



Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique

# *Contraintes sur la structure interne venant de la sismologie*

**K. Belkacem**

# Les étoiles pulsantes

✓ Pulsateurs de type solaire : Oscillations forcées et amorties (par la convection turbulente)

Amplitude (A) = équilibre entre excitation (P) & amortissement (η)

Forçage (P): "Excitation stochastique" par les tourbillons turbulents

Amortissement (η): Couplage thermique / dynamique

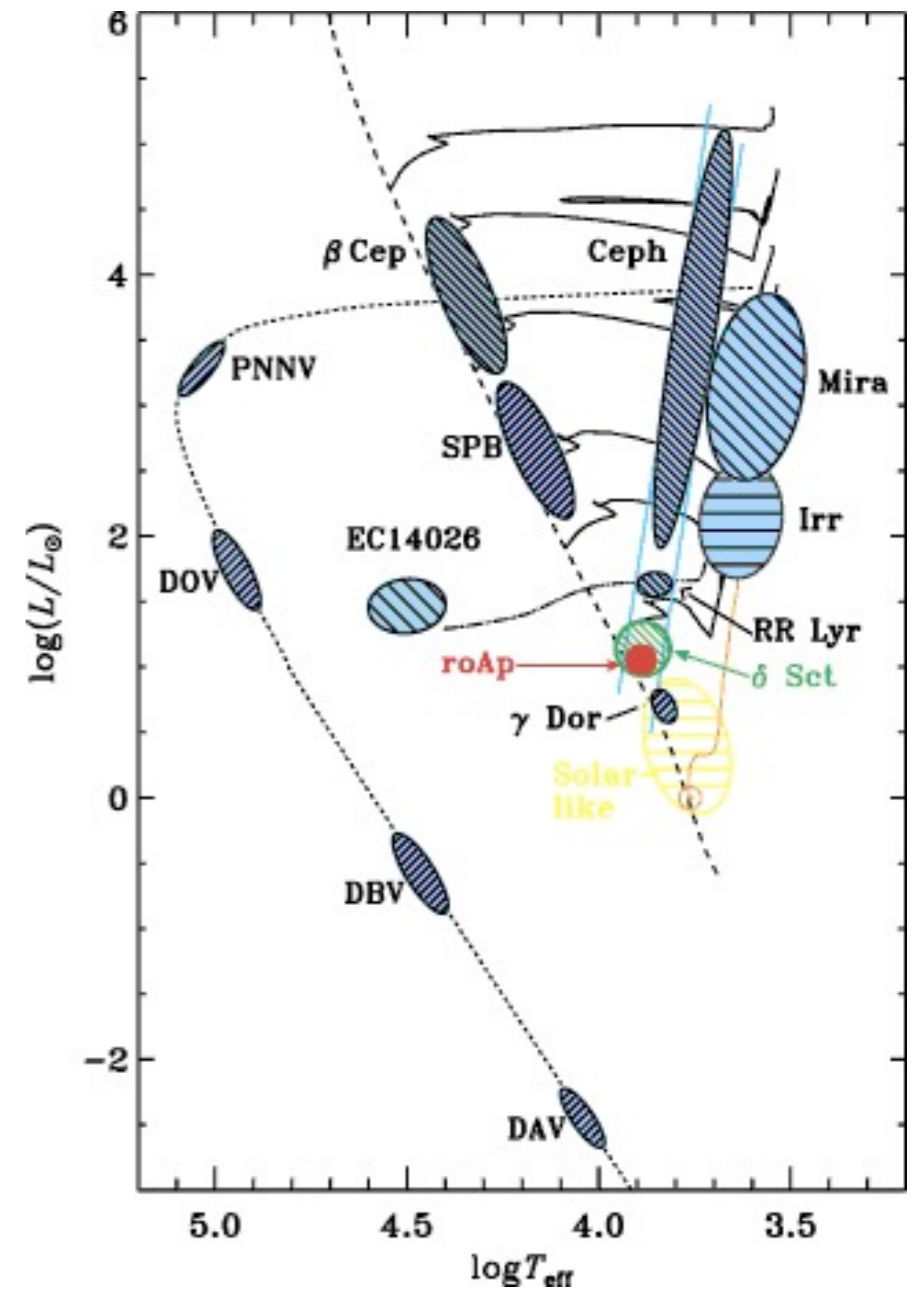
$$\frac{d}{dt} A^2 \propto \mathcal{P} - \eta A^2$$

- pas d'effet de sélection lié à l'excitation et à l'amortissement

- les modes qui sont excités sont plutôt de haut ordre radial, donc près du régime asymptotique (présence de régularités dans le spectre)



L'identification des modes est relativement simple et l'exploitation des spectres est possible



crédit : J. Christensen-dalsgaard

# Un contexte favorable

## Observations depuis le sol

1990

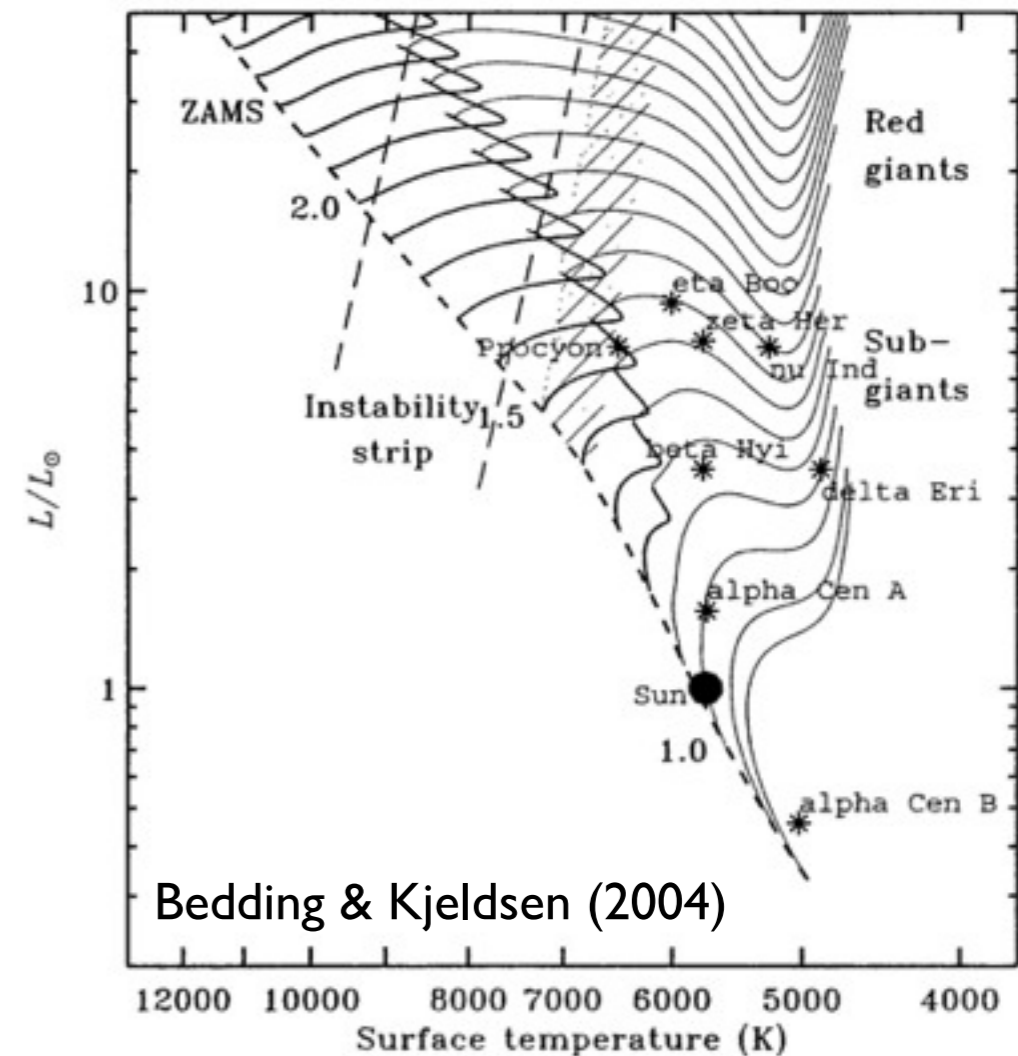
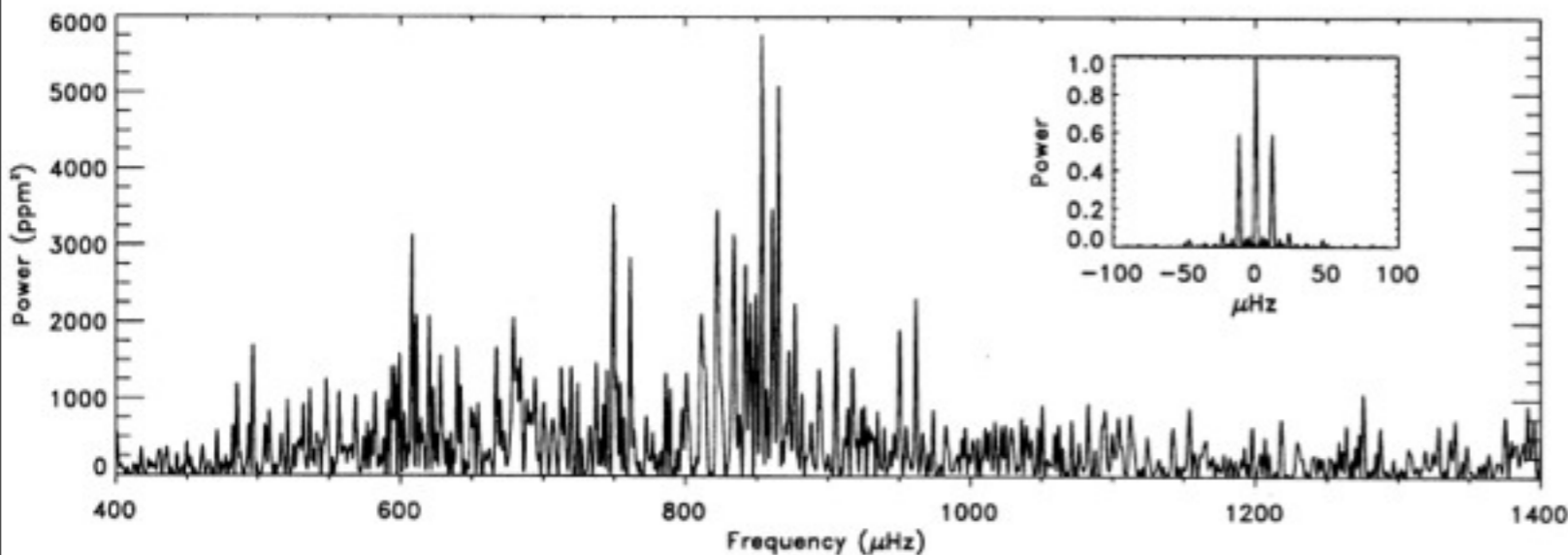
2000



