



**Colloque de prospective du Programme
National de Physique Stellaire (PNPS)**
Besançon, 24 au 27 février 2014

Structure interne et évolution stellaires

Faits marquants, grandes questions, évolutions thématiques,
pistes de prospective

Etoiles de masses faibles et intermédiaires (CC)
Etoiles massives (L.Dessart)

C.Charbonnel, E.Michel, L.Dessart

*Contributions de G.Alecian, I.Baraffe, J.Bouvier, G.Chabrier, A.Palacios
S.Mathis, C.Neiner, M.Rieutord, F.Thévenin*

Panorama mondial des codes d'évolution stellaire (1D)

(A.Palacios)

					STAR/STARS
	ATON				
	CESAM / CESTAM / YCESAM / CESAM2k			ASTEC	
	TGEC	TWIN	Yale Rotation Evolution Code		STERN
	Code de Montpellier-Montréal			EVOL	BINSTAR
	STAREVOL	LPCODE	STAROX	FRANEC	
	Lyon Evolutionary Code			GENeva stellar Evolution Code	MESA
	Darthmouth Stellar Evolution Code			MONSTAR	KEPLER
	GARching Stellar Evolution Code				
	PARSEC		Code Liègeois d'Evolution Stellaire		

Panorama mondial des codes d'évolution stellaire (1D)

Domaines du DHR

(A.Palacios)

Modélisation du Soleil sismique

CESAM TGEC Montpellier-Montréal STAROX YREC ASTEC CLES GENEC



Modélisation des étoiles A

TGEC Montpellier-Montréal



Modélisation des étoiles massives

STAREVOL GENEC FRANEC PARSEC YREC STERN MESA KEPLER



Modélisation des géantes rouges (RGB/AGB)

STAREVOL FRANEC PARSEC YREC STERN MESA STARS EVOL



GARSTEC DSTC MONSTAR LPCODE



Panorama mondial des codes d'évolution stellaire

Domaines du DHR

(A.Palacios)

Modélisation étoiles PMS

CESTAM STAREVOL Lyon Evolutionary Code DSTC Palla & Stahler code



Modélisation des naines M,L,T,Y

Lyon Evolutionary Code



Modélisation d'étoiles binaires

TWIN



STERN



BINSTAR (STAREVOL)



Etoiles de faible masse et naines brunes

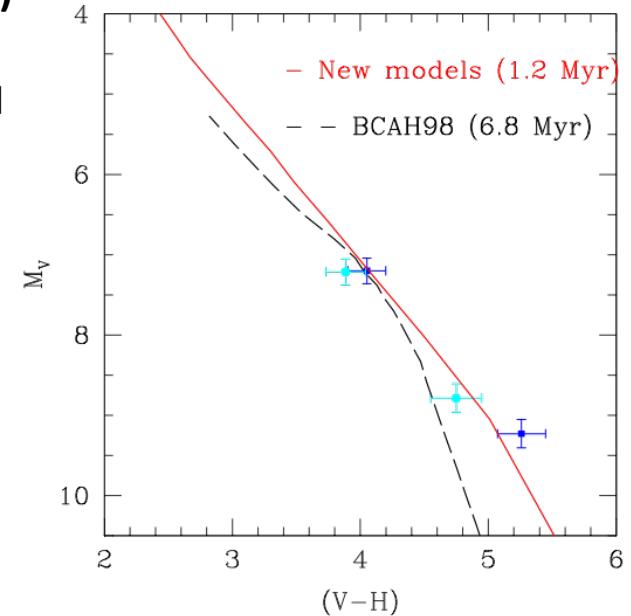
input physics, highlights, **questions, prospective**

I. Baraffe (CRAL/Exeter), G. Chabrier, F. Allard, D.Homeier (CRAL)

- Développement de nouvelle génération de modèles de naines-M
(Baraffe, Homeier, Allard, Chabrier, 2014, in prep.)
 - Couplage cohérent entre structures interne et atmosphérique
 - Nouvelles listes de raies moléculaires (Exomol)
 - Succès de ces nouveaux modèles confrontés aux observations comparés aux anciens modèles (Baraffe et al. 1998)

- Développement futurs:
 - Nouvelle EOS H/HE (experience lasers haute puissance LIL; collaboration avec le LUTH)
 - Extension aux naines brunes
 - Extension aux exoplanètes isolées/irradiées
 - Effet du champ magnétique sur la structure (binaires à éclipse)
 - Simulations 3D (Baraffe, Browning, Chabrier)

Lyon Evolutionary Code



Système PMS quadruple LkCa
(Torres et al. 2013)

AO PNPS

Naines brunes et étoiles de faible masse: atmosphères et évolution (2011 – 2012)

→ Modélisation des atmosphères stellaires et planétaires (2013 – 2014)

(PI F.Allard; N.Allard, Baraffe, Chabrier; Freytag, Kielkopf, Homeier, Piegelman, Steffen)
Lyon – GEPI – Toulouse – Goettingen – Exeter – Potsdam – Louisville

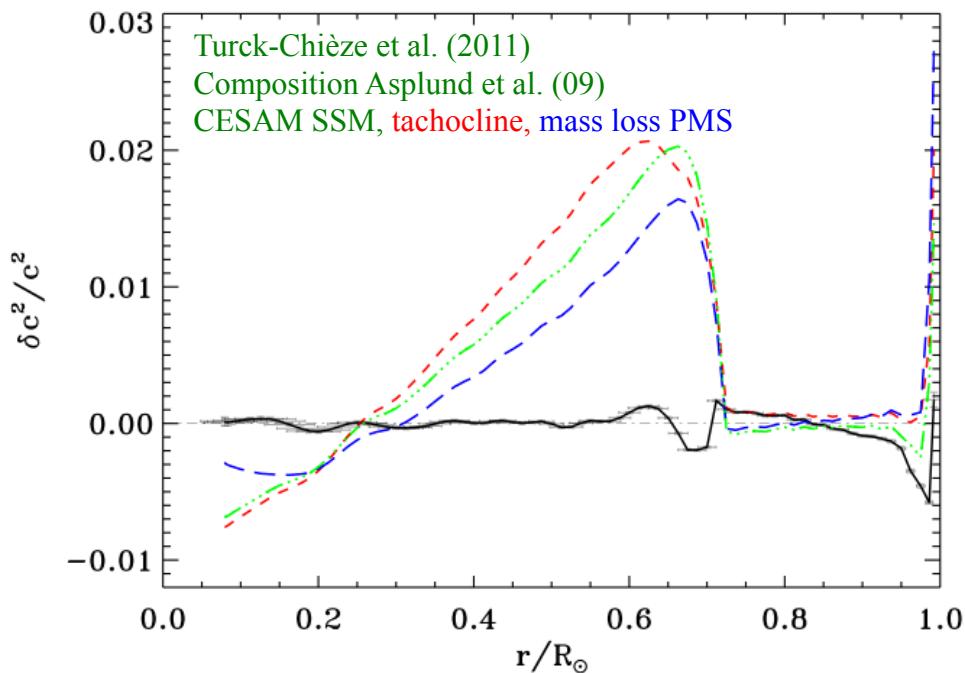


Soleil – input physics, highlights, **questions, prospective**

CESAM



Ingrédients physiques essentiels:
Equation d'état, opacités, composition chimique
Diffusion atomique, processus macroscopiques



Composition chimique (spectro, modèles atmosphère 3D, NLTE)
Opacités, confrontation aux mesures faites avec les grands lasers
Micro/macro-physique (diffusion, mélange)
Evolution du jeune soleil (activité, masse initiale, perte de masse, rotation, ...)

AO PNPS

Magnétisme, enveloppes stellaires et opacités (2012 – 2014)

(PI Turck-Chieze; Ducret, Gilles, Le Pennec, Simonello, Thais, Zeippen, Delahaye; *Loisel, Guzik*)
CEA – Meudon – Toulouse – Albuquerque

Blanc - SIMI 5 - Physique subatomique et théories associées, astrophysique, astronomie et planétologie
(Blanc SIMI 5) 2012 : projet **OPACITY** PI S.Turck-Chieze

ANR

Opacités, diffusion, transport

input physics, highlights, **questions, prospective**

Implémentation des accélérations radiatives dans le code TGEC
(Alecian, Vauclair, Théado).

