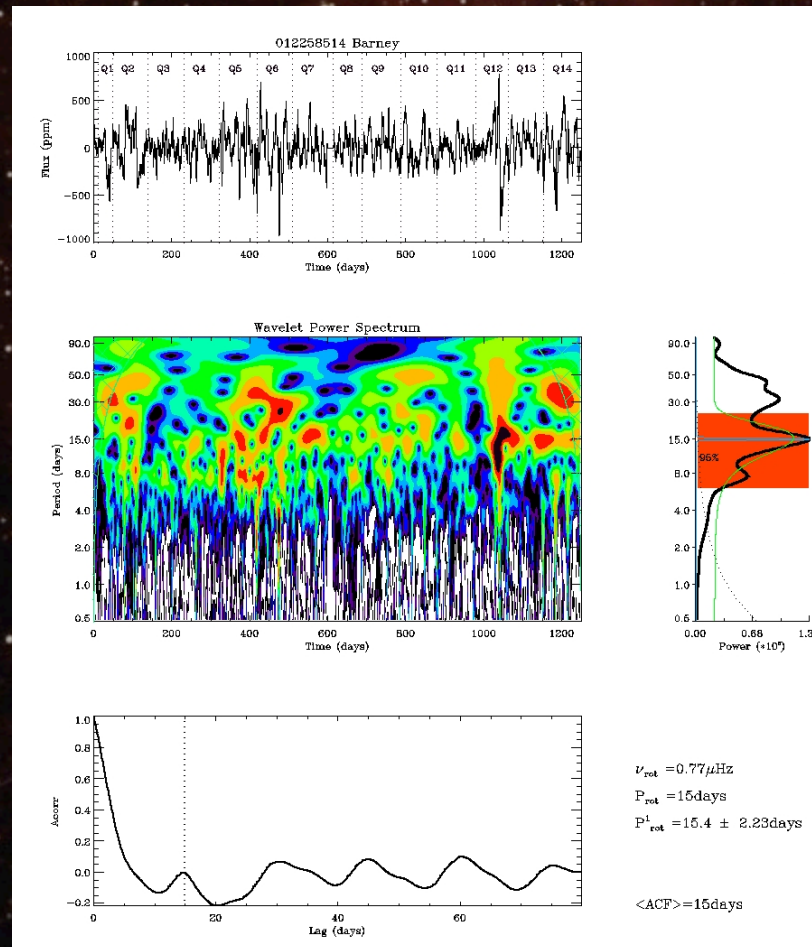
### □ Méthodologie – Principe global





# II. Travail réalisé ou en cours

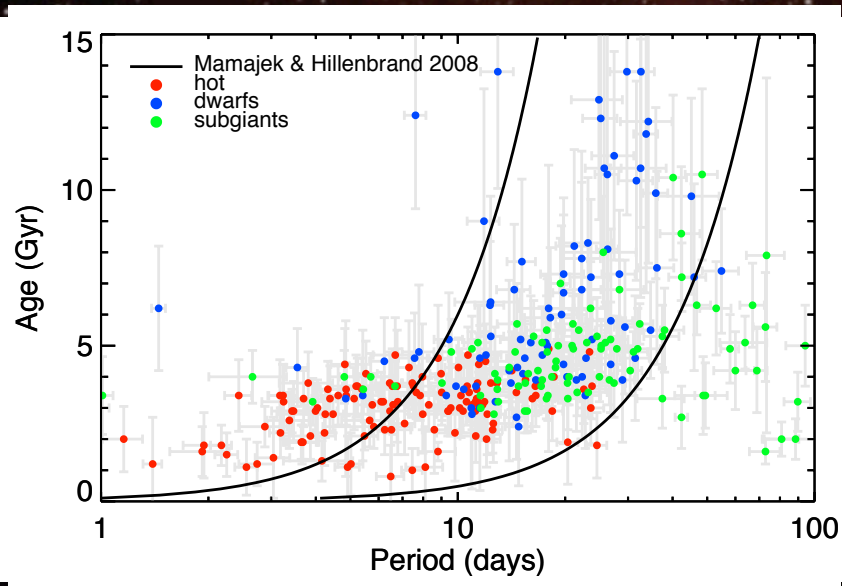
## □ Méthodologie – Principe global





## II. Travail réalisé ou en cours

- Applications – Étoiles pulsantes de type solaire (540)
  - ▣ Adaptation de la méthodologie à ce type d'étoile
  - ▣ Développement d'une comparaison robuste des  $P_{\text{rot}}$
  - ▣ Vérification visuelle des périodes
  - ▣ Extraction des signaux plats