Années 90 : premières détections de pulsations de type solaire (e.g. Brown et al., 1991, Kjeldsen et al. 1995)

Début des années 2000 : une dizaine d'étoiles observées avec des oscillations de type solaire (e.g. Bedding et al. 2001; Carrier et al. 2001; Bouchy & Carrier 2001, 2002; Frandsen et al. 2002; Bazot et al., 2005 etc...)

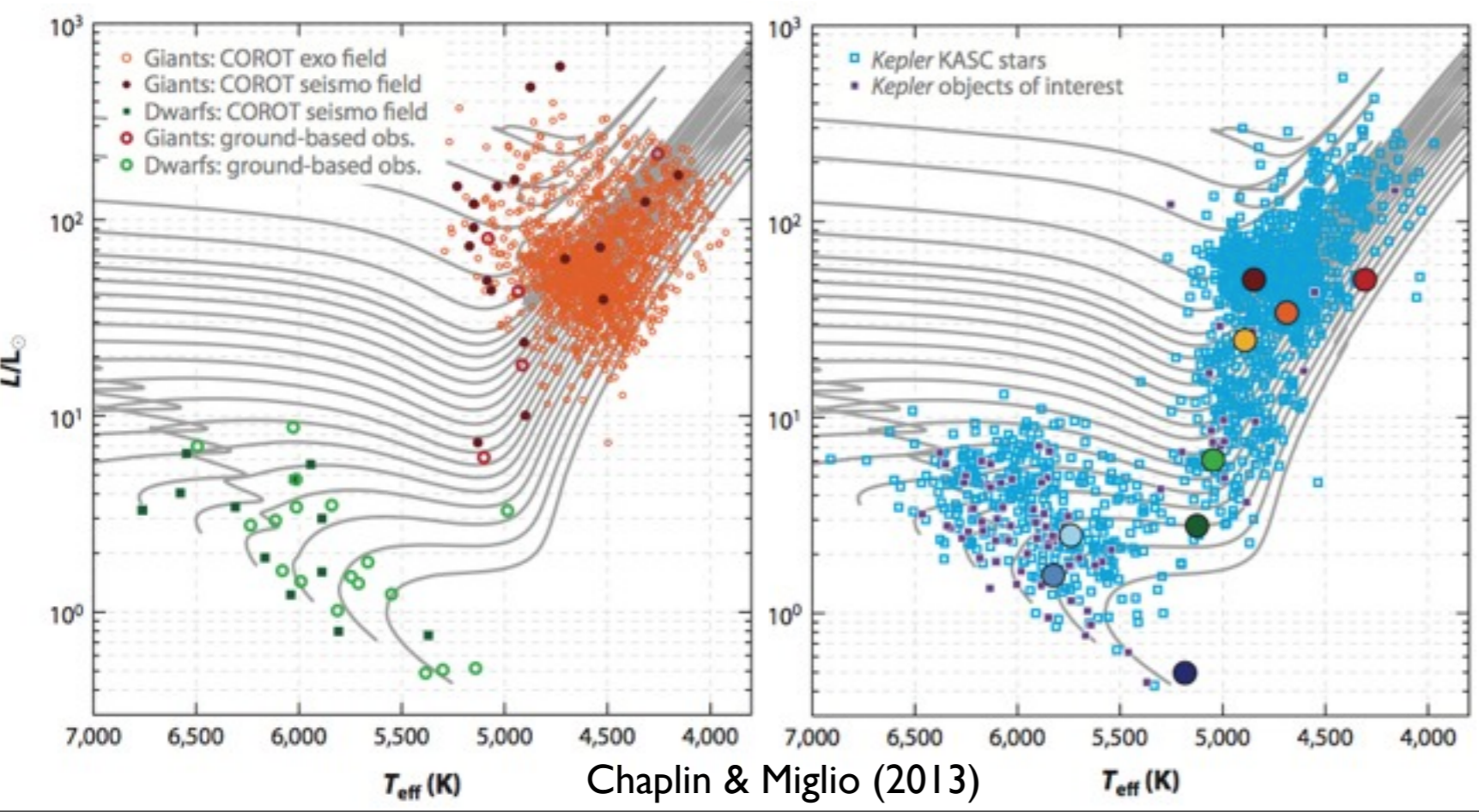
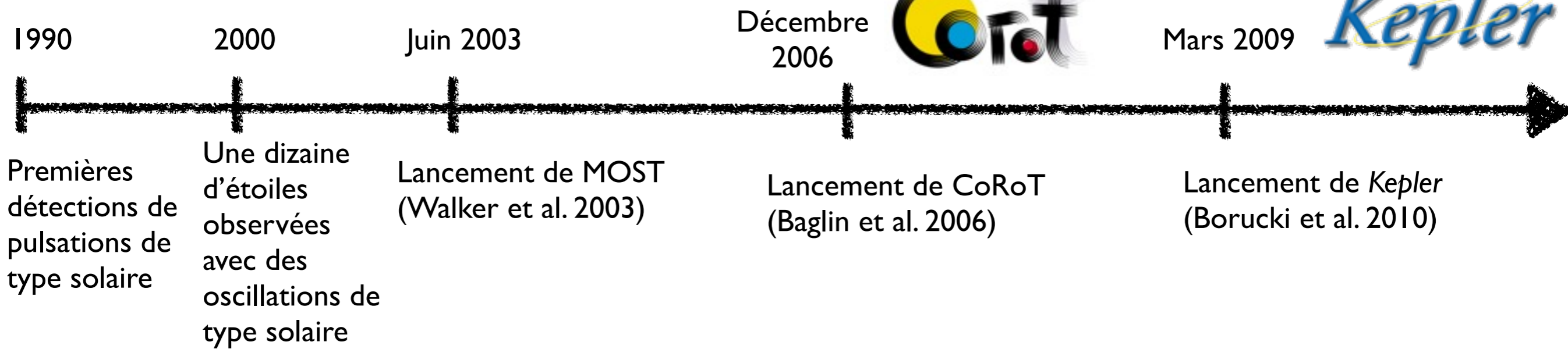
Exemple de  $\eta$  Boo Kjeldsen et al. (1995)



