

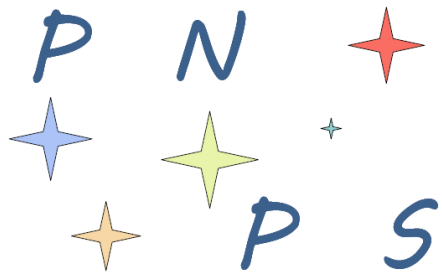
Colloque de prospective du Programme National de Physique Stellaire (PNPS)

“Structure interne et évolution stellaire”

Bilans et perspectives

R. Samadi & Y. Lebreton

Contributions de I. Baraffe, K. Belkacem, S.
Blondin, C. Charbonnel, S. Charpinet, O.
Creevey, M. Deal, F. Lignières, R. Ouazzani, C.
Pincon, O. Richard, M. Rieutord, T. Sonoi, S.
Turck-Chièze



“Structure interne et évolution stellaire”: progrès en physique stellaire

- **Microphysique**

- Diffusion atomique, accélérations radiatives
- Opacités
- Nucléosynthèse

- **Macrophysique**

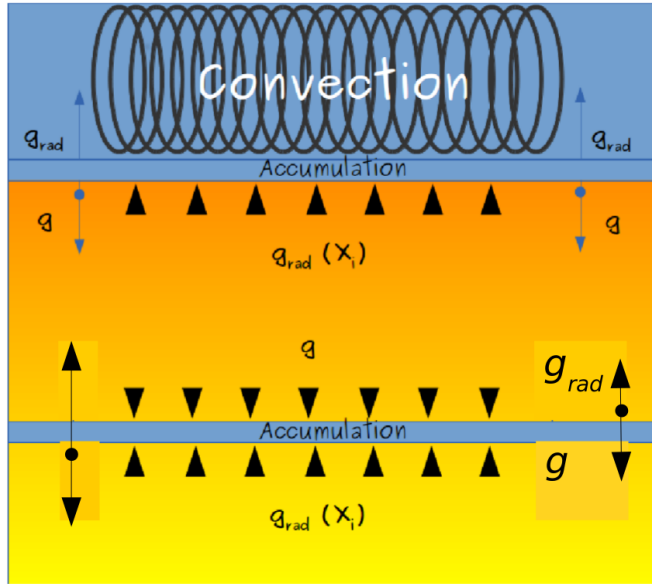
- Rotation et transport du moment cinétique
- Convection (simulations, effets de surface, modèles patchés/hybrides)
- Autres processus de mélange (mélange thermohaline,...)
- Perte de masse → F. Martins

- **Contraintes observationnelles et outils de diagnostic**

- Sismologie
- Benchmarks stars, rayons interférométriques
- Grands relevés spectroscopiques, Gaia

Diffusion microscopique

Accélérations radiatives



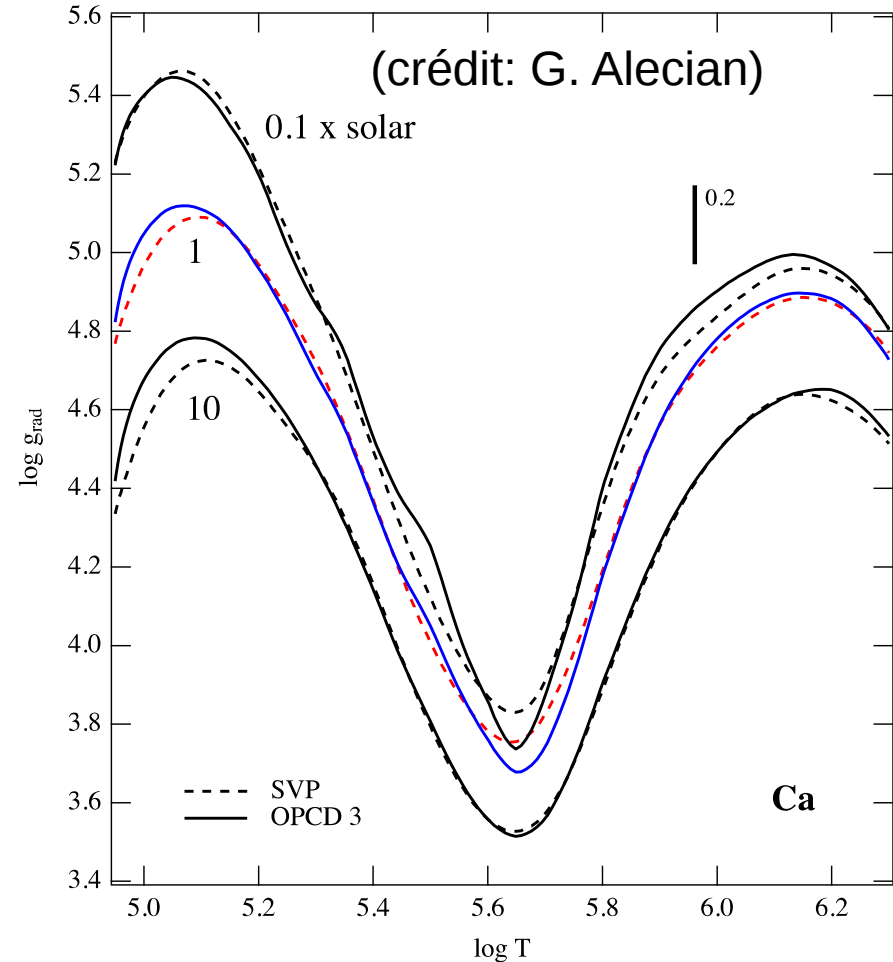
Code Montréal
Montpellier (MoMo) :
méthode →
“opacity sampling”

Méthode « SVP »

- approximation paramétrique (Alecian & LeBlanc 2002, Le Blanc & Alecian 2004) ;
- calcul très rapide des accélérations radiatives –
amélioration des tables des paramètres
→ Alecian & LeBlanc 2018 in prep.