García, Ceillier et al., soumis

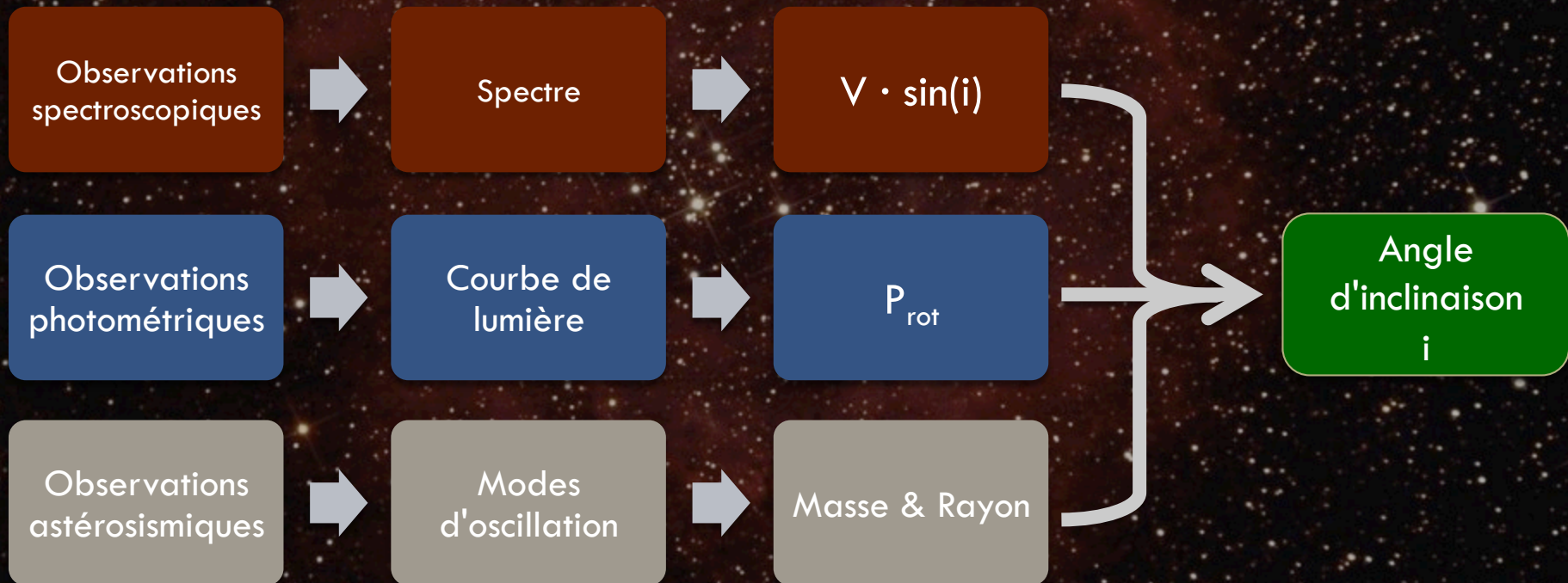
Analogues solaires : Do Nascimento, ..., Ceillier et al., accepté



## II. Travail réalisé ou en cours

□ Applications – Type solaire & Géantes rouges (5200)