Bedding & Kjeldsen (2004)

# Un contexte favorable

## Observations depuis l'espace



Amélioration de la qualité des observations a été le moteur



- extraction des modes individuels : contraintes sur les intérieurs stellaires
- un très grand nombre d'objet : émergence de l'astérosismologie d'ensemble (ou statistique)

# Sommaire

## I) La compréhension des spectres d'oscillation

- Les étoiles de séquence principale : dichotomie étoiles F / G & K
- Les étoiles évoluées : modes mixtes & compréhension des spectres

## II) Sismologie d'ensemble

- Détermination des paramètres globaux
- L'apport de la séparation en période

## III) Sismologie «à la carte» ou «sur mesure»

Quelques exemples :

- Contraintes sur les paramètres stellaires
- Contraintes sur la rotation et son évolution

# La compréhension des spectres d'oscillation

## Les étoiles de séquence principale : dichotomie étoiles F / G & K

✓ Important travail d'analyse de données

- Etoiles de type F

(Appourchaux et al. 2008; Benomar et al. 2009b; Barban et al. 2009; Garcia et al. 2009; Mosser et al. 2009b; Mathur et al. 2010)



modes larges et identification des modes difficile

- Etoiles de type G & K

(Deheuvels et al. 2010, Gaulme et al. 2010; Ballot et al. 2011, Mathur et al. 2013, Boumier et al. 2014)



modes étroits et identification des modes facile

# La compréhension des spectres d'oscillation

## Les étoiles de séquence principale : dichotomie étoiles F / G & K

✓ Important travail d'analyse de données

- **Etoiles de type F**

(Appourchaux et al. 2008; Benomar et al. 2009b; Barban et al. 2009; Garcia et al. 2009; Mosser et al. 2009b; Mathur et al. 2010)



modes larges et identification des modes difficile

- **Etoiles de type G & K**

(Deheuvels et al. 2010, Gaulme et al. 2010; Ballot et al. 2011, Mathur et al. 2013, Boumier et al. 2014)



modes étroits et identification des modes facile

- **Une dichotomie confirmée par Kepler**

(e.g. Chaplin et al. 2010)



Les méthodes d'analyses sont maintenant au point pour traiter ces spectres (e.g. Appourchaux et al. 2012, 2014)

# La compréhension des spectres d'oscillation

## Les étoiles de séquence principale : dichotomie étoiles F / G & K

✓ Important travail d'analyse de données

- **Etoiles de type F**

(Appourchaux et al. 2008; Benomar et al. 2009b; Barban et al. 2009; Garcia et al. 2009; Mosser et al. 2009b; Mathur et al. 2010)



modes larges et identification des modes difficile

- **Etoiles de type G & K**

(Deheuvels et al. 2010, Gaulme et al. 2010; Ballot et al. 2011, Mathur et al. 2013, Boumier et al. 2014)



modes étroits et identification des modes facile

- **Une dichotomie confirmée par Kepler**

(e.g. Chaplin et al. 2010)



Les méthodes d'analyses sont maintenant au point pour traiter ces spectres (e.g. Appourchaux et al. 2012, 2014)

✓ En parallèle du travail d'analyse, des travaux théoriques ont permis de comprendre ces évolutions

- **Comportement des amplitudes avec l'évolution**

(Samadi et al. 2007; Kjeldsen & Bedding 2011; Huber et al. 2011; Samadi 2011; Samadi et al. 2012; Corsaro et al. 2013)

- **Comportement de la granulation avec l'évolution**

(Kjeldsen & Bedding 2011; Guenther et al. 2008; Ludwig et al. 2009a; Kallinger & Matthews 2010; Mathur et al. 2011; Chaplin et al. 2011b; Samadi et al. 2013a,b; Cranmer et al. 2014)

- **Comportement des largeurs avec l'évolution**

(Chaplin et al. 2009; Baudin et al. 2011; Belkacem et al. 2012; Appourchaux et al., 2012, 2014)



On comprend l'essentiel de la structure des spectres d'oscillation



# La compréhension des spectres d'oscillation

## Les étoiles évoluées : modes mixtes & compréhension des spectres

Modes mixtes : amplitudes à la surface (force de rappel = gradient de pression) et au coeur (force de rappel = force d'Archimède)

- D'un point de vue théorique, la présence des modes mixtes a été identifiée depuis bien longtemps dans les étoiles évoluées (e.g., Dziembowski 1971; Scuflaire 1974; Dziembowski et al. 2001; Dupret et al. 2009; Montalbán et al. 2010; Dziembowski 2012; Montalbán & Noels 2013; Grosjean et al. 2014)

# La compréhension des spectres d'oscillation

## Les étoiles évoluées : modes mixtes & compréhension des spectres

Modes mixtes : amplitudes à la surface (force de rappel = gradient de pression) et au coeur (force de rappel = force d'Archimède)

- D'un point de vue théorique, la présence des modes mixtes a été identifiée depuis bien longtemps dans les étoiles évoluées (e.g., Dziembowski 1971; Scuflaire 1974; Dziembowski et al. 2001; Dupret et al. 2009; Montalbán et al. 2010; Dziembowski 2012; Montalbán & Noels 2013; Grosjean et al. 2014)
- Plus récemment, il a été montré qu'ils étaient détectables et détectés avec CoRoT et Kepler (Dupret et al. 2009; De Ridder et al. 2009; Bedding et al. 2011; Mosser et al. 2011; Grosjean et al. 2014)

# La compréhension des spectres d'oscillation

## Les étoiles évoluées : modes mixtes & compréhension des spectres

Modes mixtes : amplitudes à la surface (force de rappel = gradient de pression) et au coeur (force de rappel = force d'Archimède)

- D'un point de vue théorique, la présence des modes mixtes a été identifiée depuis bien longtemps dans les étoiles évoluées (e.g., Dziembowski 1971; Scuflaire 1974; Dziembowski et al. 2001; Dupret et al. 2009; Montalbán et al. 2010; Dziembowski 2012; Montalbán & Noels 2013; Grosjean et al. 2014)
- Plus récemment, il a été montré qu'ils étaient détectables et détectés avec CoRoT et Kepler (Dupret et al. 2009; De Ridder et al. 2009; Bedding et al. 2011; Mosser et al. 2011; Grosjean et al. 2014)
- identification des modes & compréhension du spectre
  - oscillateurs couplés (Deheuvels & Michel 2011; Benomar et al. 2012, 2013)
  - pattern universel (Mosser et al. 2011)



la structure des spectres des étoiles évoluées est comprise

# La compréhension des spectres d'oscillation

## Les étoiles évoluées : modes mixtes & compréhension des spectres

Modes mixtes : amplitudes à la surface (force de rappel = gradient de pression) et au coeur (force de rappel = force d'Archimède)

• D'un point de vue théorique, la présence des modes mixtes a été identifiée depuis bien longtemps dans les étoiles évoluées (e.g., Dziembowski 1971; Scuflaire 1974; Dziembowski et al. 2001; Dupret et al. 2009; Montalbán et al. 2010; Dziembowski 2012; Montalbán & Noels 2013; Grosjean et al. 2014)

• Plus récemment, il a été montré qu'ils étaient détectables et détectés avec CoRoT et Kepler (Dupret et al. 2009; De Ridder et al. 2009; Bedding et al. 2011; Mosser et al. 2011; Grosjean et al. 2014)

• identification des modes & compréhension du spectre

- oscillateurs couplés  
(Deheuvels & Michel 2011; Benomar et al. 2012, 2013)



la structure des spectres des étoiles évoluées est comprise

- pattern universel (Mosser et al. 2011)

• détermination de la séparation en période (régularité en période des modes de gravité)

- séparation en période «effective» des modes mixtes  
(Mosser et al. 2011; Bedding et al. 2011)

- séparation en période asymptotique  
(Mosser et al. 2012)



le lien entre les fréquences des modes mixtes et les propriétés du coeur des étoiles a été fait

$$\Delta\Pi \propto \left( \int_{\text{core}} N \frac{dr}{r} \right)^{-1}$$

# Sommaire

## I) La compréhension des spectres d'oscillation

- Les étoiles de séquence principale : dichotomie étoiles F / G & K
- Les étoiles évoluées : modes mixtes & compréhension des spectres