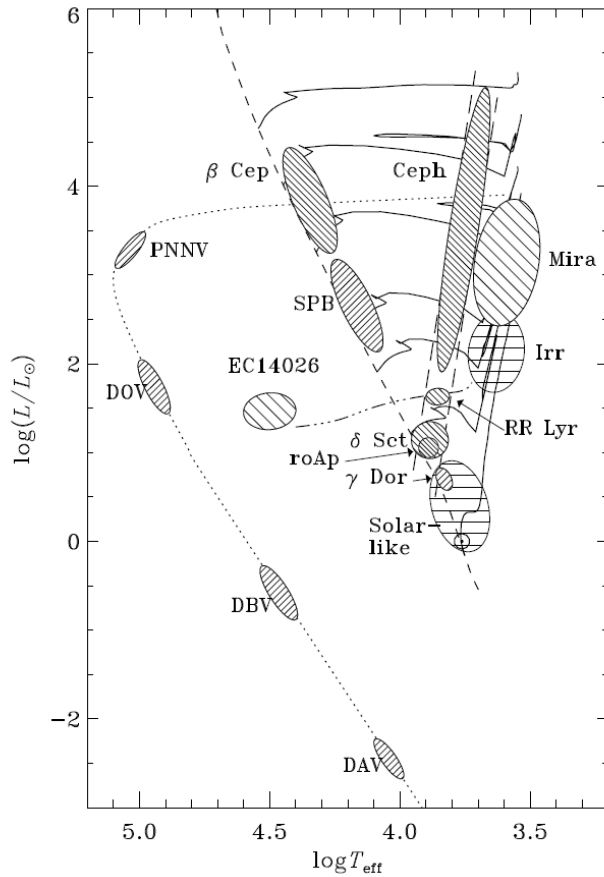
À terme les tables seront publiques

SVP intégrée dans 2 codes utilisés
par la communauté: TGEC et
CESTAM

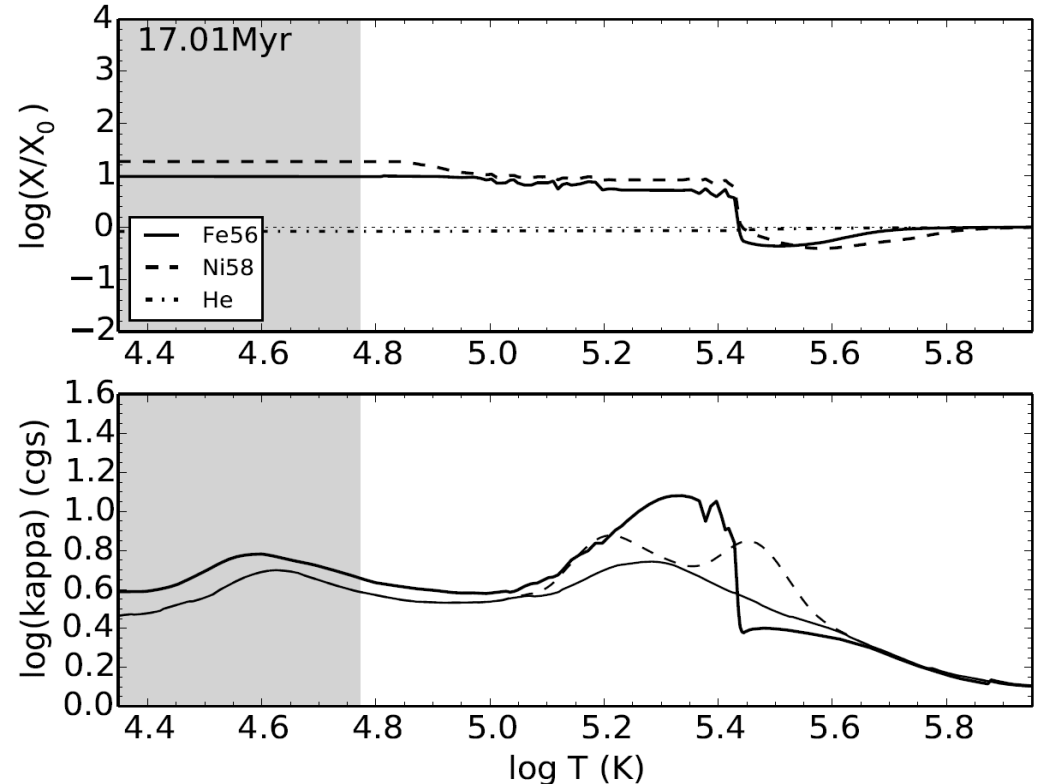


SVP utilisée dans le cadre de la préparation de
PLATO : impact incertitude sur âge et rayon ; c.f.
présentation de Morgan DEAL

Diffusion microscopique



ν Eri : hybrid β Cep/ SPB



Augmentation de l'opacité dans les étoiles B

- Propriétés sismiques des étoiles massives (β Cep, SPB) \rightarrow l'opacité doit être plus élevée dans la région où les éléments du pic du fer dominant l'opacité locale.
- La diffusion atomique incluant les accélérations radiatives, complétée par la perte de masse et la convection thermohaline conduit à une augmentation d'opacité suffisante (Hui-Bon-Hoa & Vauclair 2018).

Code TGEC

Diffusion microscopique

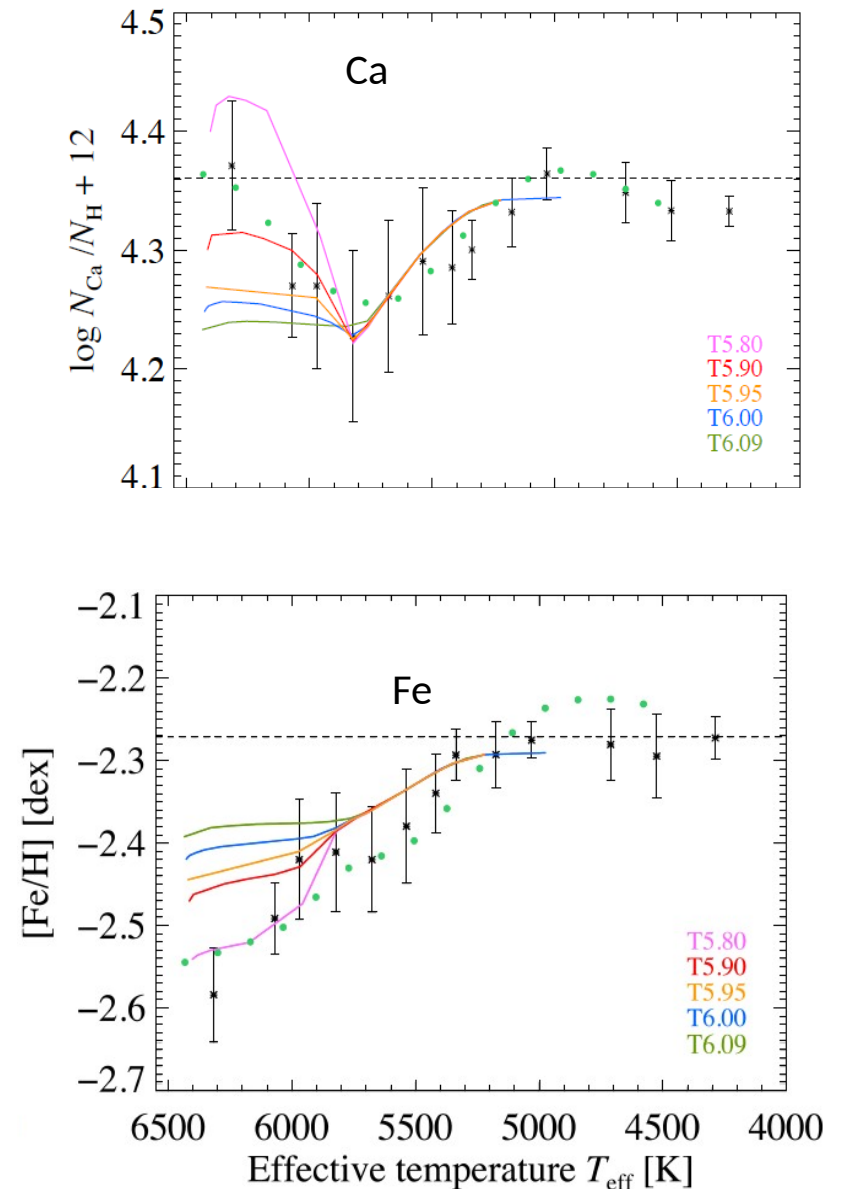
Diffusion atomique dans les étoiles âgées pauvres en métaux :

- Les abondances mesurées dans les étoiles d'amas globulaires permettent de contraindre les processus de transport dans ces étoiles.
- Dans M30, des différences d'abondances sont trouvées entre les étoiles du turn-off et les RGB pour certains éléments (~ 0.3 dex pour Fe) \rightarrow elles sont reproduites par des modèles prenant en compte la diffusion atomique et un mélange additionnel (Gruyters et al. 2016).

Code de Montréal-Montpellier

Soutien PNPS: Richard et al (2015-2018)

Amas globulaire M30



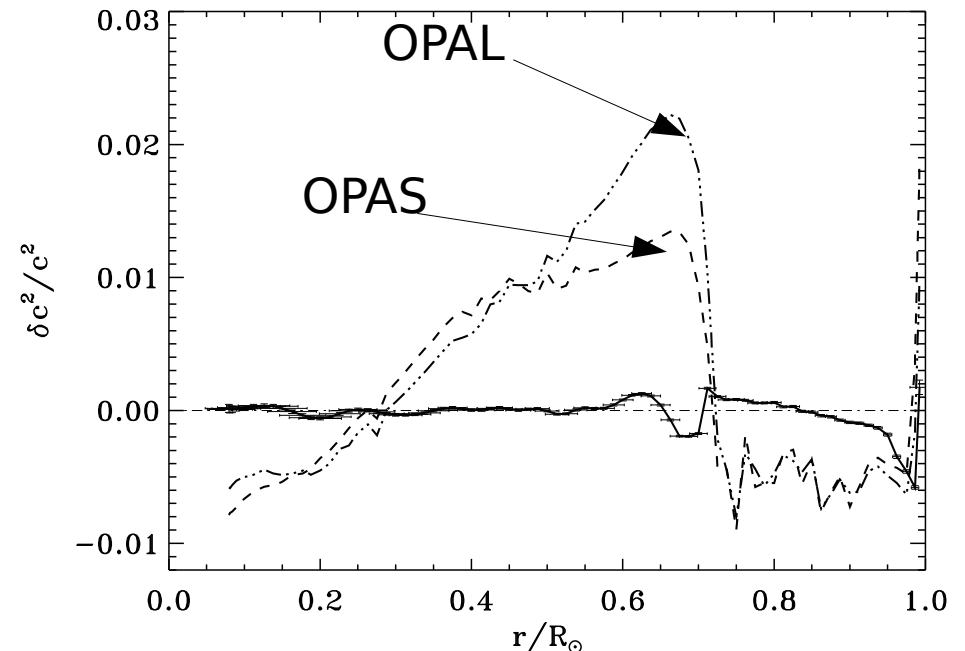
Opacités

Opacités d'OP vs. **ATOMIC** (nouveau code, Los Alamos) vs. **SCO-RCG** (nouveau code, CEA) pour les **éléments du pic du fer (Fe, Ni et Cr)** dans les conditions physiques des **enveloppes des étoiles massives** (Turck-Chièze et al. 2016):