Obtention de nouvelles données atomiques (Massacrier, Delahaye).

Problématique physique

10% de changement des **opacités** peuvent créer des modifications majeures dans les modèles de structure interne. Or, dans une zone en équilibre radiatif les **abondances** des principaux contributeurs à l'opacité peuvent varier facilement d'un **facteur 2 ou plus** en moins d'un million d'années en raison des processus de transport! Cela introduit une **incertitude qui ruine** les efforts pour l'obtention d'opacités précises.

Modélisation

Il est indispensable de modéliser la **diffusion des éléments** (avec **accélérations radiatives**) en compétition avec les processus de **mélange** (convection, convection thermohaline, circulation rotation).

→ Exposé M.Deal

AO PNPS

Impact de la diffusion des éléments et des opacités amendées sur l'évolution des étoiles

→ Processus atomiques dans les étoiles, vers un renouveau du modèle standard (2009 – 2014)

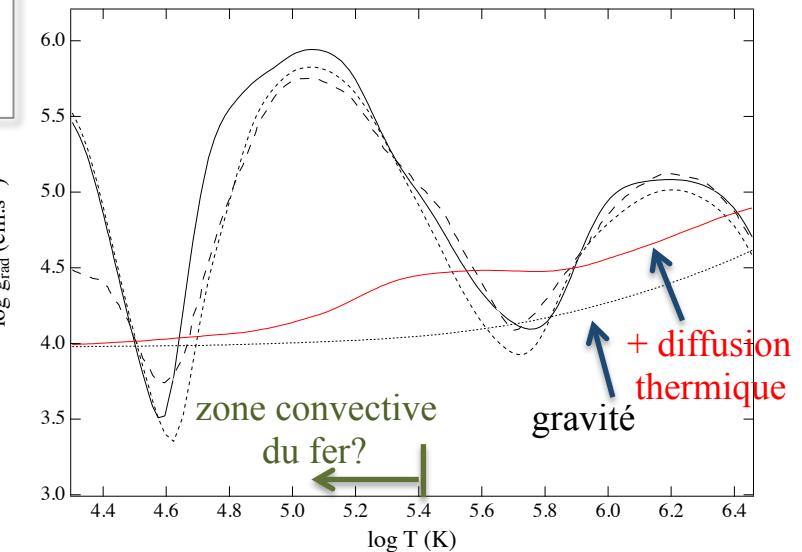
(PI G.Alecian; Delahaye, Dolez, Escobar, Huo Bon Hoa, Massacrier, Richard, Théado, Vauclair, Vauclair, Zeipen; Althaus, Corsico, Leblanc, Michaud, Pinsonneau, Shibahashi, Stift, Wachlin)

Paris - Toulouse - Lyon - Montpellier - Vienne - Turin - Montréal - Moncton - Liban - Ohio - Texas - La Plata

TGEC Montpellier-Montréal



(G.Alecian)



Diffusion du Sc modélisée grâce à de nouvelles données atomiques.
Etoile AmFm $1.9 M_{\odot}$ (Alecian, LeBlanc, Massacrier 2013).

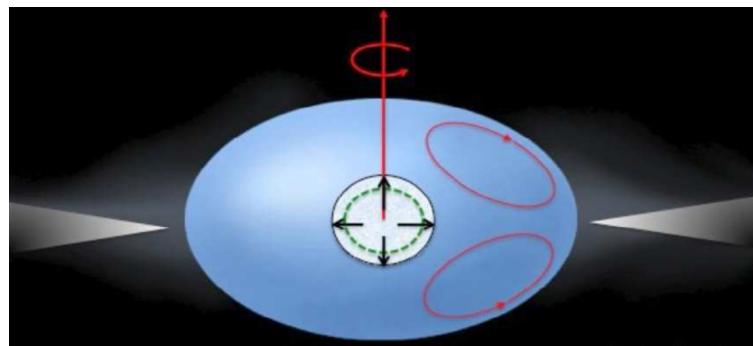
Données atomiques et opacités
Diffusion atomique, accélérations radiatives
Compétition entre processus de mélange

Séquence principale – input physics, highlights, **questions**, prospective

Première mesure de la taille et de la masse du cœur convectif de quelques étoiles

Be avec CoRoT

→ le cœur des étoiles Be est 25 % plus lourd et 20 % plus grand que celui d'une étoile B statique (*Neiner, Mathis et al. 2012*)



(C.Neiner)

Etudier la taille des cœurs convectifs
en fonction de divers paramètres (rotation, magnétisme..)
→ analyse et modélisation sismique avec BRITE, Kepler2
puis Plato
→ Impact sur la détermination des âges, GAIA

AO PNPS

MagMaS – Magnétisme et étoiles massives (2013 – 2014)

(PI C.Neiner; Blazere, Degroote, Goupil, Kervella, Leroy, Mathis, Monier, Oksala, Pertenaïs, Benisty, Böhm, Briquet, Bouret, Chesneau, Delfosse, Fabregat, Forveille, + 30 personnes)
Meudon – Toulouse – Grenoble – Marseille – Nice – CEA – Montpellier - Liège – Valencia – ESO – Sao Paulo – Uppsala – RMC- Leuwen – Montréal – Exeter – Westchester)

Séquence principale – input physics, highlights, questions, prospective

Modélisation de HD 52265, cible de CoRoT comment la sismologie permet d'affiner la détermination des âges

CESAM


→ Exposé K.Belkacem

(Y.Lebreton)

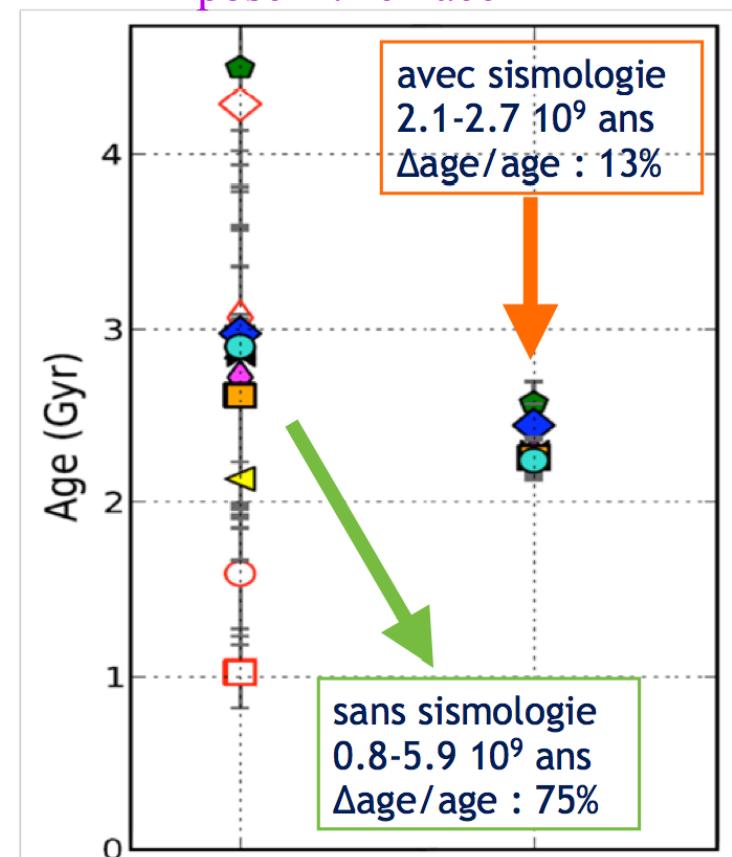
Optimisation du modèle de HD 52265 sur la base de divers jeux de contraintes observationnelles
--> Teff, L, [Fe/H] +/- sismologie

Evaluation des incertitudes dues aux paramètres des modèles
--> physique
--> composition chimique (Y , Z_i/Z)

Sans sismologie : paramètres libres
--> hélium, convection, overshooting

Avec mesures sismiques :
--> contraintes sur ces paramètres

nécessité de mesurer précisément les fréquences : PLATO !