## II) Sismologie d'ensemble

- Détermination des paramètres globaux
- L'apport de la séparation en période

## III) Sismologie «à la carte» ou «sur mesure»

Quelques exemples :

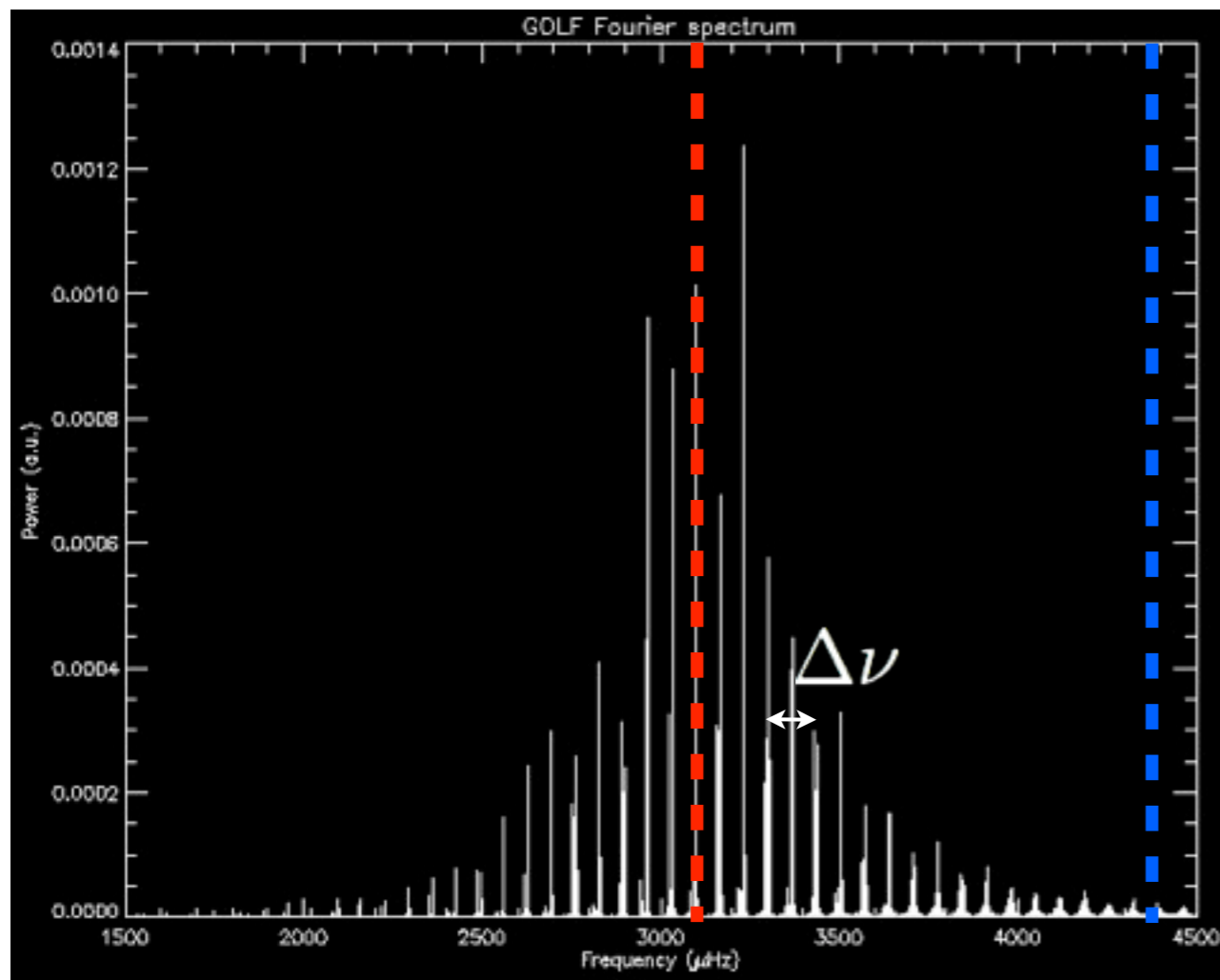
- Contraintes sur les paramètres stellaires
- Contraintes sur la rotation et son évolution

# Sismologie d'ensemble

Principe : relations entre indices sismiques et paramètres fondamentaux des étoiles



## Définitions des indices sismiques



---  $\nu_{\text{max}}$  fréquence du maximum d'amplitude

---  $\nu_c$  fréquence de coupure

$\Delta\nu$  la grande séparation

Pour les modes de gravité,  
la séparation en période

$\Delta\Pi$

# Sismologie d'ensemble

Les deux principales relations d'échelle :

- $\Delta\nu \propto \bar{\rho}^{1/2}$ 
  - introduite par Ulrich (1986) pour une étoile de type solaire
  - $\Delta\nu$ - $\rho$  est l'équivalent de  $\Pi_0$  -  $\rho$  pour les pulsateurs classiques ( $\Pi_0$  période du fondamental)
  - l'hypothèse physique sous-jacente est l'homologie

# Sismologie d'ensemble

## Les deux principales relations d'échelle :

- $\Delta\nu \propto \bar{\rho}^{1/2}$ 
  - introduite par Ulrich (1986) pour une étoile de type solaire
  - $\Delta\nu$ - $\rho$  est l'équivalent de  $\Pi_0$  -  $\rho$  pour les pulsateurs classiques ( $\Pi_0$  période du fondamental)
  - l'hypothèse physique sous-jacente est l'homologie
- $\nu_{\max} \propto \nu_c$ 
  - relation proposée par Brown (1991)
  - liée à une résonance entre temps thermique et période du mode dans la région super-adiabatique (Belkacem et al. 2011)

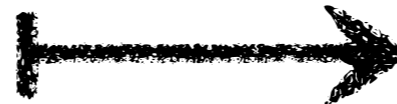


# Sismologie d'ensemble

Les deux principales relations d'échelle :

- $\Delta\nu \propto \bar{\rho}^{1/2}$ 
  - introduite par Ulrich (1986) pour une étoile de type solaire
  - $\Delta\nu$ - $\rho$  est l'équivalent de  $\Pi_0$  -  $\rho$  pour les pulsateurs classiques ( $\Pi_0$  période du fondamental)
  - l'hypothèse physique sous-jacente est l'homologie
- $\nu_{\max} \propto \nu_c$ 
  - relation proposée par Brown (1991)
  - liée à une résonance entre temps thermique et période du mode dans la région super-adiabatique (Belkacem et al. 2011)

$$\Delta\nu \propto \langle \rho \rangle^{1/2} \propto \left( \frac{M}{R^3} \right)^{1/2}$$
$$\nu_{\max} \propto \nu_c \propto \frac{c_s}{2H_p} \propto \frac{g}{\sqrt{T_{\text{eff}}}} \propto \frac{M}{R^2 \sqrt{T_{\text{eff}}}}$$



$$R \propto \nu_{\max} \Delta\nu^{-2} T_{\text{eff}}^{1/2}$$
$$M \propto \nu_{\max}^3 \Delta\nu^{-4} T_{\text{eff}}^{3/2}$$

*R et M (log g) sont souvent nommés masse et rayon sismique (gravité sismique)*

# Sismologie d'ensemble : les paramètres globaux

**Approche directe** : les relations d'échelles sont utilisées pour obtenir les masses et rayons  
e.g.; Hekker et al. (2009); Huber et al. (2009); Mosser et al. (2010, 2012); Mathur et al. (2010); Kallinger et al. (2010)

- indépendant des modèles stellaires
- très rapide pour obtenir une première estimation ou avoir des paramètres pour un grand échantillon
- bonne précision, pour  $v_{\max} < 5\%$ ,  $\Delta v < 1\%$ , and  $\Delta T_{\text{eff}} \sim 100 \text{ K}$



$\Delta \log g \sim 0.04 \text{ dex}$   
 $\Delta M/M \sim 20 \%$   
 $\Delta R/R \sim 8 \%$

# Sismologie d'ensemble : les paramètres globaux

**Approche directe** : les relations d'échelles sont utilisées pour obtenir les masses et rayons

e.g.; Hekker et al. (2009); Huber et al. (2009); Mosser et al. (2010, 2012); Mathur et al. (2010); Kallinger et al. (2010)