- Bon accord général entre SCO-RCG et ATOMIC
- OP: sous-estimation du Fe par un facteur 2 et du Ni par un facteur 6
- Comparaison des résultats expérimentaux (au LULI) et des calculs → différences non comprises dans le cas du fer, pas de différences pour le Ni

OPAS (Blancard et al 2012, CEA) : les tables d'opacité d'OPAS sont publiques (Mondet et al 2015):

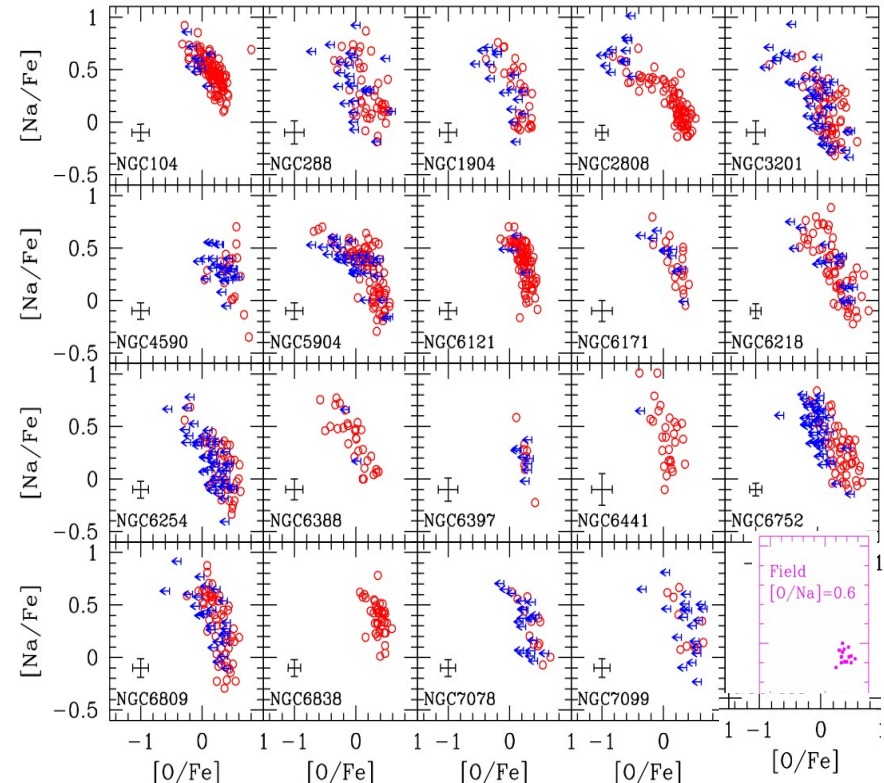
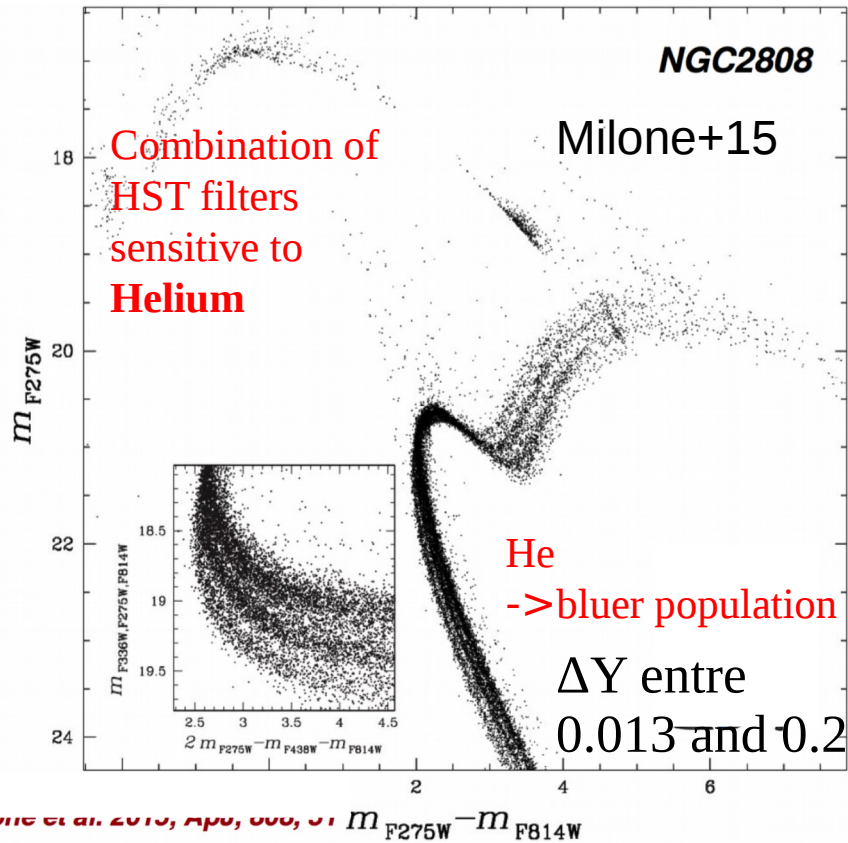
- Comparaison détaillée pour les **conditions de l'intérieur solaire** entre OPAS, OPAL (pas complet pour tous les éléments), OP et ATOMIC.
- Réduction d'un tiers de la différence entre la vitesse du son observée et celle prédite par le modèle solaire (*Le Pennec et al. 2015, thèse M. Le Pennec*).



Soutien PNPS: Turck-Chièze et al (2015)
ANR OPACITY (Turck-Chièze et al, 2013-2018)

Nucléosynthèse et populations stellaires

Populations stellaires multiples dans les amas globulaires



Anticorrélation O-Na dans une vingtaine d'amas globulaires (Carretta+10)

Brûlage de H via CNO, NeNa, MgAl @ 75M K : Prantzos, Charbonnel & Iliadis (17)

Le "Coupable" : Super Massive Stars (SMS) ; $M > 2 \cdot 10^3 M_{\odot}$!!

Gieles, Charbonnel+18 → Scénario possible de formation concomitante d'amas massifs et de SMS

Microphysique : éléments de prospective

- Application de la méthode « SVP » à d'autres éléments (en particulier Ni) → en cours.
- Etude de l'impact de la stratification chimique sur l'opacité et les propriétés sismiques (e.g. bandes d'instabilité). Etendre les tests sismiques de différentes catégories d'étoiles avec les modèles, rôle-clé de la communauté dans la préparation de PLATO.
- Pérenniser l'expertise française dans le domaine des calculs d'opacité (codes français et OP : *TOPbase*), consolider les liens avec les expériences sur les lasers de puissance.