Lebreton 2013

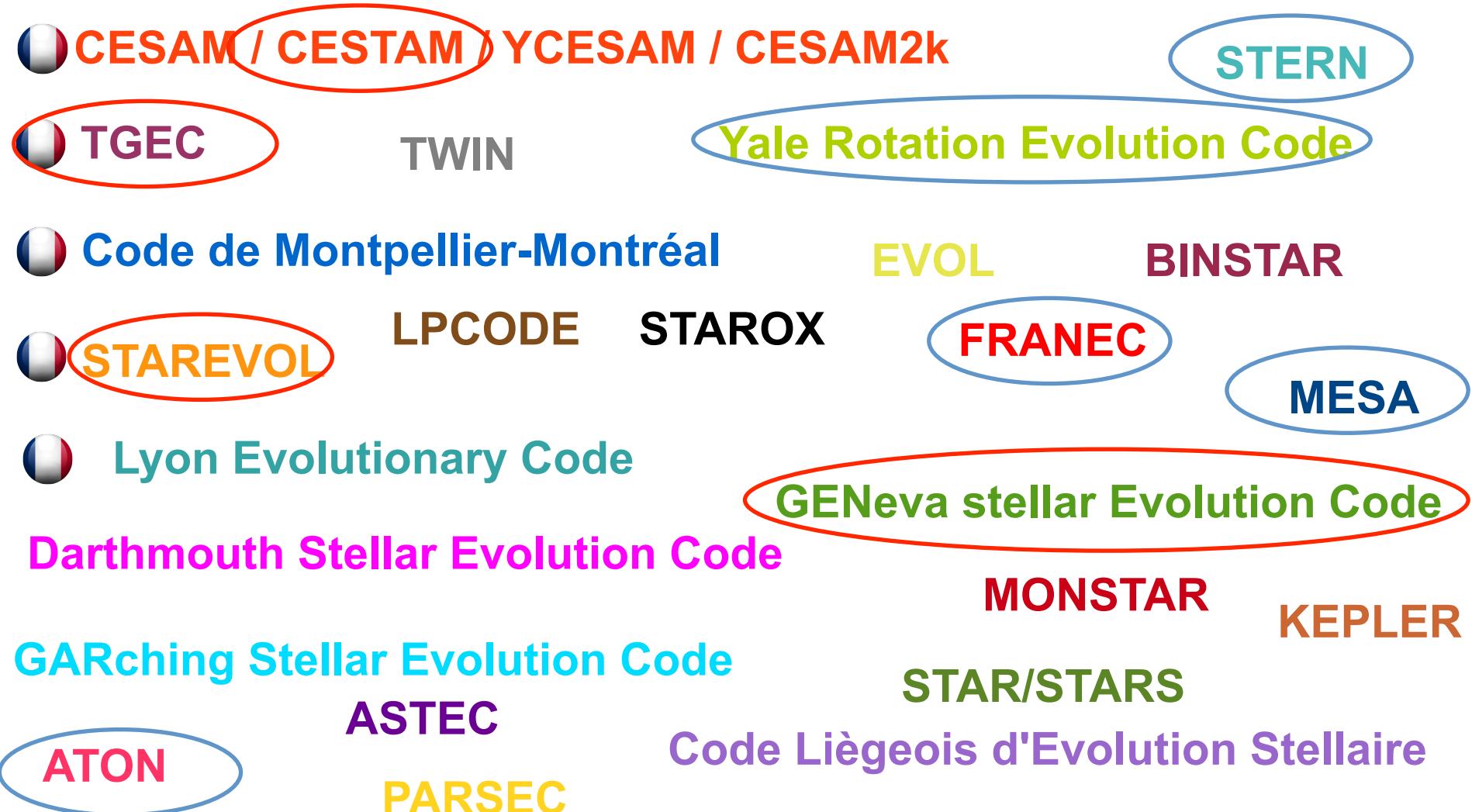
AO PNPS

Masses, rayons, et âges sismiques de la PMS aux géantes rouges (2013 – 2014)
(PI Belkacem; Ballot, Barban, Baudin, Deheuvels, Goupil, Lebreton, Michel, Mosser,
Peralta, Samadi, Vrard; Benomar, Dupret, Ludwig, Marques, Monteiro, Ouazzani)
Meudon – Toulouse – IAS – Heidelberg – Göttingen – Liège – AUP Portugal – Sidney)

Codes d'évolution stellaire incluant la rotation

Formalisme de Endal & Sofia (≥ 1978)

Formalisme de Zahn 1992 et Maeder & Zahn 1998



Soleil – input physics, highlights, questions, prospective

Rotation interne du soleil

CESAM



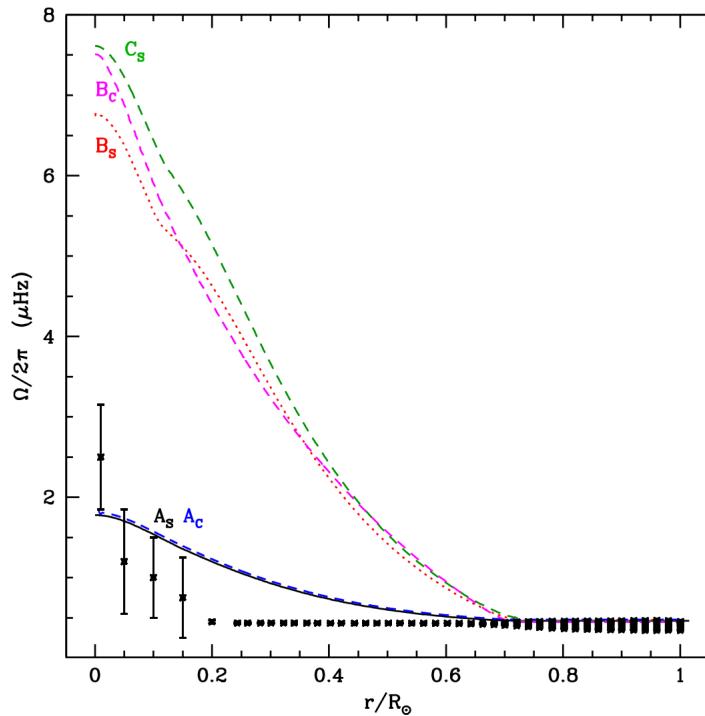
STAREVOL



Ingrédients physiques essentiels:

Mécanismes de transport du moment cinétique
et des espèces chimiques

Transport « à la Zahn & Maeder »



Mécanisme supplémentaire de transport du
moment cinétique

Ondes internes de gravité

Champ magnétique

Histoire rotationnelle du Soleil

Importance des phases évolutives précoce

Turck-Chièze et al. (2010)

Transport « à la Zahn » - Circulation méridienne et turbulence

CESAM et STAREVOL

Characteristics of the Rotating Solar Models Computed With CESAM (A_C , B_C) and STAREVOL (A_S , A'_S , B_S , C_S) Codes

Model	D_h	J_{initial}	v_{ZAMS}	v_{\odot}
A_C	Mathis et al. (2004)	3.27×10^{48}	2.19 km s^{-1}	2.13 km s^{-1}
A_S	Mathis et al. (2004)	4.84×10^{48}	2.15 km s^{-1}	2.05 km s^{-1}
A'_S	Zahn (1992)	4.84×10^{48}	2.15 km s^{-1}	2.03 km s^{-1}
B_C	Mathis et al. (2004)	1.10×10^{49}	19.6 km s^{-1}	2.09 km s^{-1}
B_S	Mathis et al. (2004)	3.88×10^{49}	19.7 km s^{-1}	3.08 km s^{-1}
C_S	Mathis et al. (2004)	8.74×10^{49}	53.2 km s^{-1}	3.03 km s^{-1}

Données GOLF,MDI,SOHO
(acoustic modes $\geq 0.2R_{\odot}$, gravity modes below)

PMS – input physics, highlights, questions, prospective

Blanc - SIMI 5-6 - Environnement, Terre et Espace (Blanc SIMI 5-6)
Edition 2011

TOUPIES

Vers une comprehension de l'evolution rotationnelle des etoiles

TOUPIES: Vers une comprehension de l'evolution rotationnelle des etoiles
L'objectif du projet TOUPIES est de caractériser et de modéliser l'évolution du taux de rotation des étoiles de faible masse depuis leur naissance jusqu'à leur maturité.