- indépendant des modèles stellaires
- très rapide pour obtenir une première estimation ou avoir des paramètres pour un grand échantillon
- bonne précision, pour  $v_{\max} < 5\%$ ,  $\Delta v < 1\%$ , and  $\Delta T_{\text{eff}} \sim 100$  K



$\Delta \log g \sim 0.04$  dex  
 $\Delta M/M \sim 20\%$   
 $\Delta R/R \sim 8\%$

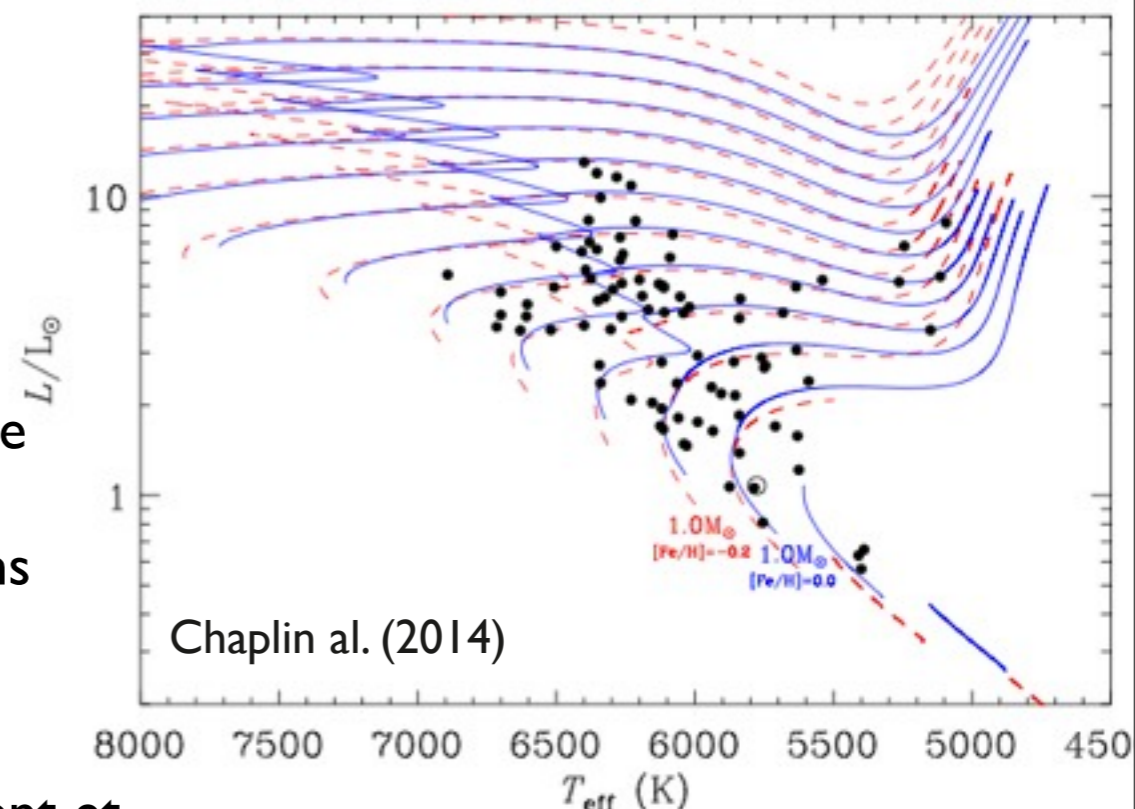
**Approche basée sur les grilles de modèles** : relations d'échelles + grilles de modèles

e.g., Stello et al. (2009); Basu, Chaplin & Elsworth (2010); Quirion, Christensen-Dalsgaard & Arentoft (2010); Gai et al. (2011), Creevey et al. (2012); Chaplin al. (2014)

- Les masses, rayons sismiques et température effective ne sont plus indépendants mais contraints pour les équations de structure
- problème de complétude des grilles et estimation des précisions



grande précision de la méthode mais de nombreux biais existent et il reste à les quantifier



# Sismologie d'ensemble : les paramètres globaux

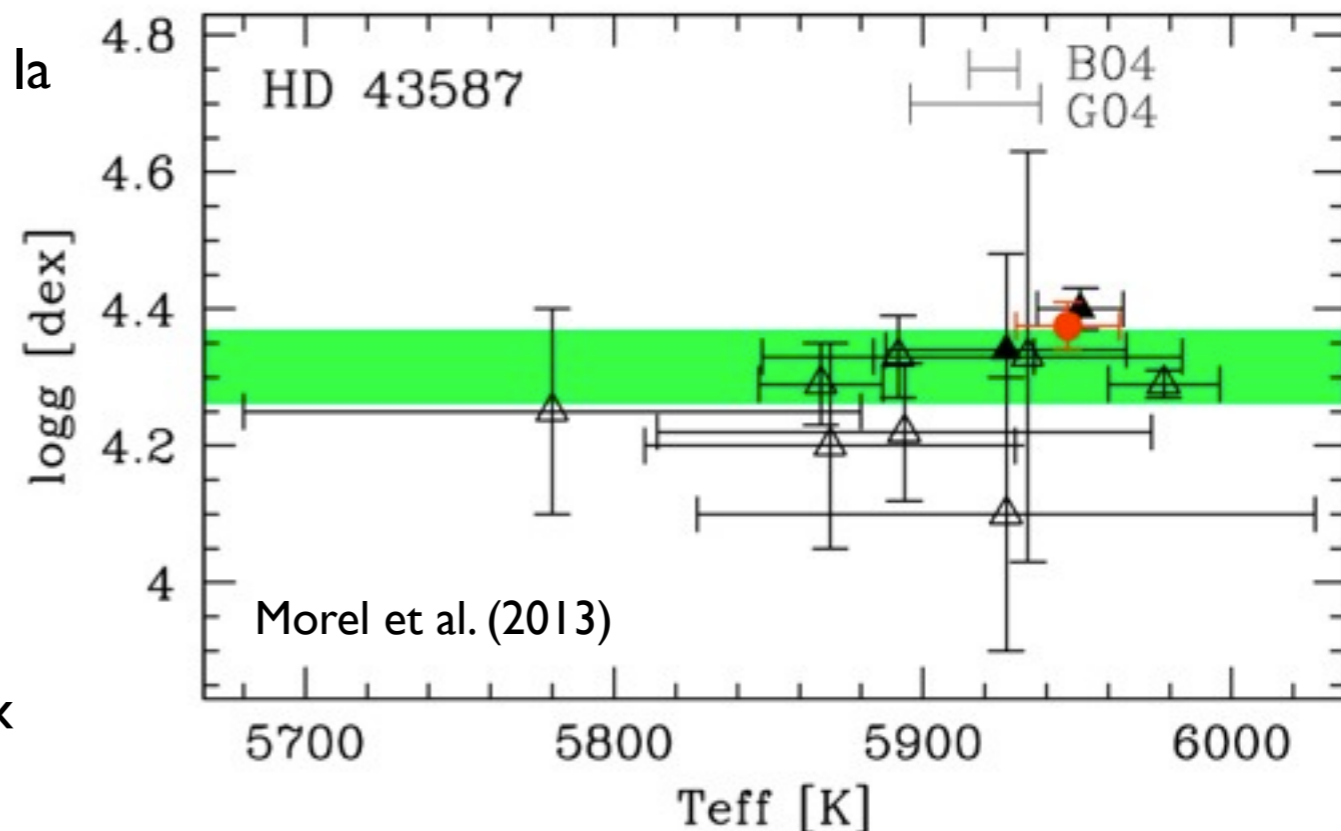
## Le log g sismique et la température effective :

Utilisation du  $\log g$  sismique pour déterminer la  $T_{\text{eff}}$  avec la spectroscopie (e.g., Bruntt et al. 2010; Batalha et al. 2011; Creevey et al. 2012; Morel & Miglio 2012; Valentini et al. 2013...)