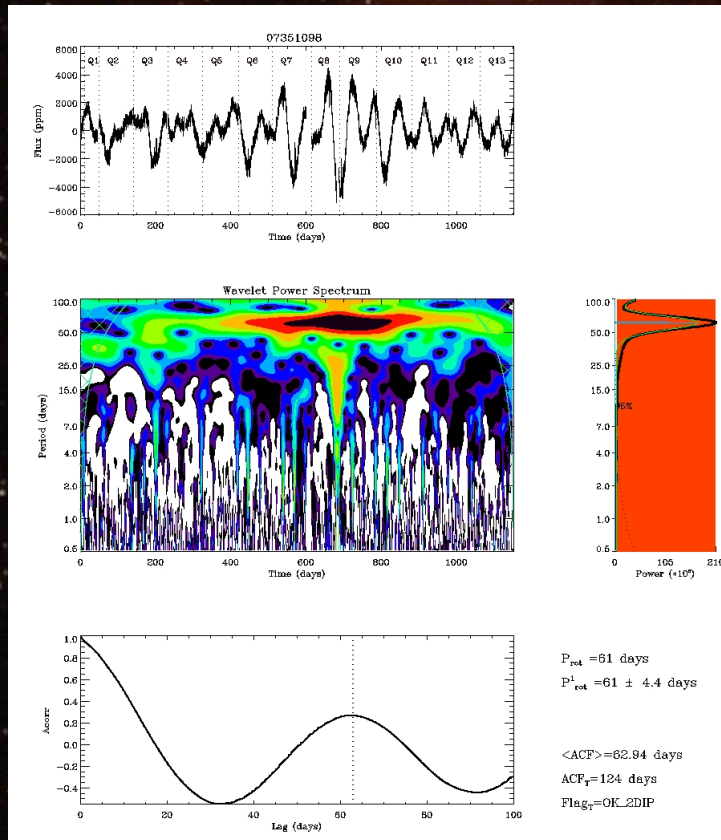
▣ Collaboration avec APOGEE (SDSSIII) 





## II. Travail réalisé ou en cours

- Applications – Géantes rouges (16 000)
- ▣ Catalogue global



- Détecter les géantes rouges actives
- Suivre l'évolution de la rotation en phases sous-géante et géante

Ceillier et al. 2014b, en préparation



## II.

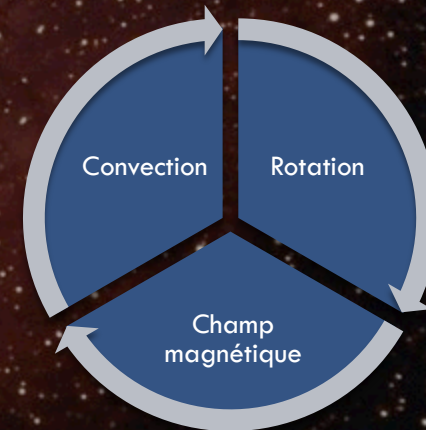
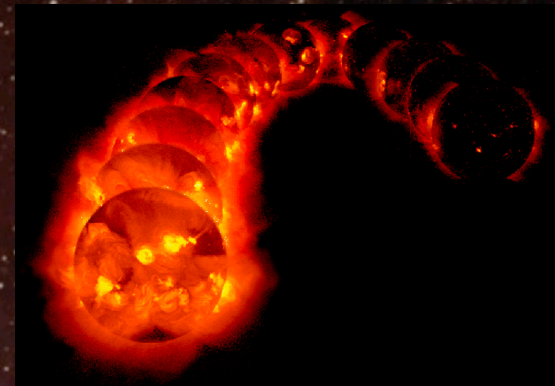
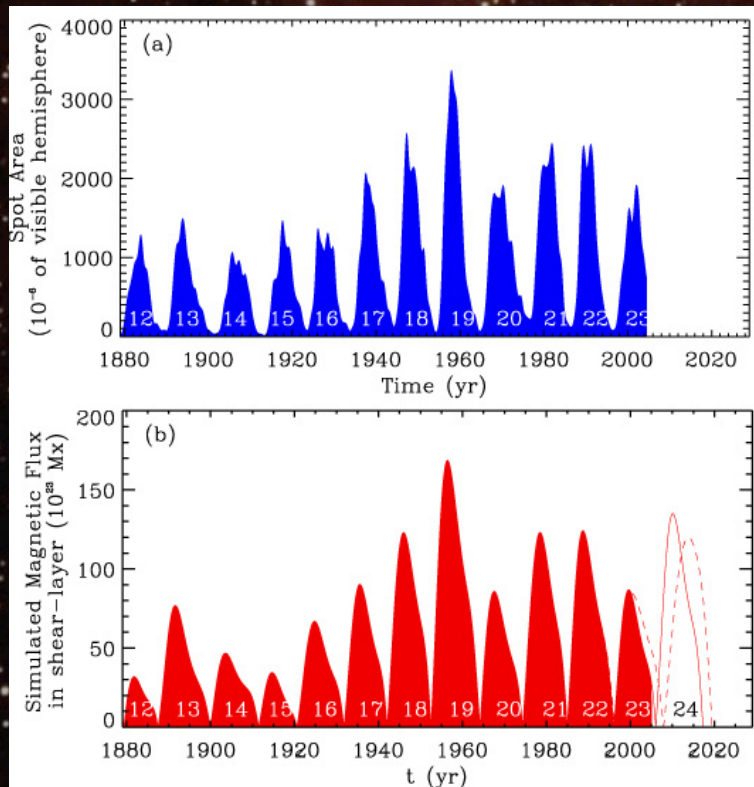
## Travail réalisé ou en cours