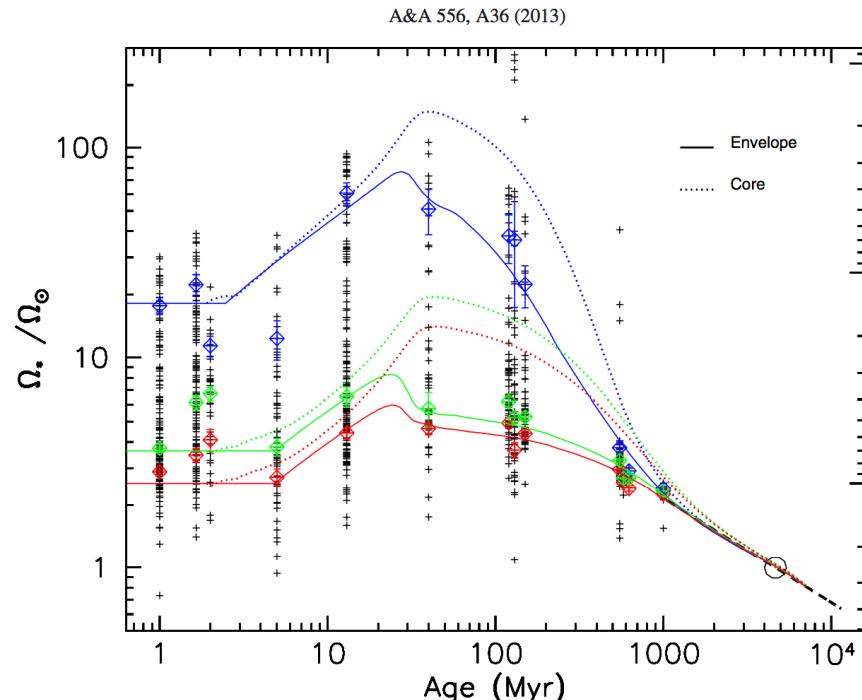


Fig. 3. Angular velocity of the radiative core (dashed lines) and of the convective envelope (solid lines) as a function of time for fast (blue), median (green), and slow (red) rotator models. The angular velocity is scaled to the angular velocity of the present Sun. The blue, red, and green tilted squares and associated error bars represent the 90th percentile, the 25th percentile, and the median, respectively, of the rotational distributions of solar-type stars in star forming regions and young open clusters obtained with the rejection sampling method (see text). The open circle is the angular velocity of the present Sun and the dashed black line illustrates the Skumanich relationship, $\Omega \propto t^{-1/2}$.

Gallet & Bouvier (2013)

PI J.Bouvier

(janv. 2012 – 48 mois)

http://ipag.osug.fr/Anr_Toupies/



→ Session

Formation stellaire et disques protoplanétaires
(eg J.Bouvier)

Conditions initiales et phases précoce
Couplage avec le disque et l'environnement
Accrétion et perte de masse
Activité
Freinage magnétique
Processus de transport interne du moment
cinétique (ondes internes, champ magnétique)

PMS – input physics, highlights, **questions**, prospective

Blanc - SIMI 5-6 - Environnement, Terre et Espace (Blanc SIMI 5-6)
Edition 2011

TOUPIES

Vers une comprehension de l'evolution rotationnelle
des etoiles

TOUPIES: Vers une comprehension de l'evolution rotationnelle des etoiles

L'objectif du projet TOUPIES est de caracteriser et de modeliser l'evolution du taux de rotation
des etoiles de faible masse depuis leur naissance jusqu'a leur maturite.

PI J.Bouvier

(janv. 2012 – 48 mois)

http://ipag.osug.fr/Anr_Toupies/



ERC

PEPS «Exploring the physics of Proto-Stars and Extra-solar planetS »

PI G.Chabrier (Exeter & Lyon)
(2010 → 5 ans)



→ Session

Formation stellaire et disques protoplanétaires

AO PNPS

Formation d'étoiles et stades initiaux de l'évolution (2011)

(PI G.Chabrier; Audit, Baraffe, Commerçon, Jayawardhna, Hennebelle, Mohanty, Teyssier)
Lyon – CEA – Paris – Exeter – Londres – Toronto

Transport de moment cinétique – Seq.principale

input physics, highlights, **questions, prospective**

(S.Mathis)

Ingrédients physiques essentiels:

Mécanismes de transport du moment cinétique et des espèces chimiques

Transport « à la Zahn & Maeder »

Mécanismes supplémentaires de transport du moment cinétique

Ondes internes de gravité

Champ magnétique

Simulations 3D → prescriptions pour 1D

- Interactions ondes internes/rotation/champ magnétique/cisaillement

Mathis & de Brye 2011-12; Alvan, Mathis & Decressin 2013

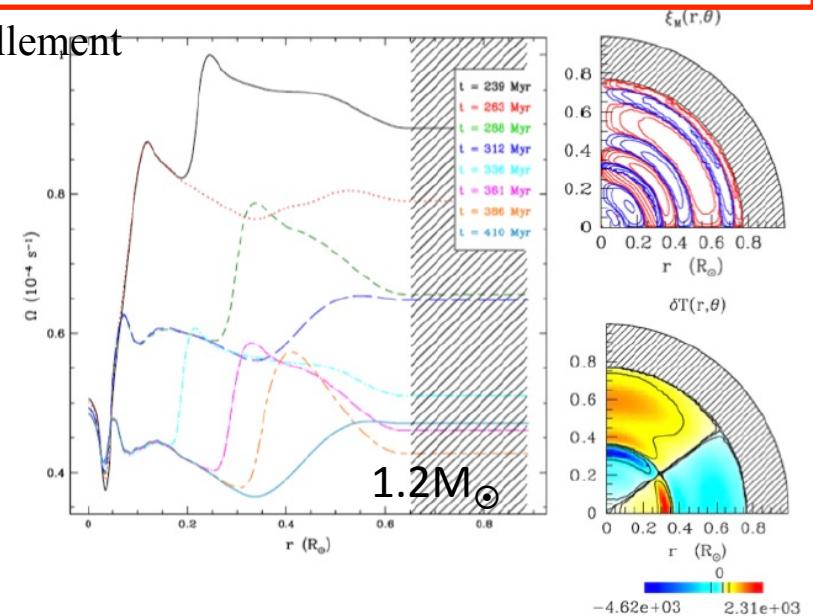
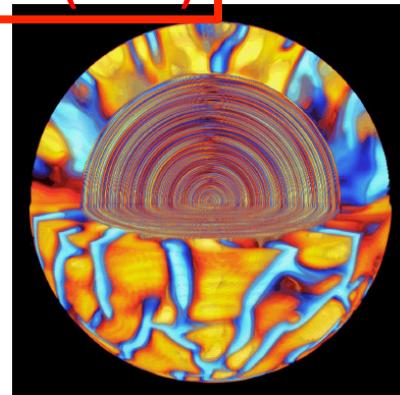
- Interactions ondes/écoulements moyens avec STAREVOL

Mathis, Decressin, Eggenberger, Charbonnel 2013

Modèles 3-D intégrés d'étoiles (CEA)

- Etude des ondes internes

Alvan, Brun & Mathis 2014



AO PNPS

Anomalies d'abondances chimiques, rotation, magnétisme et ondes internes dans les étoiles évoluées
(2008 – 2011) (PI P.De Laverny)

→ Comprendre les étoiles géantes et leur rôle dans l'évolution des galaxies

(2011 – 2013) (PI A.Palacios; Aurière, Charbonnel, Donati, Kordopatis, Lèbre, Mathis, Recio-Blanco, Richard, Worley; Lagarde) Nice – Montpellier – Toulouse – CEA – Genève - Birmingham

Transport de moment cinétique – Sous-géantes, géantes

input physics, highlights, **questions, prospective**

Ingrédients physiques essentiels:

Mécanismes de transport du moment cinétique
et des espèces chimiques

Transport « à la Zahn & Maeder »

Ceillier, Eggenberger, Garcia, Mathis (2013)

KIC 7341231 (Kepler; Deheuvels et al. 2012)