- Pour  $\log g$ , on utilise la relation entre  $\nu_{\text{max}}$  and  $\nu_c$

$$\log g = \log g_{\odot} + \log \left( \frac{\nu_{\text{max}}}{\nu_{\text{max},\odot}} \right) + \frac{1}{2} \log \left( \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}} \right)$$

précision caractéristique  $\Delta \nu_{\text{max}} \sim 5\%$  /  $\Delta \log g \sim 0.03$  dex



- Pour  $T_{\text{eff}}$  et Fe/H, on utilise le  $\log g$  sismique comme contrainte dans l'analyse spectroscopique
- Avantage, le  $\log g$  sismique dépend faiblement de la physique des modèles (e.g., Lebreton & Goupil in prep)



Réduit significativement les incertitudes sur  $T_{\text{eff}}$  et Fe/H (e.g. Morel et al. 2013)

# Sismologie d'ensemble : l'apport de la séparation en période

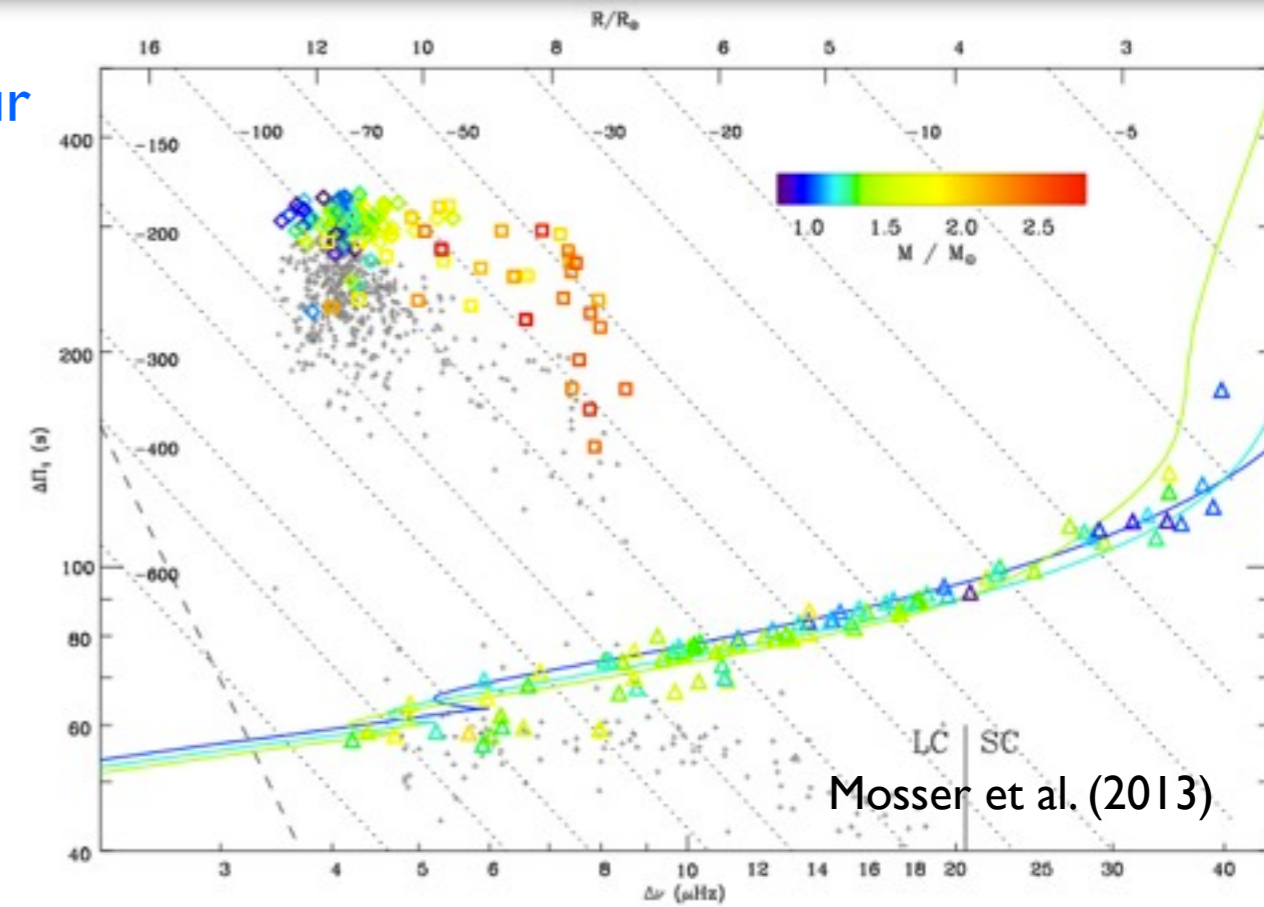
- La séparation en période donne des informations sur le coeur des géantes :

$$\Pi_{n,\ell} = \Delta\Pi (n + \epsilon_g)$$

$$\Delta\Pi \propto \left( \int_{\text{core}} N \frac{dr}{r} \right)^{-1} \quad \text{avec} \quad N^2 \propto \frac{g^2 \rho}{P} = \frac{g}{H_p}$$

→  $\Delta\Pi \propto \langle \rho \rangle_{\text{core}}^{-1/2}$

e.g. Mosser et al. (2012); Corsaro et al. (2012); Kallinger et al. (2012);  
Montalban et al. (2013); Stello et al. (2013); Benomar 2014



# Sismologie d'ensemble : l'apport de la séparation en période

- La séparation en période donne des informations sur le coeur des géantes :

$$\Pi_{n,\ell} = \Delta\Pi (n + \epsilon_g)$$

$$\Delta\Pi \propto \left( \int_{\text{core}} N \frac{dr}{r} \right)^{-1} \quad \text{avec} \quad N^2 \propto \frac{g^2 \rho}{P} = \frac{g}{H_p}$$

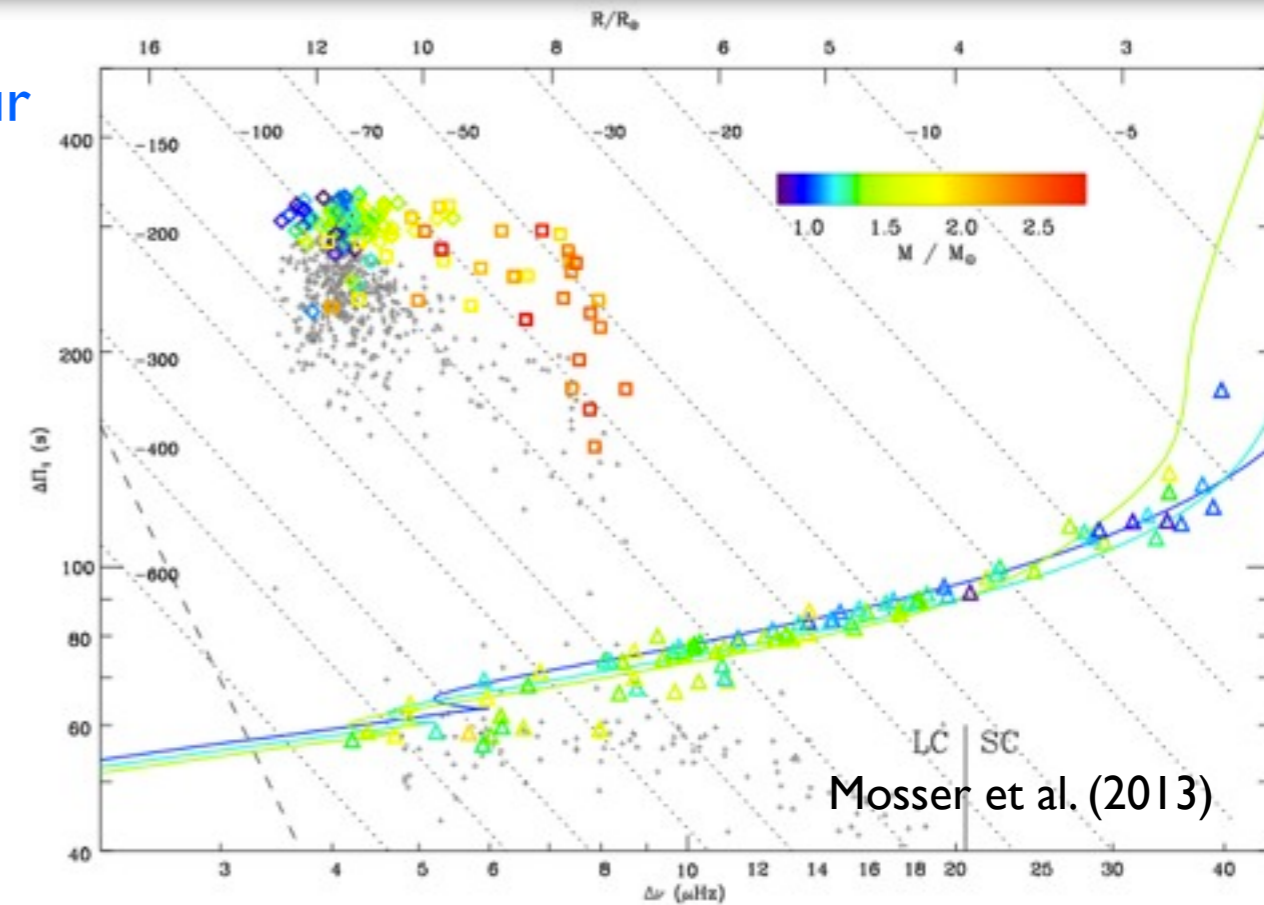
→  $\Delta\Pi \propto \langle \rho \rangle_{\text{core}}^{-1/2}$

e.g. Mosser et al. (2012); Corsaro et al. (2012); Kallinger et al. (2012); Montalbán et al. (2013); Stello et al. (2013); Benomar 2014