- Rotation interne
- Rotation de surface
- Activité magnétique



## II. Travail réalisé ou en cours

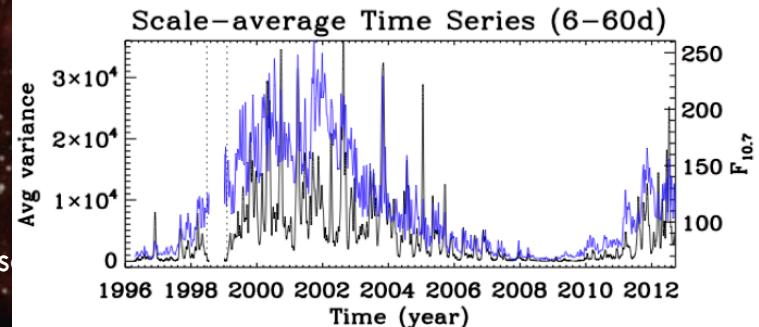
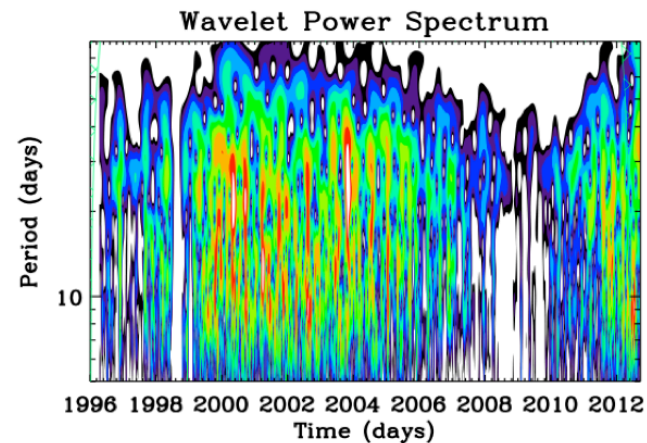
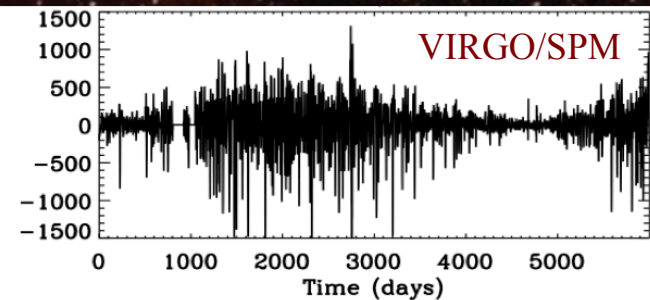
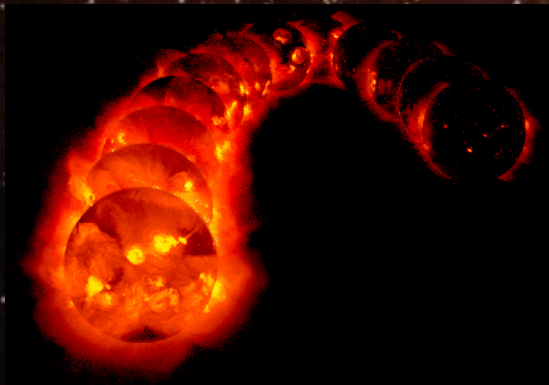
### □ Qu'est-ce qu'un cycle d'activité ?