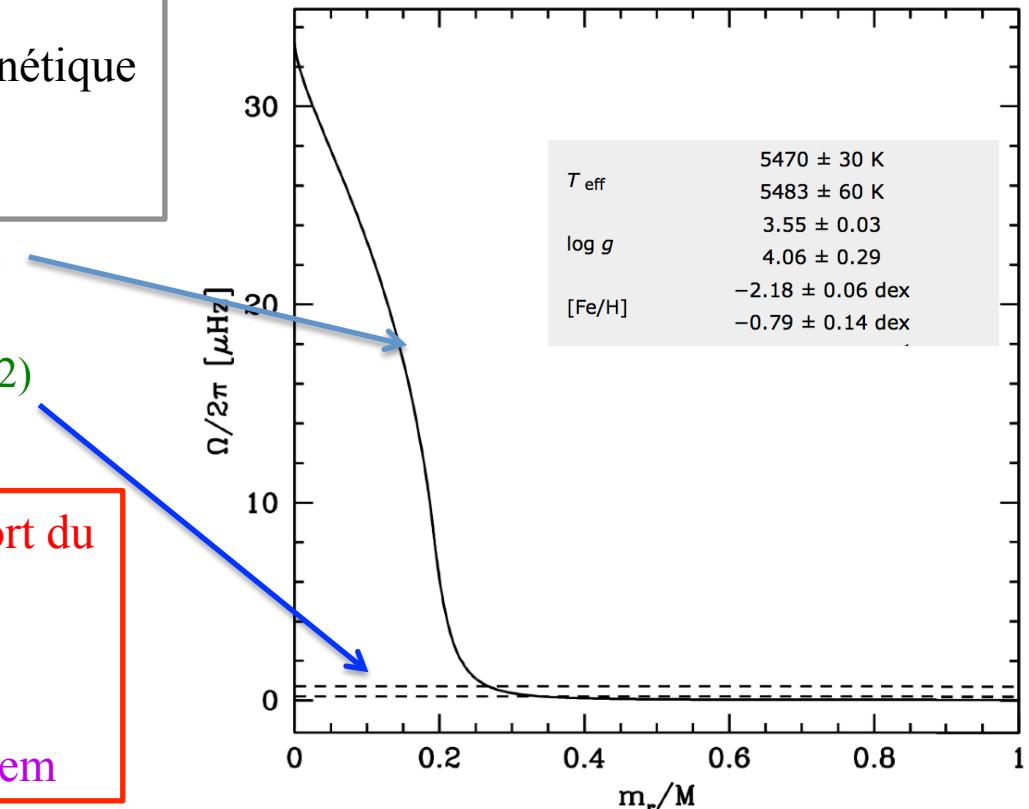
$\sim 0.8M_\odot$, base RGB

Mécanismes supplémentaires de transport du
moment cinétique

Ondes internes de gravité

Champ magnétique

Astérosismologie → Exposé K.Belkacem



AO PNPS

Anomalies d'abondances chimiques, rotation, magnétisme et ondes internes dans les étoiles évoluées
(2008 – 2011) (PI P.De Laverny)

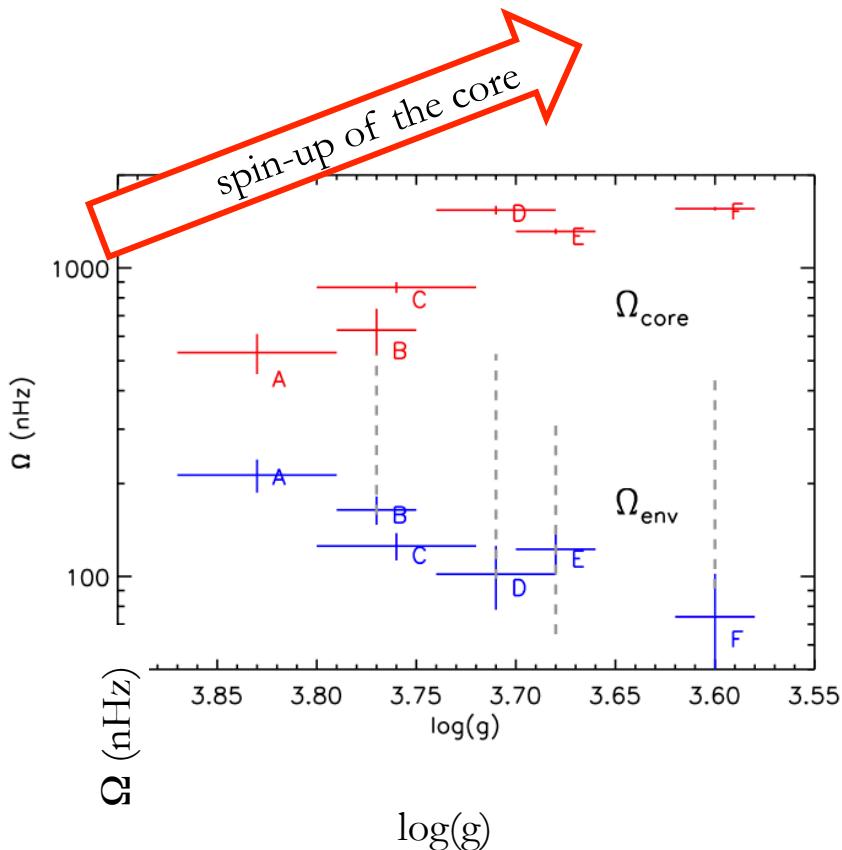
→ Comprendre les étoiles géantes et leur rôle dans l'évolution des galaxies

(2011 – 2013) (PI A.Palacios; Aurière, Charbonnel, Donati, Kordopatis, Lèbre, Mathis, Recio-Blanco, Richard, Worley; Lagarde) Nice – Montpellier – Toulouse – CEA – Genève - Birmingham

Transport de moment cinétique – Sous-géantes, géantes

input physics, highlights, **questions, prospective** (S.Deheuvels)

Recent results: seismic analysis of 6 young red giants (Deheuvels et al. 2014)

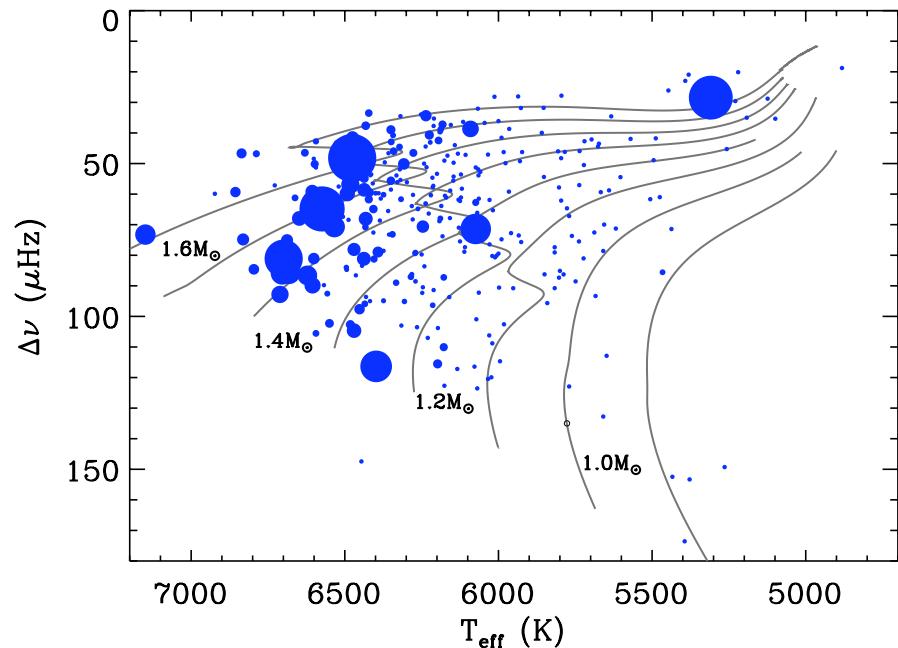


A spin-up of the core in the subgiant phase
⇒ *the AM transport is not yet efficient enough to slow down the core*