Macrophysique : rotation

Le code ESTER

(Rieutord+16 in J Computation Physics 318, 277)

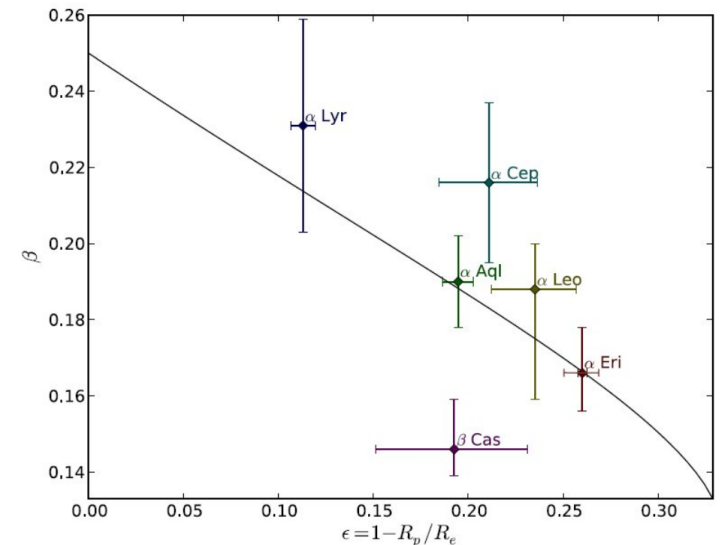
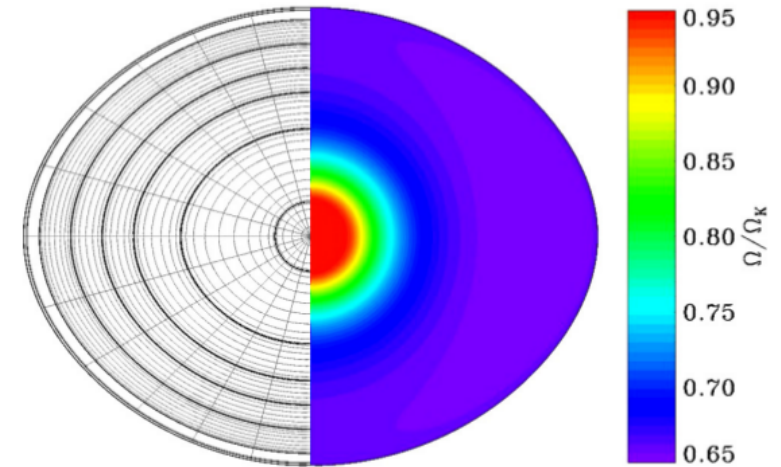
Introduction de l'évolution nucléaire et massique temporelle sur la séq. principale (Gagnier et al., sub.)

Progrès sur l'évolution des étoiles $M > 2 M_{\text{sol}}$ avec perte de masse (thèse D. Gagnier)

Package numérique plus maniable (Github: <http://ester-project.github.io/ester/>)

Couplage à des données interférométriques : modélisation détaillée du "Gravity Darkening" de θ Sco, α Eri ... (Domiciano et al., prep.)

Soutenue par ANR 2016-2020 (projet ESRR, M. Rieutord et al.)



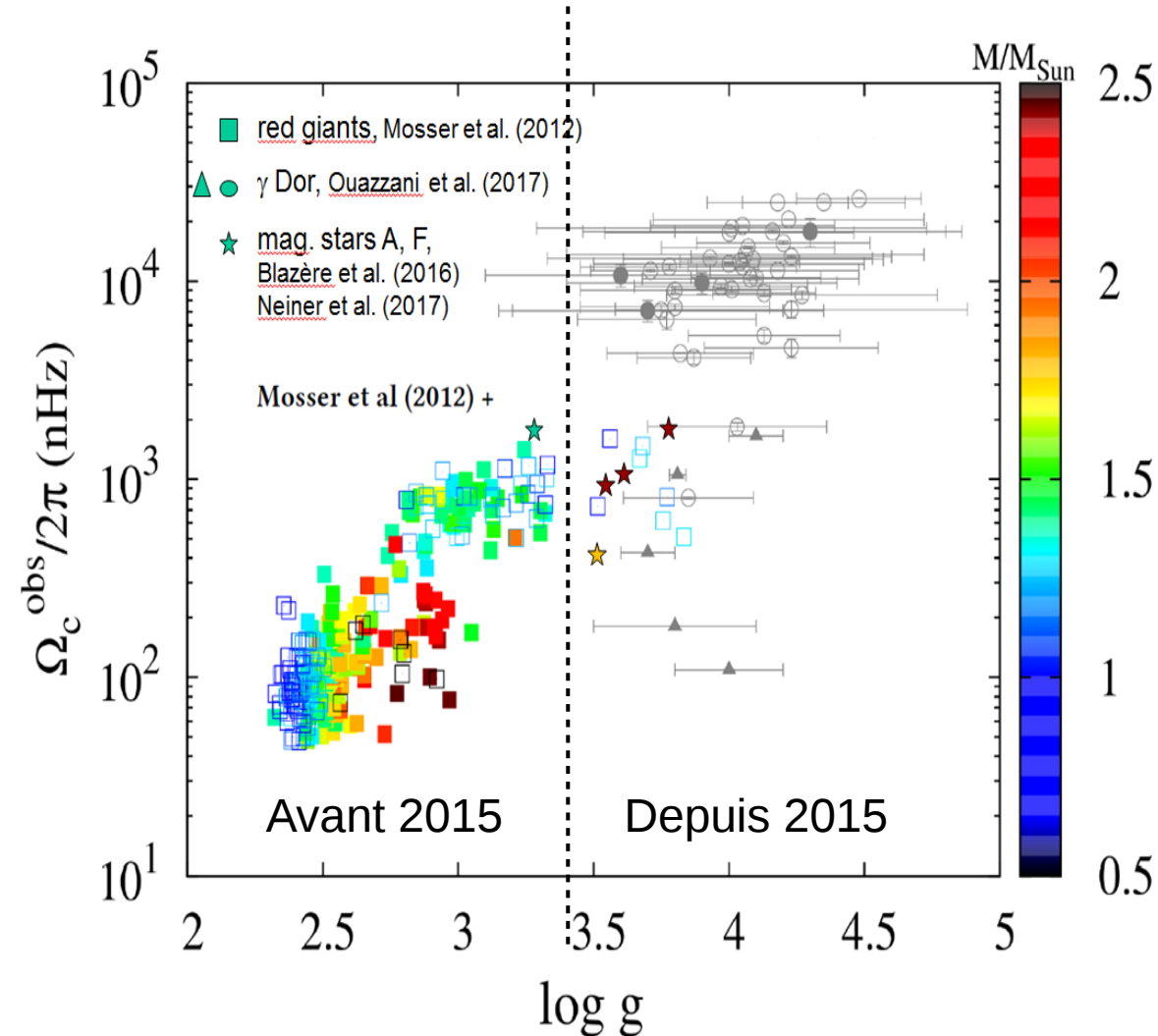
$$T_{\text{eff}} \propto g_{\text{eff}}^{\beta} \quad \epsilon: \text{aplatissement}$$

Transport du moment cinétique

- Étoiles sous-géantes : observations sismiques → augmentation de la vitesse de rotation du cœur mais moins importante que ce qu'on attend s'il y a conservation locale du moment cinétique.
- Géantes rouges : ralentissement du cœur avec l'évolution en même temps que le cœur se contracte !



Des mécanismes très efficaces sont requis pour extraire le moment cinétique du cœur des étoiles évoluées.

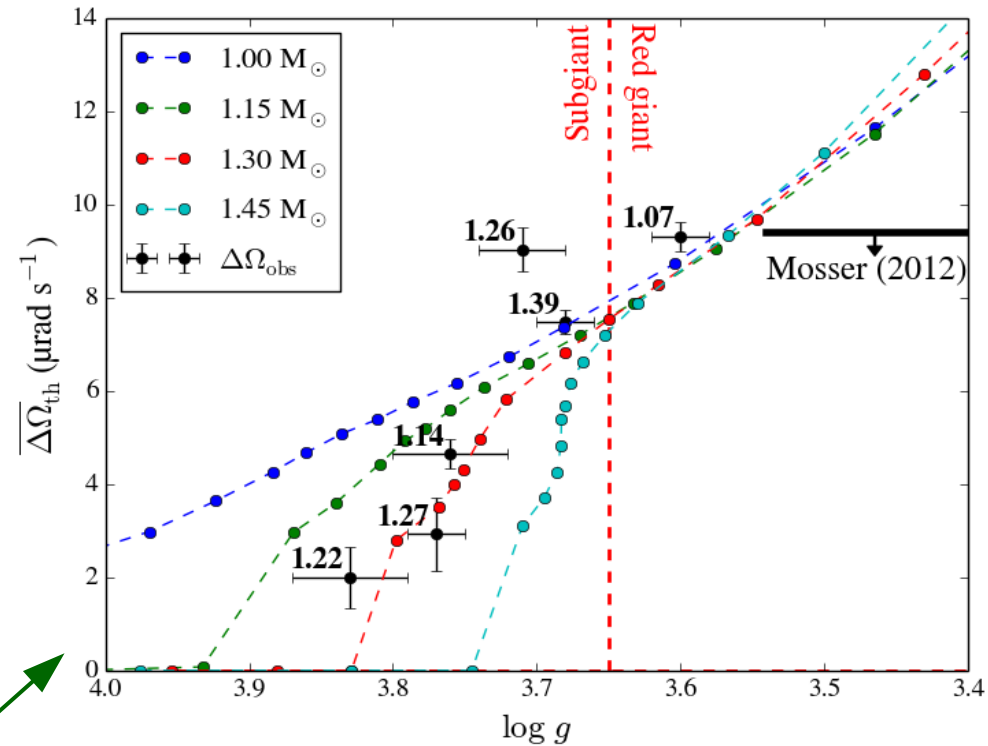


Mosser+12, Deheuvels+14,
Ouazzani+17, Christophe+18 (sub.)