## II. Travail réalisé ou en cours

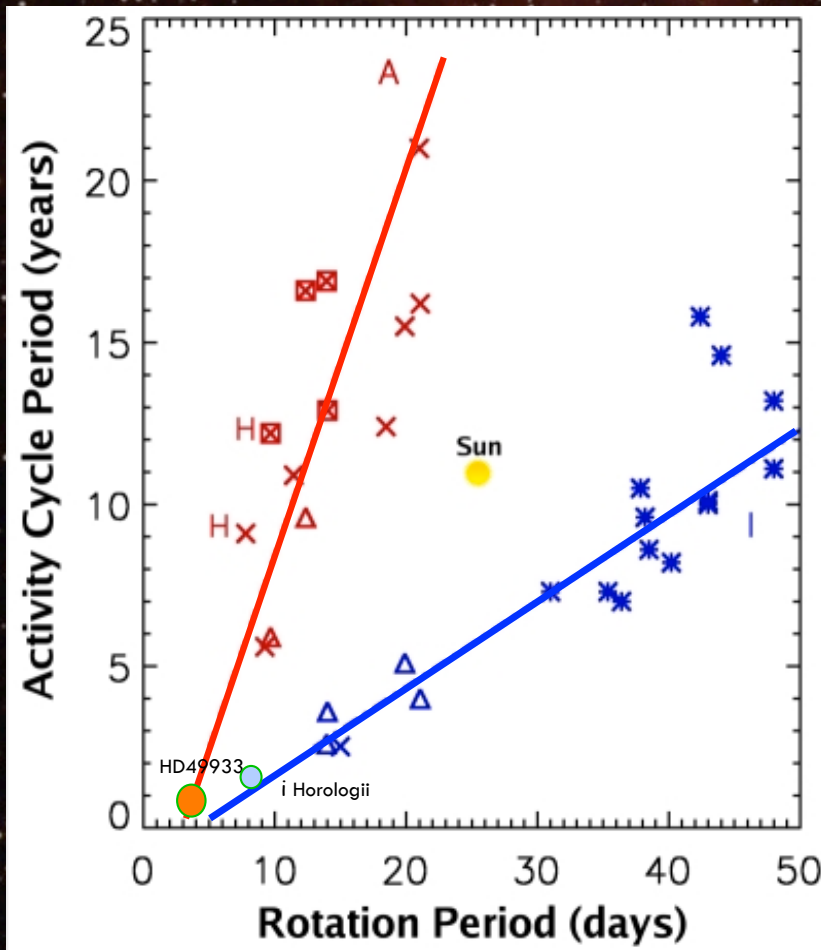
- Méthode de détection
  - ▣ Application au Soleil