Sharp gradients of the rotation rate near the H-burning layer

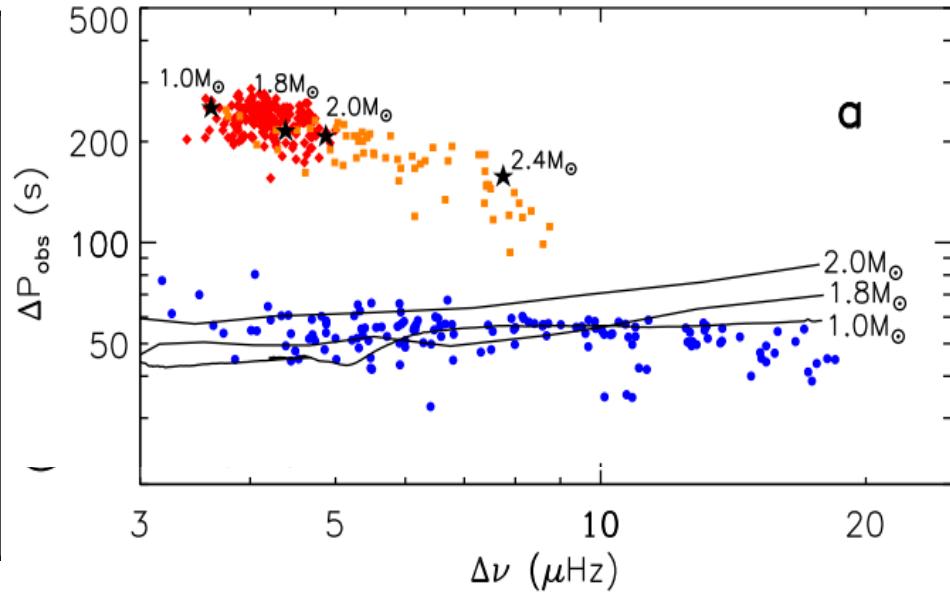
Temps de couplage cœur/enveloppe pour échange moment cinétique
Transport par champ magnétique?

Sous-géantes, géantes - input physics, highlights, **questions**, prospective



Rotation des étoiles de type solaire *Kepler*
Garcia et al. 2014

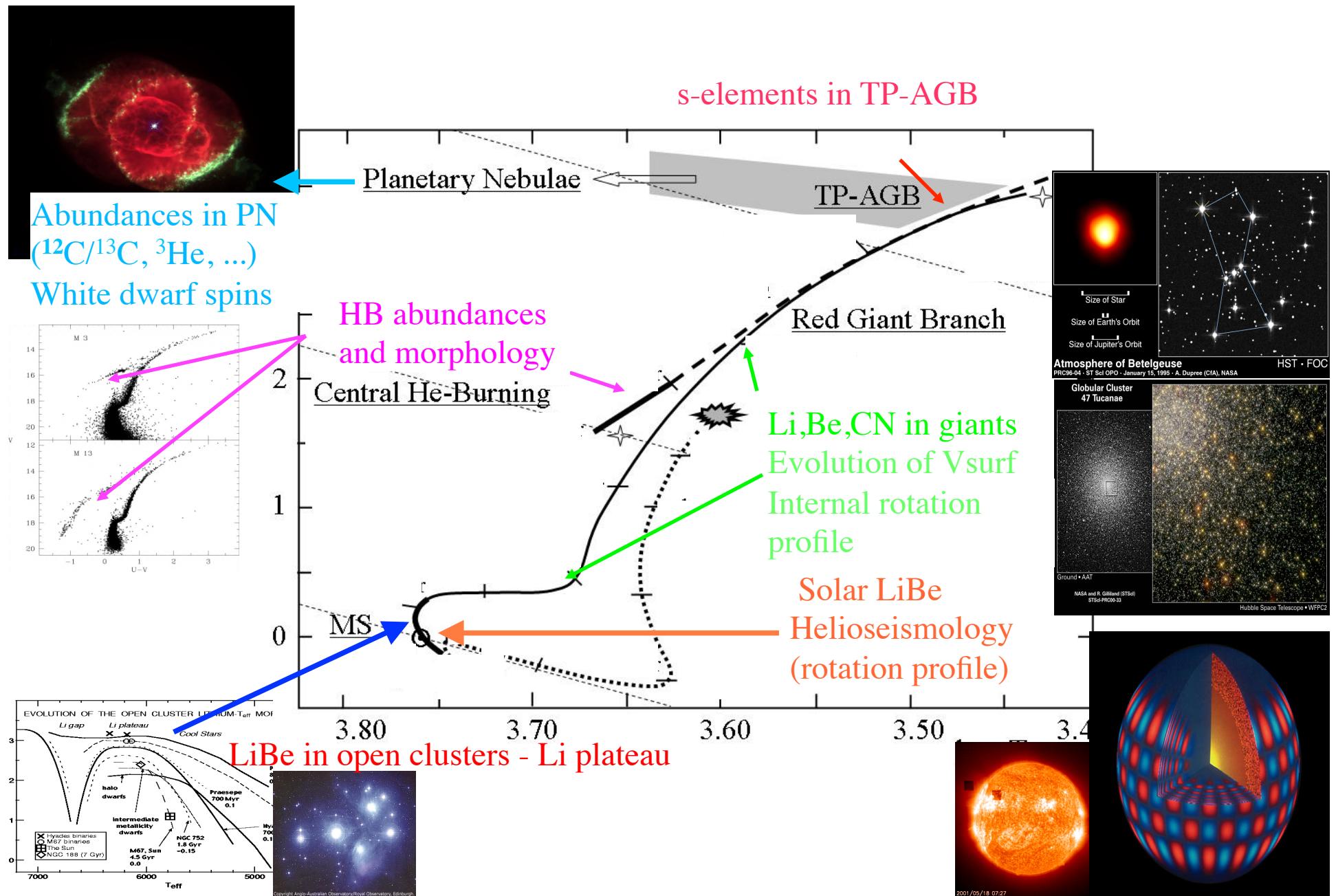
→ Exposé K.Belkacem



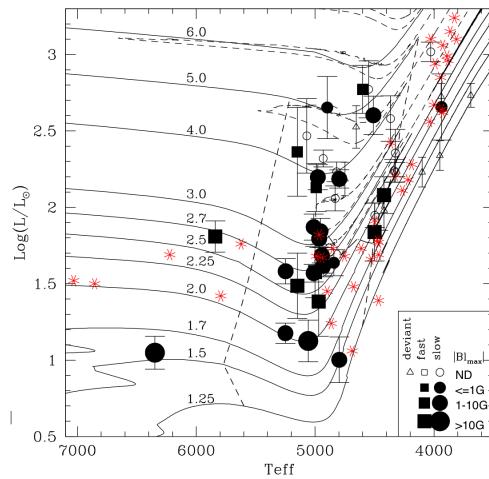
Modes de gravité
→ HBS vs He-burning
Kepler
Bedding, Bosser et al. 2011

Populations stellaires galactiques

De la PMS à la fin de vie – Diagnostics spectroscopiques



De la PMS à la fin de vie – Diagnostics magnétiques



Magnetic field in late-type giants with new generation spectropolarimeters NARVAL and ESPaDOnS

◆ Rotation period and Rossby number

◊ Stellar rotation period P
 ◊ Rossby number $R_o = P / \tau$
 for τ at different depths within the CE
 P and R_o are shown up to the end of
 central helium-burning for
 intermediate-mass stars and up to
 the RGB tip for low-mass stars

Figures show the variations along the evolutionary tracks, and the dependence on stellar mass and metallicity, of these quantities that are key parameters to evaluate the efficiency of magnetic field generation at various phases of stellar evolution.