Transport du moment cinétique

Quels sont les mécanismes candidats à l'œuvre ?

- Circulation méridienne et instabilités de cisaillements (Eggenberger+12, Marques+13, Cellier+13, Ouazzani+18) : **Inefficace**
- Champ magnétique
 - Taylor-Spruit dynamo (Cantiello+14) : **Inefficace**
 - Azimuthal Magneto-rotational instabilities (AMRI) of a toroidal magnetic field (Rudiger+15, Spada+16) : **potentiellement efficace pour les sub-RG et early RG**
- **Ondes internes de gravité**
 - **Inefficace pour les RG** (Fuller+14, Pincon+17)
 - **Efficace pour les sub-RG** (Pincon+17)
- **Modes mixtes** (Belkacem+15a,b)
 - **Efficace pour les RG**
 - **Inefficace pour les sub-RG**



Pincon+17

Voir aussi présentations de S. Deheuvels, R. Ouazzani, S. Christophe, L. Amard

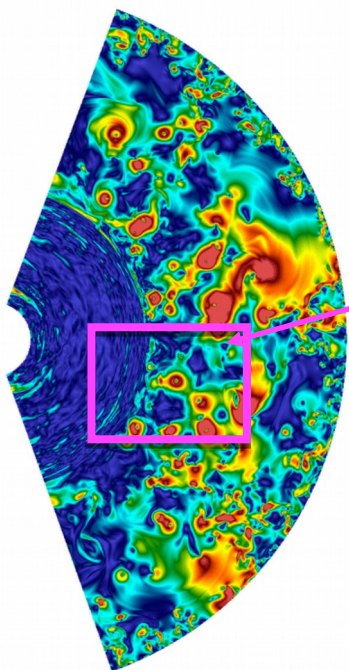
Convection

Développement du code **MUSIC** (Multi-dimensional Stellar Implicit Code ; Viallet +11, 16; J. Pratt+16, 17; Goffrey+17)

- Code hydrodynamique **compressible** et **implicite en temps**
- Géométrie sphérique/cartésienne
- Rotation (forces Coriolis + centrifuge)
- Equation d'état et opacités réalistes + interface avec codes 1D (génération des modèles initiaux)

→ Vers une nouvelle génération de modèles stellaires multi-dimensionnels

Application récente: Etude de la pénétration convective (overshooting) dans les enveloppes stellaires via des simulations 2D/3D.

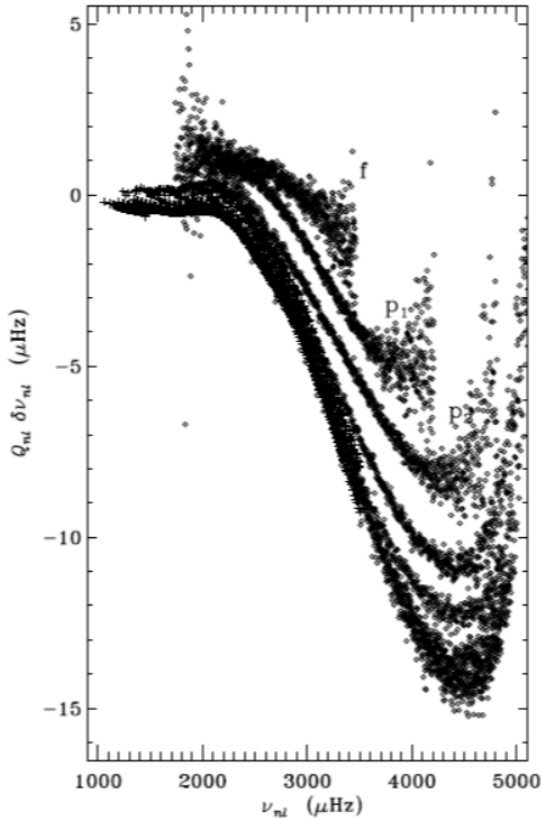


- **J. Pratt et al. 2017:** Description du **mélange chimique** par un **coefficient de diffusion** via une approche statistique décrivant les **“plumes”** pénétratives à la base de l'enveloppe convective.
- **Baraffe et al 2017:** Implémentation dans un code 1D et application au problème de déplétion du lithium dans le Soleil et les étoiles de type solaire

Convection

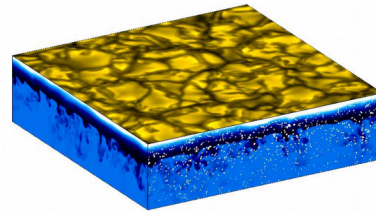
Impacts sur les modes : “*surface effects*”

Obs.-Model frequency

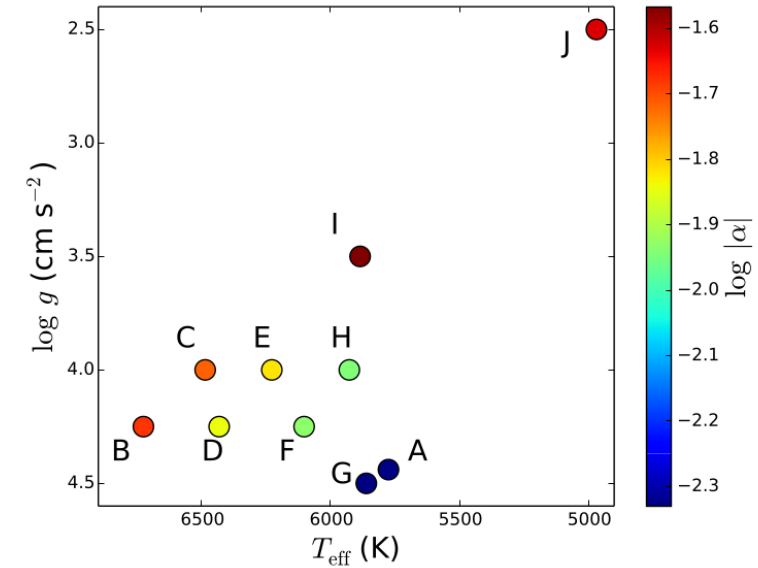


Mode frequency
Rosenthal et al (1999)

→ Nécessite un “bon” modèle de **couplage** entre la **pression turbulente** et les oscillations (Sonoï+17)



CIFIST grille de modèles hdyro 3D ; code CO5BOLD (Caffau et al, GEPI)



→ effets de surface **augmentent** avec **Teff** et **diminuent** avec **log g** (Sonoï+15)

Formulation Lorentzienne modifiée

$$\frac{\delta\nu}{\nu_{\max}} = \alpha \left[1 - \frac{1}{1 + (\nu/\nu_{\max})^\beta} \right]$$

Relations d’échelle pour les paramètres α et β → prédiction à confronter aux observations sismiques (e.g. Silva-Aguirre+17 ; Reese+16)

Soutien PNPS: Reese et al (2016-2018), Belkacem et al (2015) ; ANR IDEE: F. Baudin et al

