



Structure interne stellaire – sismologie / GAIA synergies

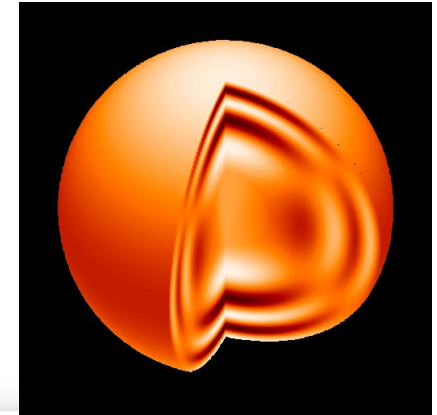


- structure interne: sismologie +spectropolarimétrie +interferométrie+...astrométrie (Hipparcos) +...modélisation et simulations numériques...
- Quelques exemples illustratifs de l'activité scientifique ds ce domaine notamment à l'Obs./Etoile
 - Analyse sismique détaillée/sondage sismique
 - Sismologie d'ensemble
- Les interactions et synergies avec GAIA

Modes propres stellaires

$$\frac{d^2 \xi_r}{dr^2} = -K_s(r) \xi_r$$

$$K_s(r) = \frac{\omega^2}{c^2} \left(\frac{N^2}{\omega^2} - 1 \right) \left(\frac{S_\ell^2}{\omega^2} - 1 \right)$$



Lamb Frequency: $S_\ell^2 = \frac{(\ell(\ell+1)c^2}{r^2}$

Brunt-Väisälä Frequency:

$$N^2 \simeq \frac{g^2 \rho}{p} (\nabla_{ad} - \nabla + \nabla_\mu)$$

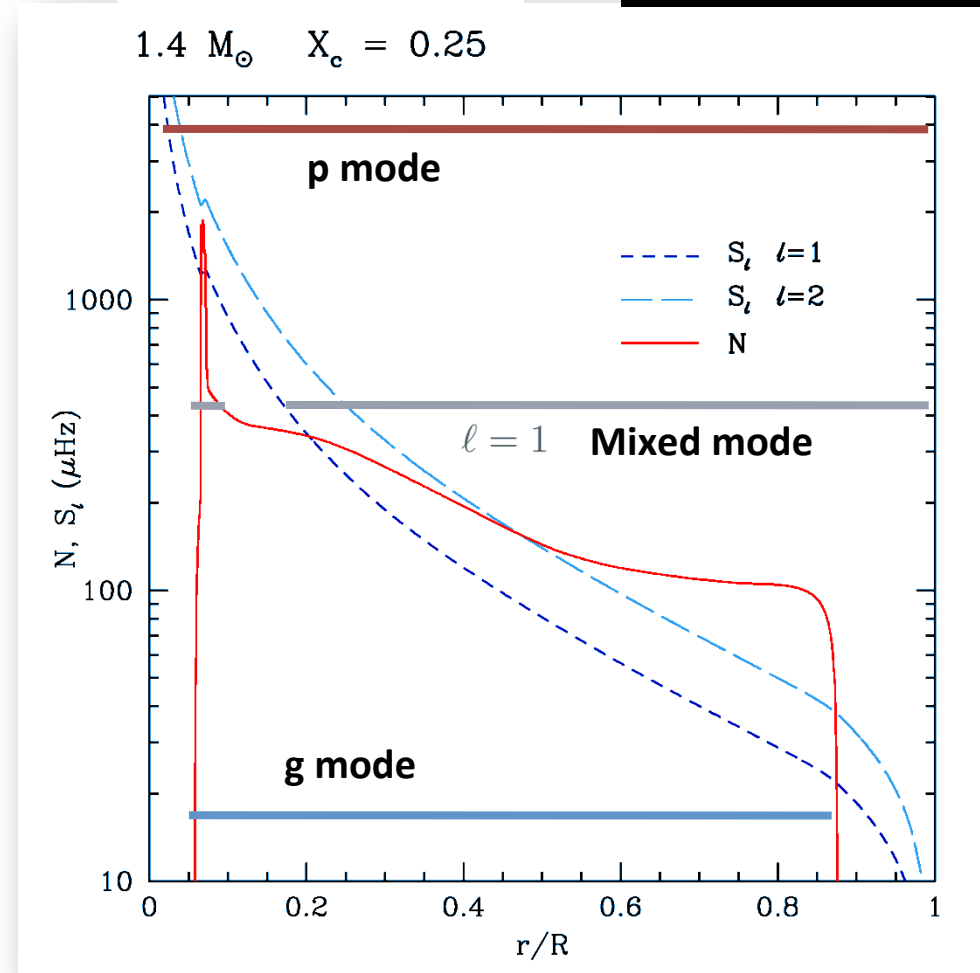
oscillatory if:

$$\omega^2 > S_\ell^2, N^2 \quad \text{pressure modes}$$

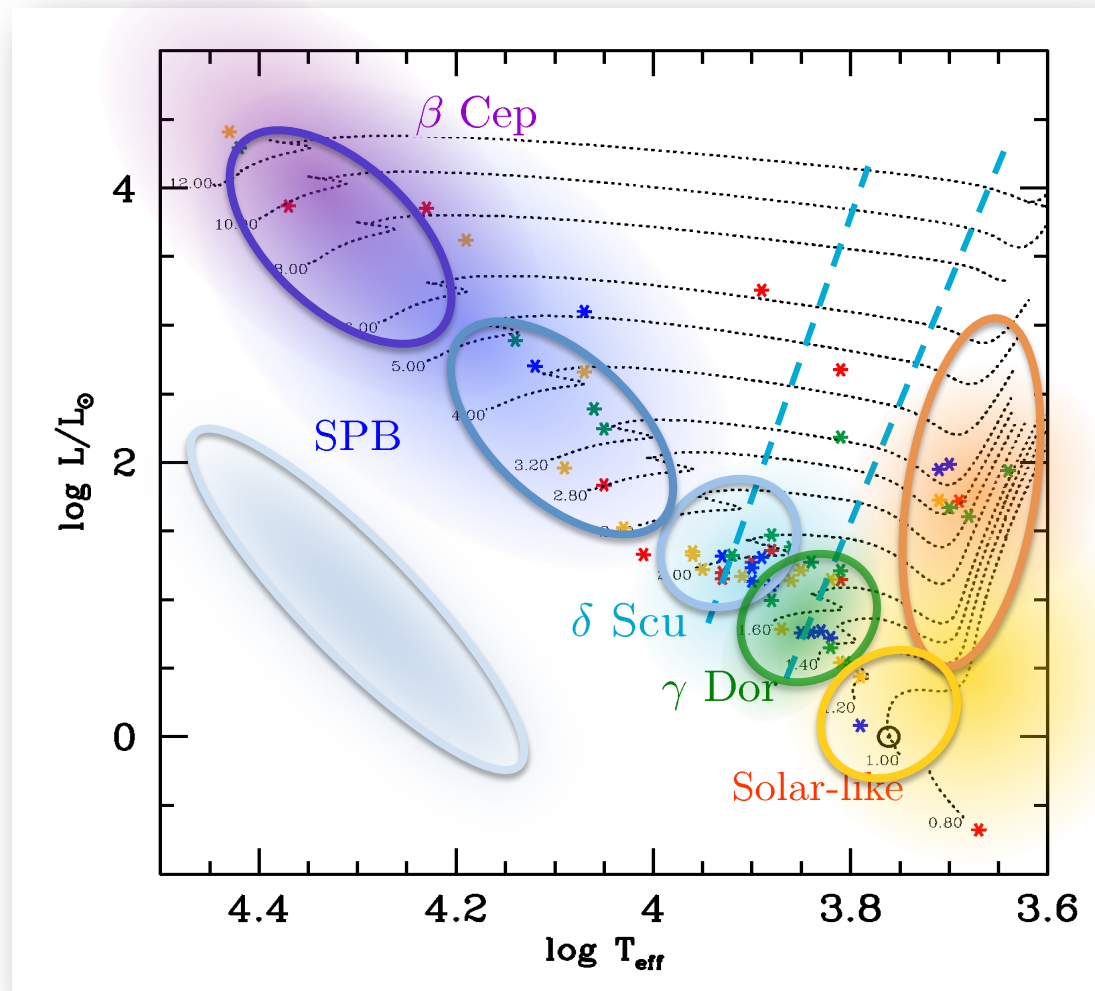
or

$$\omega^2 < S_\ell^2, N^2 \quad \text{gravity modes}$$

If not, evanescent



Stellar oscillations across the HR diagram



- high order p modes/
mixed modes
solar-like oscillations
MS and red giants

- p,g modes/mixed modes
 δ Scuti
 β Cephei

- high order g modes
 γ Doradus
SPB

- frequency zoo
WD, sdB, ...