- Evolution de la rotation du coeur des sous-géantes et géantes rouges

- Beck et al. (2011) : première détection de splitting dans une géante
- Mosser et al. (2012) / Goupil et al. (2013) : ralentissement du coeur des géantes rouges

→ Il manque un (ou plusieurs) processus de transport (Eggenberger et al. 2013 / Marques et al. 2013)



# Sismologie d'ensemble : bilan et perspectives

- C'est une thématique qui a émergé très récemment (avec CoRoT et *Kepler*) mais elle a donné énormément de résultats (non évoqués ici...)
- Au-delà de la physique stellaire : populations stellaires (e.g. Miglio et al. 2009, 13, Mosser et al. 2010, Chaplin et al. 2011, Corsaro et al. 2012, Basu et al. 2011...); caractérisation des exo-planètes (Huber et al. 2013a; Batalha et al. 2011; Chaplin et al. 2013b; Gizon et al. 2013); relation période-luminosité (Mosser et al. 2013)

# Sismologie d'ensemble : bilan et perspectives

- C'est une thématique qui a émergé très récemment (avec CoRoT et *Kepler*) mais elle a donné énormément de résultats (non évoqués ici...)
- Au-delà de la physique stellaire : populations stellaires (e.g. Miglio et al. 2009, 13, Mosser et al. 2010, Chaplin et al. 2011, Corsaro et al. 2012, Basu et al. 2011...); caractérisation des exo-planètes (Huber et al. 2013a; Batalha et al. 2011; Chaplin et al. 2013b; Gizon et al. 2013); relation période-luminosité (Mosser et al. 2013)
- Identification des biais = effort d'étalonnage qui a commencé mais doit être amplifié

Comparaison des rayons sismiques avec ceux déterminés avec la parallaxe et l'interférométrie (e.g., Miglio et al. 2013; Silva-Aguirre et al. 2012) et quelques travaux en cours sur des binaires sismiques (e.g. Gaulme et al. 2014)



Besoin de plus de précision, d'étoiles proche, amas, système binaires = GAIA + PLATO + Spectro haute résolution



# Sismologie d'ensemble : bilan et perspectives

- C'est une thématique qui a émergé très récemment (avec CoRoT et Kepler) mais elle a donné énormément de résultats (non évoqués ici...)
- Au-delà de la physique stellaire : populations stellaires (e.g. Miglio et al. 2009, 13, Mosser et al. 2010, Chaplin et al. 2011, Corsaro et al. 2012, Basu et al. 2011...); caractérisation des exo-planètes (Huber et al. 2013a; Batalha et al. 2011; Chaplin et al. 2013b; Gizon et al. 2013); relation période-luminosité (Mosser et al. 2013)
- Identification des biais = effort d'étalonnage qui a commencé mais doit être amplifié

Comparaison des rayons sismiques avec ceux déterminés avec la parallaxe et l'interférométrie (e.g., Miglio et al. 2013; Silva-Aguirre et al. 2012) et quelques travaux en cours sur des binaires sismiques (e.g. Gaulme et al. 2014)



Besoin de plus de précision, d'étoiles proche, amas, système binaires = GAIA + PLATO + Spectro haute résolution

- Améliorer la détermination des paramètres stellaires : synergie entre spectroscopie et sismologie



Dans le cadre du survey APOGEE et GAIA ESO Survey , les cibles Kepler et CoRoT on été observées



Réseau SPACEINN : base de donnée d'indices sismiques et portail de base de données

# Sommaire

## I) La compréhension des spectres d'oscillation

- Les étoiles de séquence principale : dichotomie étoiles F / G & K
- Les étoiles évoluées : modes mixtes & compréhension des spectres

## II) Sismologie d'ensemble

- Détermination des paramètres globaux
- L'apport de la séparation en période

## III) Sismologie «à la carte» ou «sur mesure»

Quelques exemples :

- Contraintes sur les paramètres stellaires
- Contraintes sur la rotation et son évolution

# Sismologie détaillée ou «à la carte»

**Sismologie détaillée** : on ne se limite pas aux indices sismiques mais on utilise toute l'information contenue dans les fréquences (structure fine du spectre)

- Contraintes sur les paramètres stellaires :**

Ex : paramètres globaux et âge de la cible CoRoT HD52265

(Sorlano et al. 2007; Ballot et al. 2011; Escobar et al. 2012; Lebreton & Goupil 2012; Gizon et al. 2013)

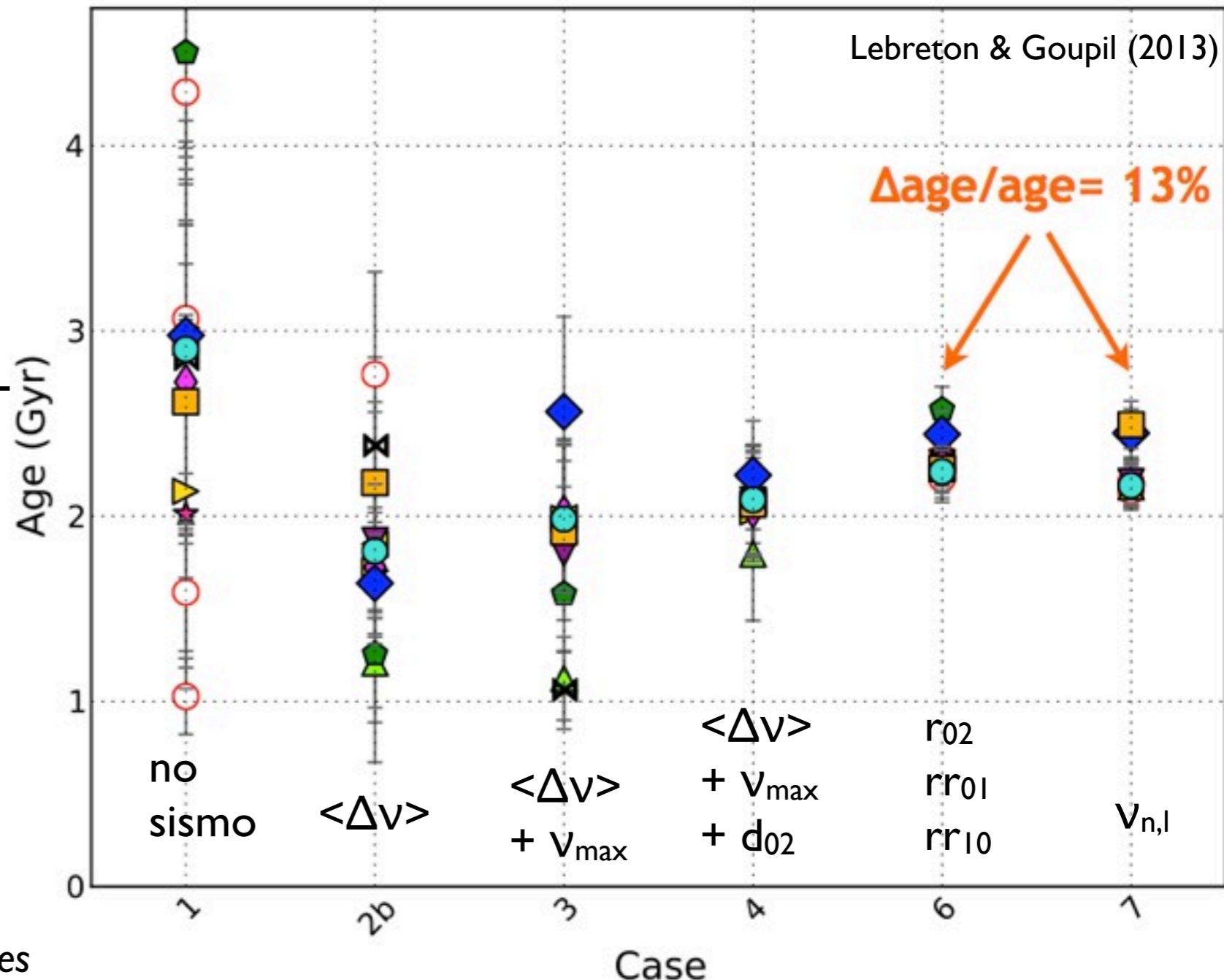
Variation de la physique des modèles (convection, pénétration convective, micro-physique, composition, etc...)