These models are used to interpret observations of magnetic signatures in evolved stars obtained with Narval@OMP and ESPaDOnS@CFHT
 → See talks by M.Aurière and R. Konstantinova-Antova (this conference)

References :

Charbonnel et al. 2013, in preparation

Charbonnel & Lagarde 2010 A&A 522, 10

Lagarde, Decressin, Charbonnel et al. 2012 A&A 543, A108

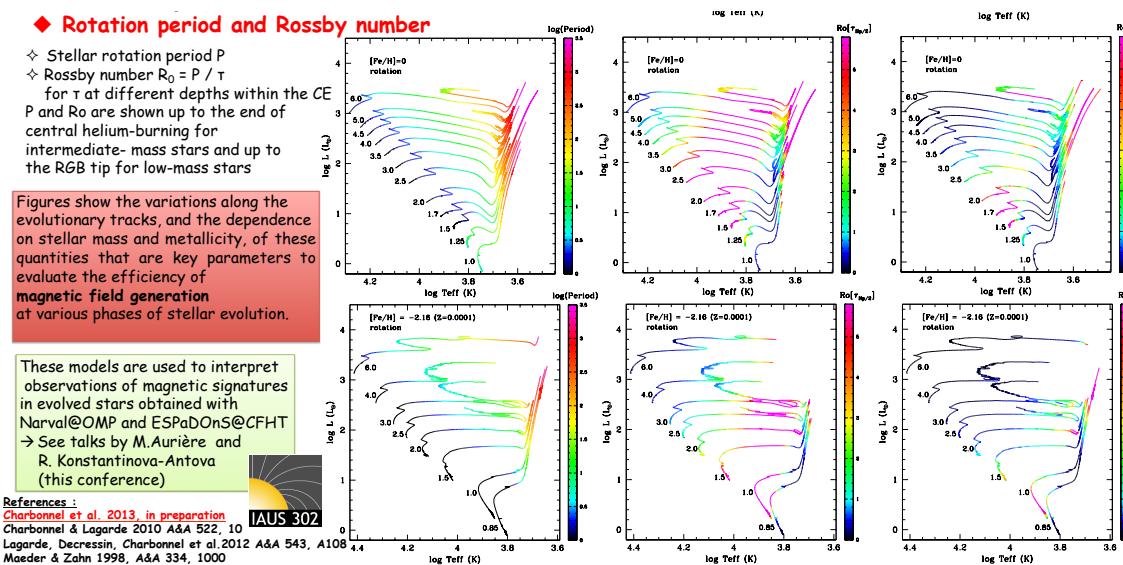
Maeder & Zahn 1998, A&A 334, 1000

Zahn, J.-P. 1992, A&A, 265, 115

→ Exposé M.Aurière

PI - Michel Aurière

Cols - Renada Konstantinova-Antova
 Charbonnel, Donati, Landstreet,
 Lignières, Lèbre, Lliev, Petit, Roudier
 Wade, Weiss, Zahn



Anomalies d'abondances chimiques, rotation, magnétisme et ondes internes dans les étoiles évoluées (2008 – 2011) (PI P.De Laverny)

→ Comprendre les étoiles géantes et leur rôle dans l'évolution des galaxies
 (2011 – 2013) (PI A.Palacios; Aurière, Charbonnel, Donati, Kordopatis, Lèbre, Mathis, Recio-Blanco, Richard, Worley; Lagarde) Nice – Montpellier – Toulouse - Genève

Simulations numériques multidimensionnelles – input physics, highlights, **questions**

2-3D → Prescription pour 1D → Exposé B.Dintrans

The STARS² Project

→ Exposé S.Brun

Simulations of Turbulent, Active and Rotating Suns and Stars

A 60 months European Research Council Starting Grant at CEA-IRFU Saclay and AIM CEA-CNRS-University of Paris7
PI. Allan Sacha Brun

Contact: Dr. (HDR) Allan Sacha Brun

PI of European Project STARS2

DSM/IRFU/SAp & UMR AIM CEA-CNRS-Univ. P7

CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France
sacha.brun-at-cea.fr

- *Lucie Alvan*
- *Nicolas Bessolaz*
- *Sacha Brun*
- *Olivier Do Cao*
- *Laurène Jouve*
- *Jean-Paul Le Fèvre*
- *Sean Matt*

- *Anna Palacios*
- *Rui Pinto*
- *Daniel Pomarède*
- *Antoine Strugarek*
- *Bruno Thooris*
- *Jean-Paul Zahn*



Task B5: Making contact with stellar evolution and mean field stellar dynamo models (PI, PD1 & PD2, Yrs 3,4,5)

Scientists involved: A.S. Brun, S. Matt, O. Do Cao, N. Bessolaz, R. Pinto

ASH will be used to provide new prescriptions for 1-D stellar model computed with the CESAM code, such as rotation law profiles, mixing and turbulent transport coefficients of angular or chemicals, amplitude of the enthalpy and kinetic energy fluxes in order to go beyond Mixing Length theory, etc... The CESAM code will also be used to compute the reference background model used to initialize the 3-D simulations. Contact will also be made with mean field dynamo processes such as the a effect or the profiles of the differential rotation and meridional flows by averaging results from the 3-D MHD simulation in order to introduce new prescriptions and physical ingredients in 2-D mean field stellar dynamo models computed with the STELEM code. Key questions: Can stellar models including rotational profiles and turbulent mixing, more realistic enthalpy and kinetic energy fluxes and magnetic field lead to better prediction of the chemical anomalies and sound speed and rotation profiles over long term evolution? Can 2-D mean field stellar dynamo models be improved by introducing physical ingredients and profiles deduced from 3-D models?

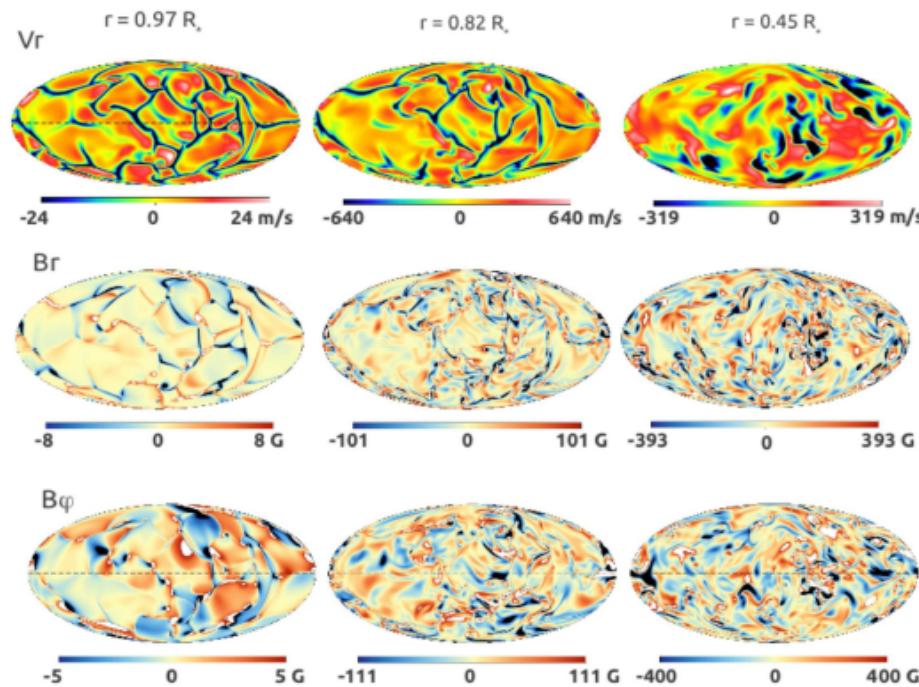
<http://www.stars2.eu/index.htm>

De la PMS à la fin de vie - input physics, highlights, **questions**, prospective

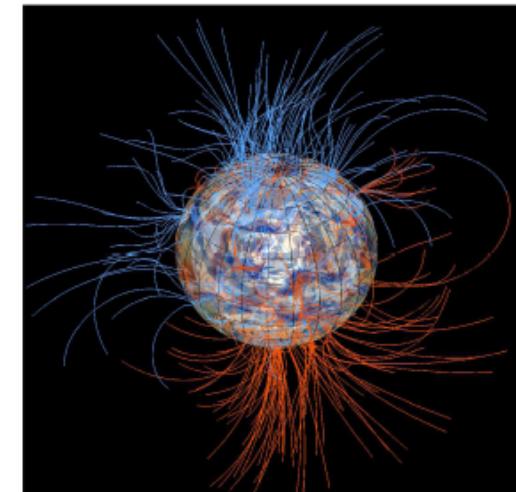
**simulations interactions convection/rotation/champ magnétique
dans étoiles RGB**

(A.Palacios)

- simulation de l'enveloppe de la géante magnétique POLLUX (Palacios & Brun 2013)



→ Exposé L.Jouve



Anomalies d'abondances chimiques, rotation, magnétisme et ondes internes dans les étoiles évoluées (2008 – 2011) (PI P.De Laverny)

→ **Comprendre les étoiles géantes et leur rôle dans l'évolution des galaxies**
(2011 – 2013) (PI A.Palacios; Aurière, Charbonnel, Donati, Kordopatis, Lèbre, Mathis, Recio-Blanco, Richard, Worley; Lagarde) Nice – Montpellier – Toulouse - Genève