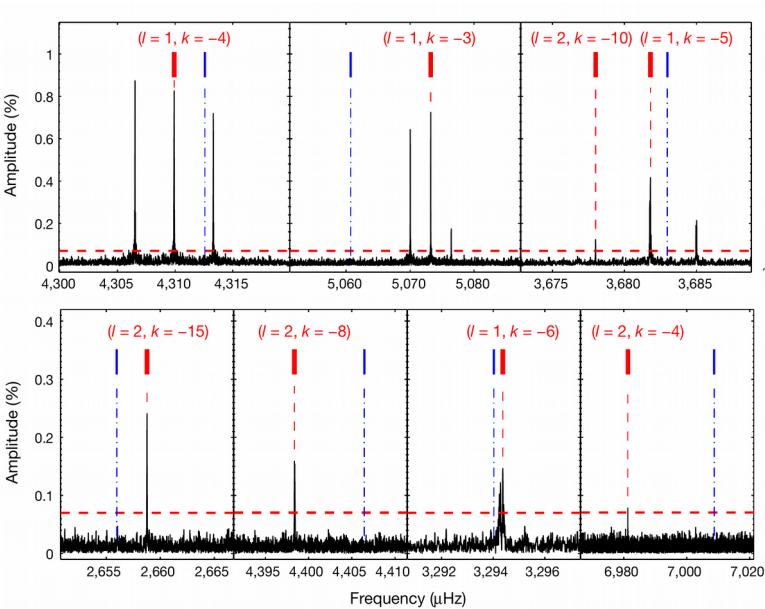
Macrophysique : éléments de prospective

- Objectif : améliorer les traitements phénoménologiques /approchés de processus complexes utilisés dans les codes 1D d'évolution stellaire (convection, mélange, rotation, transport de moment angulaire, etc...)
- Mélange et transport de moment cinétique à la base d'enveloppes convectives.
- Overshooting dans les coeurs convectifs (impact important sur la taille du coeur convectif, âge des étoiles et sur les phases avancées).
- Effets de la rotation sur la convection et sur le processus de pénétration convective.
- Inclusion du champ de magnétique dans les modèles 1D. Impact de B sur la convection et pénétration, etc...
- Développement de modèles *hybrides* (1D ↔ 3D)

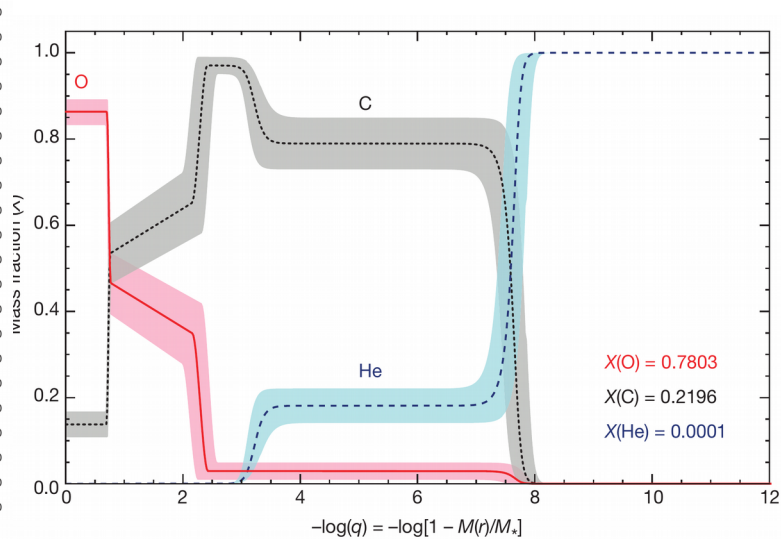
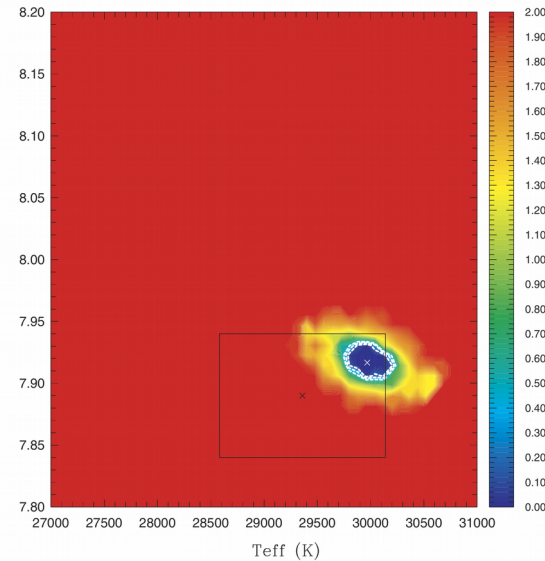
Contraintes observationnelles

Pulsation dans les objets compacts

Cartographie de la stratification chimique d'une naine blanche pulsante
(Giammichele+18, *Nature*, 554, 73)



Fit optimal (en rouge) des fréquences
détectées avec le satellite KEPLER



Stratification obtenue pour C, O et He

Coeur 40 % plus massif et 15 % plus riche en oxygène comparativement aux prédictions des modèles évolutifs « standards »

Soutiens récurrents du PNPS

Projet « INSIDE » financé par l'ANR (2018–2022), PI: S. Charpinet

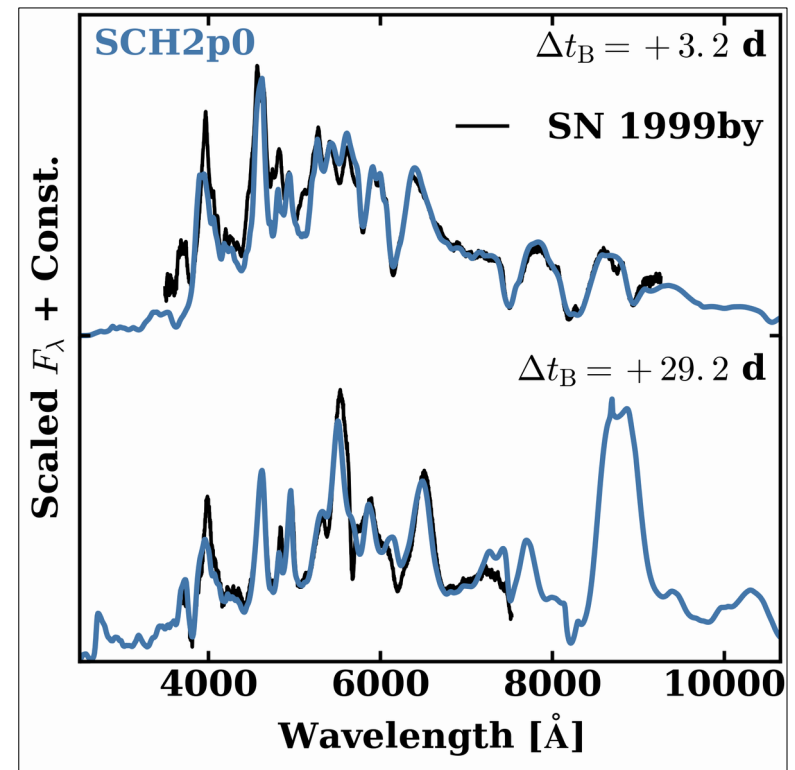
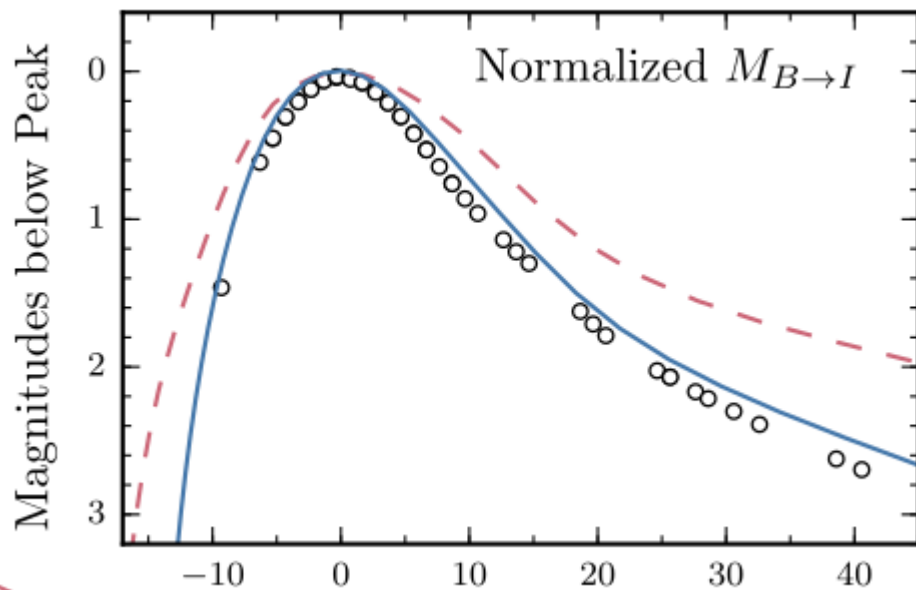
Modélisation des Supernovae

Supernovae thermonucléaires (SN Ia)

Stéphane Blondin, Luc Dessart

Nécessité d'invoquer des **explosions de Naines Blanches sous la masse de Chandrasekhar** pour les SN Ia de faible luminosité: modélisation hors-ETL des spectres et courbe de lumière de SN 1999by (Blondin+17 ; Blondin+18)

Code de transfert radiatif CMFGEN (Hillier & Dessart 2012): temps dépendent + NTLE.