âge 10-20% / masse 2-4% / rayon 1-2% / log g 0.05 dex



*Démonstration de l'efficacité de la sismologie pour la détermination des paramètres stellaires*



# Sismologie détaillée ou «à la carte» : la rotation

- Contraintes sur la rotation (étoiles de séquence principale):

- Diagnostic sur la rotation différentielle en latitude pour la cible CoRoT HD181420 (e.g., Barban et al. 2009; Ouazzani & Goupil 2012)

- Estimation robuste de la rotation de surface (+ angle d'inclinaison) pour la cible CoRoT HD52265 (Gizon et al. 2013)

- Pour les cibles Kepler, c'est un travail qui est en cours (e.g. Davies et al. 2014, in prep + WGI kepler)

# Sismologie détaillée ou «à la carte» : la rotation

- **Contraintes sur la rotation (étoiles de séquence principale):**

- Diagnostic sur la rotation différentielle en latitude pour la cible CoRoT HD181420 (e.g., Barban et al. 2009; Ouazzani & Goupil 2012)
- Estimation robuste de la rotation de surface (+ angle d'inclinaison) pour la cible CoRoT HD52265 (Gizon et al. 2013)
- Pour les cibles Kepler, c'est un travail qui est en cours (e.g. Davies et al. 2014, in prep + WGI kepler)

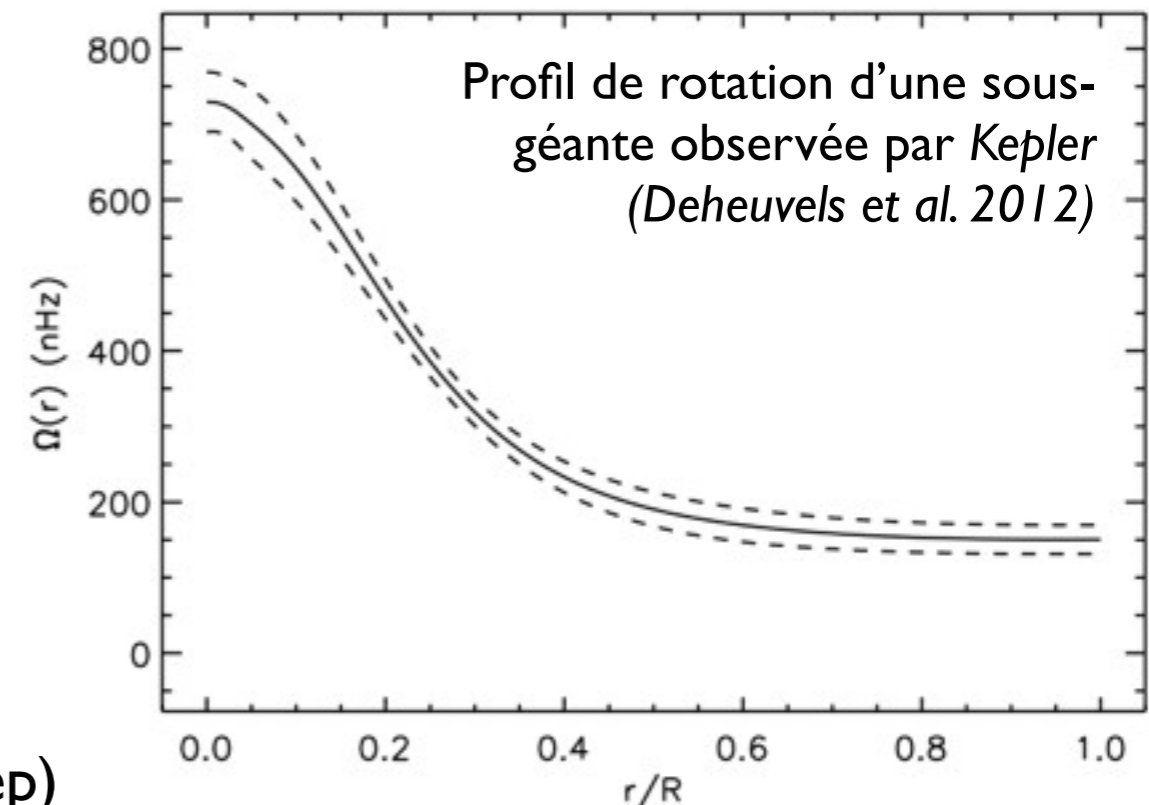
- **Contraintes sur la rotation (étoiles évoluées):**

- Inversions sismiques du profil de rotation dans 7 sous-géantes observées par Kepler (Deheuvels 2012, 2014)
- Pour les étoiles plus évoluées, les choses sont plus compliquées



on obtient principalement une information sur le coeur de l'étoile (Goupil et al. 2013; Ouazzani et al. 2013)

mais rotation de surface par l'activité (Garcia et al. in prep)



# Conclusions

- Grâce à CoRoT et *Kepler*, on dispose de contraintes fortes depuis la séquence principale jusqu'aux stades avancés
- On comprend maintenant l'essentiel en ce qui concerne la structure et l'évolution des spectres d'oscillation
  - ➔ *cela permet d'utiliser la sismologie comme un outil pour contraindre la structure interne*
- La sismologie d'ensemble devient une thématique importante :
  - ➔ *fournir des déterminations de paramètres stellaires pour un grand nombre d'étoiles*
  - ➔ *utilisée au-delà du domaine de la physique stellaire*
- L'interprétation des données ne fait que commencer
  - ➔ *en particulier pour la modélisation détaillée des étoiles*

# Perspectives : de grandes questions

Les résultats récents de sismologie ont soulevé beaucoup de questions, parmi lesquelles :

- **Processus de transport de moment cinétique**

CoRoT et *Kepler* ont montré que la rotation du coeur des géantes n'est pas comprise



Important travail théorique sur les processus de transport (ondes, champs magnétique, turbulence, ...)

Il faut faire le lien entre étoiles de séquence principale et étoiles évoluées



augmenter la statistique sur les sous-géantes et étoiles brillantes pour les MS

- **La convection de surface (convection super-adiabatique) reste un point dur**



Impact sur la détermination des paramètres stellaires (rayon, masses, ...)  
Impact sur l'évolution (principalement des géantes rouges)  
Réduit le potentiel de la sismologie via l'utilisation des fréquences individuelles



Nécessité d'une approche hybride (modèles 1D + simulés hydro 3D)

# Perspectives : un contexte très favorable !



*Kepler*



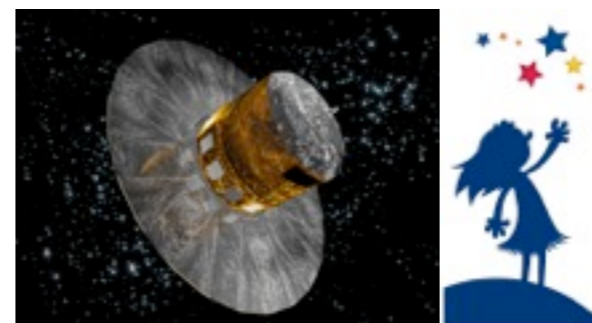
Décembre  
2006

Mars 2009

lancement prévu en 2017

lancement prévu en 2024

Décembre 2013



Copyright ESA - C. Carreau

+ APOGEE survey  
+ GAIA-ESO Survey

- Forte synergie entre les missions GAIA, PLATO et les grands relevés spectroscopiques
- Contrairement à CoRoT et *Kepler*, PLATO privilégieront des étoiles brillantes
  - ➔ Amélioration significative des performances de la sismologie
- pour plus de détails cf talk de R. Samadi