## II. Travail réalisé ou en cours

### □ Exemples – Observations spectroscopiques



Lien fort entre rotation et cycle d'activité

Saar & Brandenburg 2002  
Bohm-Vitense 2007  
Brun et al. 2011

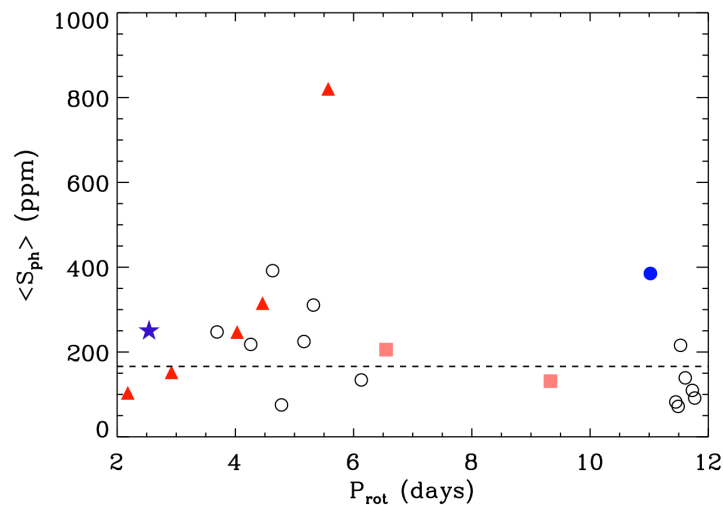


## II. Travail réalisé ou en cours

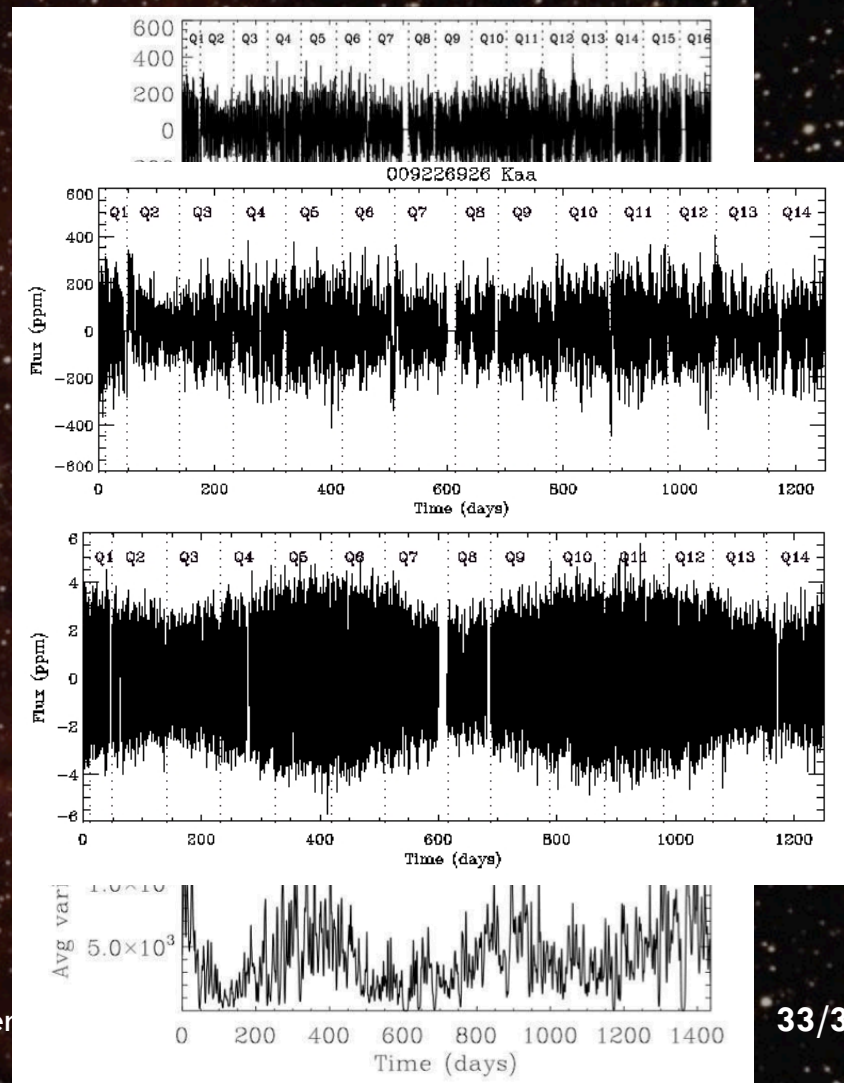
### □ Modulations de l'activité magnétique (22 étoiles)

KIC 9226926 (Kaa) :

- étoile F
- $P_{\text{rot}} = 2,2$  jours
- Astérosismologie :  $M \sim 1,37 M_{\odot}$



Mathur, ..., Ceillier et al. 2014a, A&A 562



Présen





# III. Projets futurs



# III. Projets futurs

- Influence de la géométrie d'un champ magnétique fossile sur les modes d'oscillation
  - ▣ Collaboration avec M. Thompson (HAO, Boulder, USA) et S. Mathis (SAp, CEA)
- Suite du travail de modélisation stellaire
  - ▣ Participation à l'école d'été MESA 2014
- Rotation différentielle latitudinale (solaire et anti-solaire)
  - ▣ Collaboration avec A.S. Brun et R.A. García (SAp, CEA)



# Conclusion

- Travail réalisé, en cours et à venir
  - ▣ Approche globale de la rotation
  - ▣ Compréhension de l'activité stellaire
  - ▣ Prise en compte du dynamisme stellaire
- Collaborations
  - ▣ Observatoire de Paris / IAS
  - ▣ IRAP, Toulouse
  - ▣ Observatoire de Genève, Suisse
  - ▣ High Altitude Observatory, Boulder, USA
  - ▣ Université de Louvain, Belgique
- Articles soumis ou acceptés
  - ▣ 1 publié : Ceillier et al. 2013, A&A, 555, 54C
  - ▣ 3 en co-auteur : García et al. 2014a; Mathur et al. 2014; Deheuvels et al. 2014
  - ▣ 4 soumis : García et al. b&c; Mathur et al.; Do Nascimento et al.
  - ▣ 3 en préparation : García et al.; Ceillier et al. a & b



**Merci de votre attention**