Modélisation 2D des étoiles en rotation

input physics, highlights, **questions**

2-3D → Prescription pour 1D

Fast-rotating early-type stars:
Derivation of differential rotation and
meridional circulation
in a self-consistent way

→ Exposé B.Dintrans

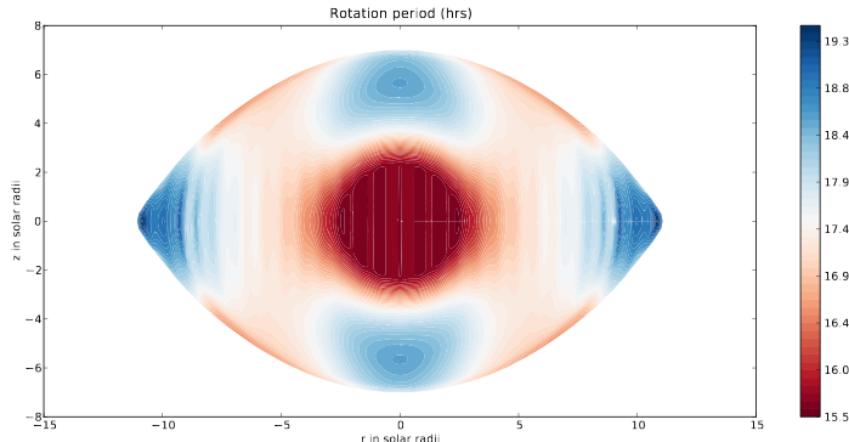


Fig. 1. Meridional view of the differential rotation of $30 M_{\odot}$ ZAMS star rotating at 98% of its critical angular velocity with $X=0.7$ and $Z=0.02$.

Rieutord (2011)



[Project Home](#) [Downloads](#) [Wiki](#) [Issues](#) [Source](#)

[Summary](#) [People](#)

Project Information

[Project feeds](#)

Code license

[GNU GPL v3](#)

Labels

Astronomy, Modeling,
Academic, CPlusPlus

The ambition of this project is to set out a two-dimensional stellar evolution code, which fully takes into account the effects of rotation, at any rate and in a self-consistent way. The difficult, but important point is that rotating stars are spheroidal and are never in hydrostatic equilibrium. They are pervaded by flows everywhere, even in the stably stratified radiative regions. These flows are essentially convective flows in thermally unstable regions (convection zones) and baroclinic flows in the radiative regions. These latter flows are grossly a differential rotation and a meridional circulation, with likely some small-scale turbulence. Radiative regions of non-rotating stars experience very little mixing (only due to microscopic phenomena). Rotation induces flows and therefore some mixing, well-known as "rotational mixing". This is a key feature of the evolution of rotating stars. Besides, these stars also oscillate, and astronomers would like to get from the oscillation frequencies some good constraints on the structure of these stars. The foregoing reasons and many others motivated us to construct a two-dimensional model of rotating stars that is kind enough to enlighten us on the numerous questions we are wondering about...

[Members](#)

Please send any question or comment to ester-project@googlegroups.com.

Simulations numériques multidimensionnelles –

input physics, highlights, **questions**

2-3D → Prescription pour 1D

TOFU

«Towards a new generation of multi-dimensional stellar evolution models:

The TOOl of the FUture »

PI I.Baraffe (Exeter & Lyon)

(2012 → 5 ans; ERC Advanced)

This ERC project aims at 3D modeling of stellar/planetary interiors, and the interaction of these objects with their environment or binary partner.



The main goal is to understand processes characteristic of star/planet interiors and evolution, such as instabilities, turbulence, convection, rotation, magnetic fields, and stellar oscillations.

Astrophysical key problems to be addressed, all of which require multi-D simulations, are:

- (1) the early embedded phases and evolution of accreting proto-stars and brown dwarfs,
- (2) the study of rotation, transport of angular momentum, and chemical mixing in stellar interiors and
- (3) the study of turbulent convection and its effect on stellar pulsations.

AOPNPS

Simulations numériques multi-dimensionnelles de processus de physique stellaire

(2011 – 2013) (PI R.Walder; Baraffe, Bykov, Chabrier, Dessart, Favre, Folini, Freytag, Georgy, Lévêque, Meynet, Petri, Viallet, Winisdoerffer)

Lyon – Marseille - Strasbourg – Exeter – Genève – St Petersburg

Eléments de prospective - LIMS

- Physique “de base” et astrophysique de laboratoire
 - opacités
 - eos (très faibles masses et naines brunes)
 - diffusion atomique (forces radiatives, processus de mélange induits, opacités)
 - perte de masse
 - composition chimique (spectro, modèles atmosphère 3D, NLTE)
- Conditions initiales, formation stellaire, disques, évolution phases précoce
 - (activité, perte de masse, champ magnétique, rotation)
- Transport du moment cinétique et des espèces chimiques :
 - Transport rotationnel “type I” (circulation et turbulence “à la Zahn”)
 - Ondes internes de gravité
 - Champ magnétique
 - Interactions entre processus microscopiques et macroscopiques
 - Binarité (*-* et *-planètes; marées, ingestion)
- Simulations 2-3D: prescriptions pour les modèles 1D :
 - convection, profils rotation, magnétisme, ondes, instabilités
- Impact sur structure, temps de vie, tracés dans le HRD, habitabilité, yields et destins *

Diagnostics observationnels:
Spectroscopie – Spectropolarimétrie –
Sismologie – Interférométrie – HRA

Gaia
Corot, Kepler, Plato
Espadons, Narval, Spirou
ALMA, Spectro multi-objets, E-ELT

Etoiles massives
Phases ultimes de l'évolution

Isochrones, âge des amas, évolution chimique et dynamique des amas
Populations stellaires
Yields, évolution chimique de la Galaxie
Etoiles – Planètes

Structure interne et évolution – Eléments de prospective

- Physique “de base” et astrophysique de laboratoire (eg expériences laser)
opacités, eos , diffusion atomique, pulsations
composition chimique (spectro, modèles atmosphère 3D, NLTE)
- Physique macroscopique: théorie et simulations 2-3D pour l’évolution 1D
Transport rotationnel, champ magnétique, ondes internes, convection, marées, instabilités
Interactions micro-macroscopiques
Binarité (*-* et *-planètes)
- Conditions initiales, formation stellaire, disques, évolution phases précoces
(activité, perte de masse, champ magnétique, rotation)
- Phases avancées: géantes, clump, AGB, naines blanches
→ Impact sur la structure, les temps de vie, les tracés dans le HRD, les yields et destins *

Diagnostics observationnels

DANS TOUT LE HRD

Spectroscopie

Sismologie d’ensemble et à la carte

Spectropolarimétrie

Interférométrie, HRA

...

Gaia, ESO-Gaia survey, Apogee

Corot, Kepler, Tess, Plato

Espadons, Narval, Spirou

ALMA, VEGA/CHARA, Spectro multi-objets, E-ELT

Isochrones, âge des amas, évolution chimique et dynamique des amas

Populations stellaires

Yields, évolution chimique de la Galaxie

Etoiles – Planètes

Etoiles massives

Phases ultimes de l’évolution

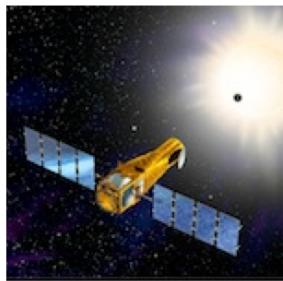
AO PNPS

EES 2011 – Etoiles de petite masse et transition étoiles/ naines brunes
(Reylé, Charbonnel, Schultheis)

**EES 2012 – Rôle et mécanismes de transport du moment cinétique dans la formation
et l'évolution précoce des étoiles**
(Hennebelle & Charbonnel)

EES 2013 – Les Ages des étoiles
(Lebreton, Valls-Gabaud, Charbonnel)

EES 2014 – Astérosismologie et nouvelles contraintes sur les modèles stellaires
(Dintrans, Michel, Charbonnel)



**Ecole Evry Schatzman 2014 : Astérosismologie et nouvelles contraintes sur les
modèles stellaires**

28 sept.-3 oct. 2014 Roscoff (France)

<http://ees2014.sciencesconf.org/>

Mosser, Samadi, Belkacem, Garcia, Eggenberger, Chiappini