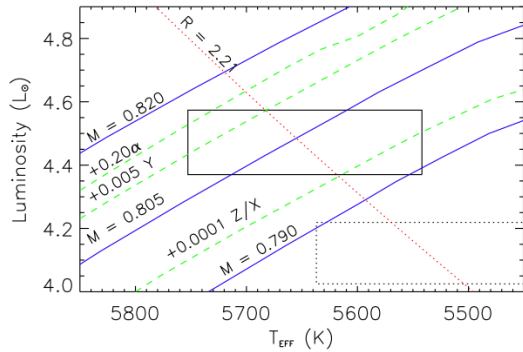
Soutien PNPS: Dessart et al (2015), Blondin et al (2016-2018)

ANR RTCCSN (2011-2016) Blondin, Dessart

Contraintes observationnelles

Problème pour reproduire la boîte d'erreur de l'étoile déficiente en métaux HD 140283 ([M/H]=-1.7), Creevey+15

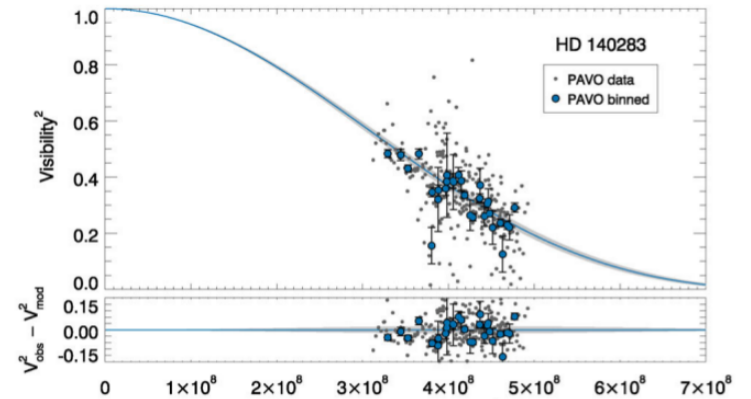
→ **Paramètre de la longueur de mélange (α)** anormalement faible (~ 1)



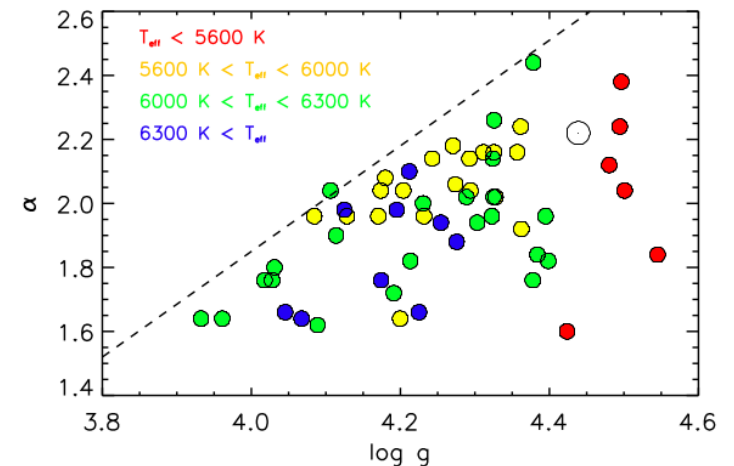
Interférométrie d'étoiles pauvres en métaux :
Orlagh Creevey, Frédéric Thévenin,
Lionel Bigot, Denis Mourard and VEGA co.

Diamètre interférométrique améliore partiellement le problème: α augmente et l'accord est meilleur avec les résultats des modèles hdyro. 3D (Magic+15)

Mesures sismiques avec Kepler: dépendance de α avec T_{eff} et $\log g$ (Creevey+17) ; accord qualitatif avec modèles hydro 3D (Magic+15)



Karovicova+17



Creevey+17

Soutien PNPS: Thévenin et al (2016-2017) ; Creevey et al (2017-2018)

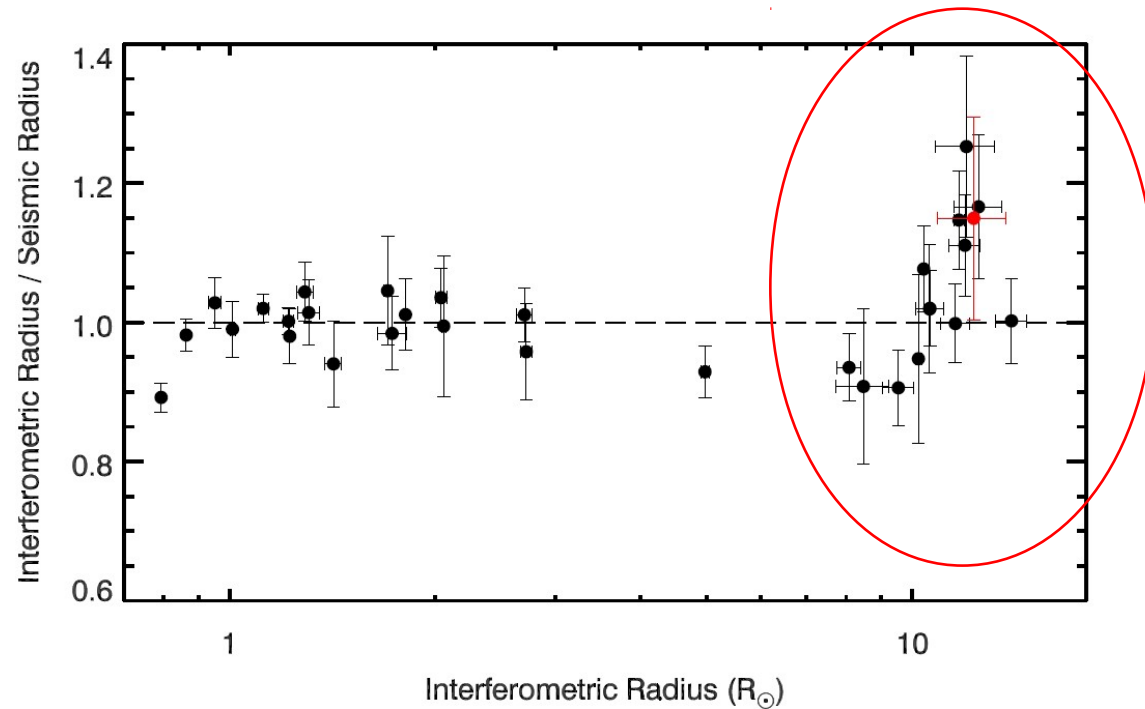
Contraintes observationnelles

Relations d'échelle sismiques

$$\frac{M}{M_{\odot}} \simeq \left(\frac{v_{max}}{v_{max,\odot}} \right)^3 \left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}} \right)^{-4} \left(\frac{T_{eff}}{T_{eff,\odot}} \right)^{3/2}$$

$$\frac{R}{R_{\odot}} \simeq \left(\frac{v_{max}}{v_{max,\odot}} \right) \left(\frac{\Delta v}{\Delta v_{\odot}} \right)^{-2} \left(\frac{T_{eff}}{T_{eff,\odot}} \right)^{1/2}$$

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



(White, Creevey et al, in prep.)

Astérosismologie d'ensemble (e.g. Belkacem et al 2013):

→ masse, rayon, gravité de surface pour plusieurs milliers de géantes rouges.

Les relations d'échelle sismiques sont massivement utilisées (e.g. Archéologie Galactique)

Nécessité de quantifier les erreurs systématiques : Biais possibles dans le cas des géantes rouges ?

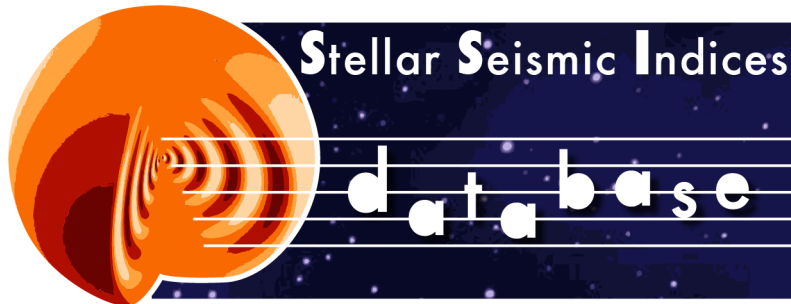
Soutien PNPS: Creevey et al (2017-2018)



Contraintes observationnelles

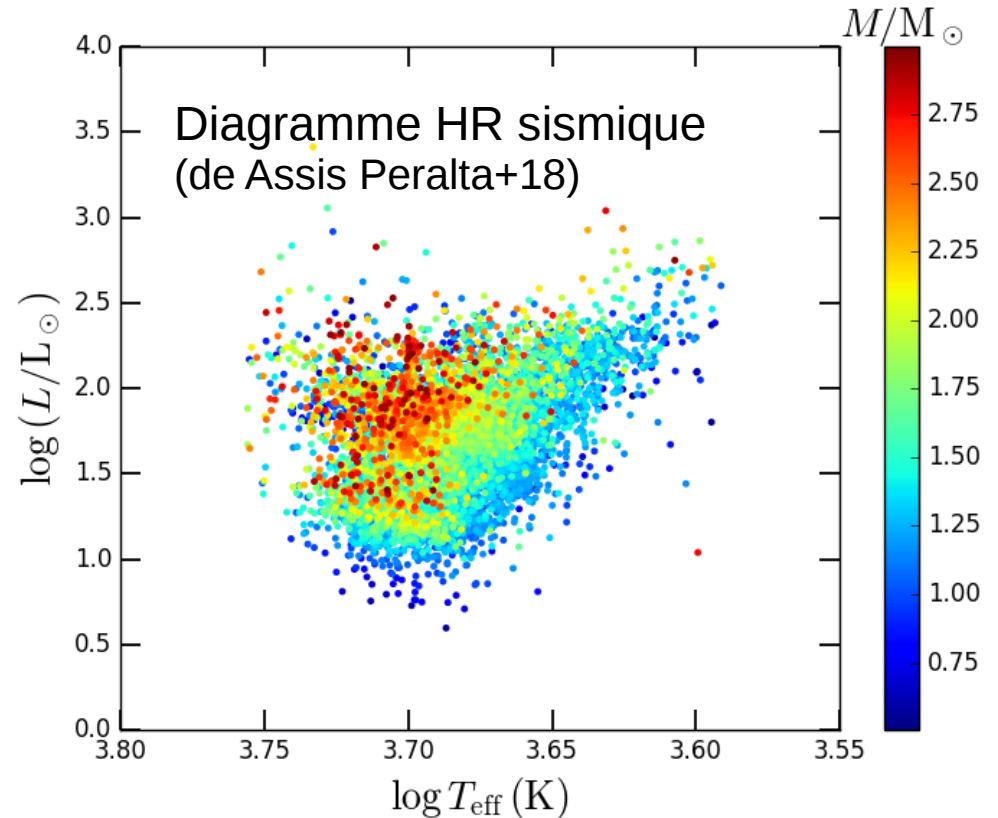


SSI: The Stellar Seismic Indices database



<http://ssi.lesia.obspm.fr/>

- Paramètres sismiques et de granulation extraits à partir d'une méthode automatique (MLE-UP method, de Assis Peralta+18)
- Indices sismiques pour **18,000 RG** (4,500 CoRoT et 13,000 Kepler)



Combiné avec T_{eff} (Mathur et al 2016) → masses et rayons pour 13,000 RG Kepler !



Projet **SPACEInn**
Soutien PNPS: Reese et (2016-2018), Belkacem et al (2015)

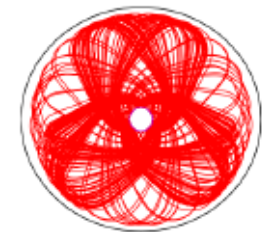
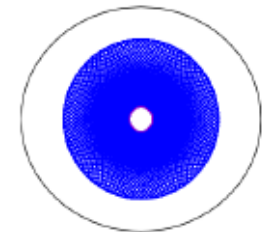
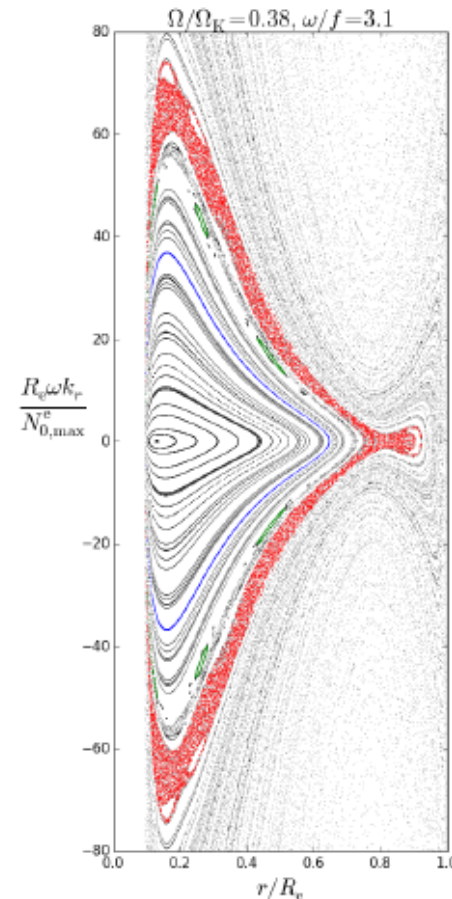
Application avec GAIA (T_{eff} & parallaxe), voir présentation C. Reylé

Sismologie des étoiles en rotation rapide

- Progrès importants en **sismologie des étoiles de masse intermédiaire en rotation rapide** : détection et interprétation d'écartis réguliers en **fréquence** dans les δ Scuti et en **période** dans les γ Doradus (**voir les exposés de D. Reese, R. Ouazzani, S. Christophe**)
- Poursuite et développement de codes numériques: **ACOR, TOP**

- **Théorie asymptotique des modes gravito-inertiels**
- ✗ **Théorie des rayons et dynamique Hamiltonienne** (*Prat, V. et al. 2016*)
- ✗ **Construction des modes d'oscillations et formules d'écartis réguliers en période** (*Prat, V. et al. 2017*)
- ✗ **Effets de la rotation différentielle** (*Prat V. et al. 2018*)

Projet international SoFAR, ISSI (2017),
Ballot et al.



Contraintes observationnelles et outils de diagnostic : éléments de prospective

Théories des pulsations, poursuite développements théoriques (code d'oscillations non-adiabatiques, théorie asymptotique) → essentiels pour l'exploitation des pulsations des rotateurs rapides.

Contraintes sur les processus de transport du moment cinétique : en particulier rotation interne des γ Doradus et des δ Scuti.

Contraintes sur la microphysique : taux des réactions nucléaires (ex. $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$), diffusion atomique, opacités

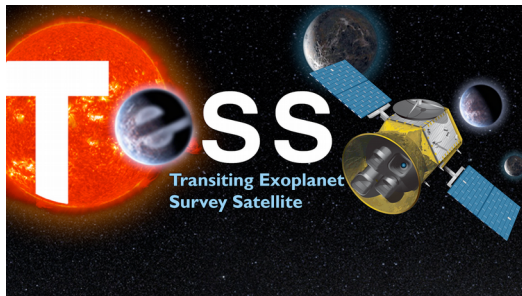
Exploitation (analyse+interprétation) des données disponibles: CoRoT, Kepler, K2, GAIA (DR2), grands relevés spectroscopiques (APOGEE, GES), interférométrie



Contraintes observationnelles et outils de diagnostic : éléments de prospective

Préparation aux futures missions : **TESS, PLATO**

- Développement d'outils de diagnostic (e.g. AIMS : Reese+16, SPInS : Reese, Lebreton et al in prep.)
- Evolution système planète-étoile, influence planète → étoile (et vice versa)
- Voir présentations : M.J. Goupil, S. Mathis



Avril 2018 !



~ 2026