Les applications- analyse sismique détaillée / sondage sismique:

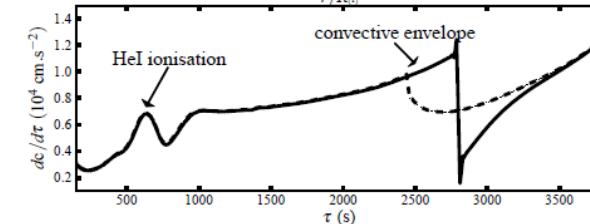
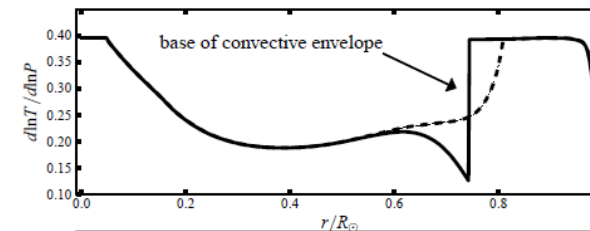
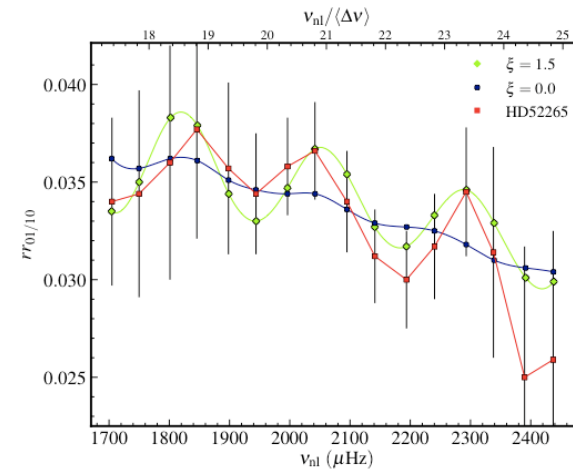
- Fréquences propres:
 - Inversion du profile de rotation
 - Sondage de la base de zone convective
 - ...
 - Estimation des ages...
- Amplitudes et durées de vie des modes:
 - Test de la convection turbulente
 - ...
- Autres signatures photométrique :
 - Granulation
 - Activité magnétique
 - ...

Structure interne stellaire – sismologie / GAIA synergies

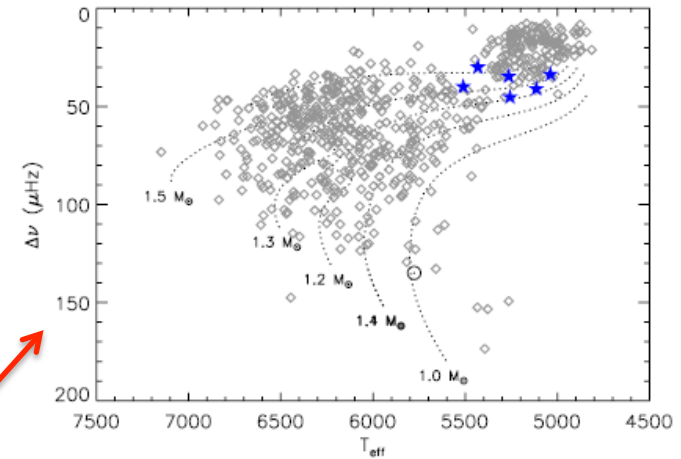
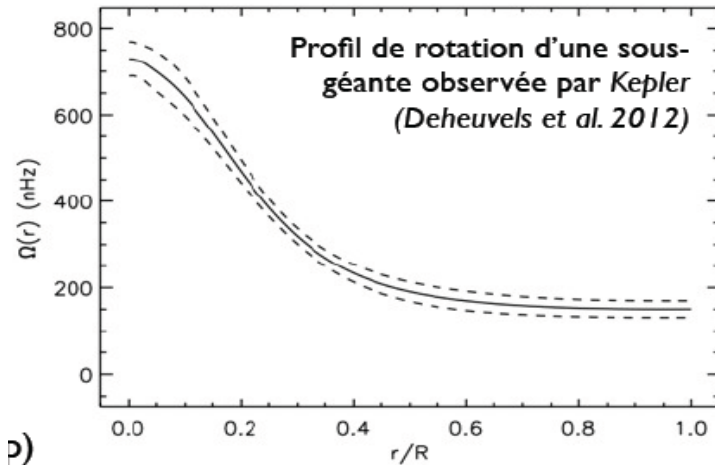
<p>Synergy between asteroseismology and the GAIA mission</p> <p>Josefina Montalbán Université de Liège</p> <p>(SF2A 2013, Montpellier)</p> <p><small>SF2A - Montpellier 2013</small></p>	<p>  <small>Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique</small></p> <p>Contraintes sur la structure interne venant de la sismologie</p> <p>K. Belkacem</p> <p>(Prospective PNPS 2014, Besançon)</p> <p><small>mercredi 26 février 14</small></p>
---	--

Les applications- analyse sismique détaillée / sondage sismique

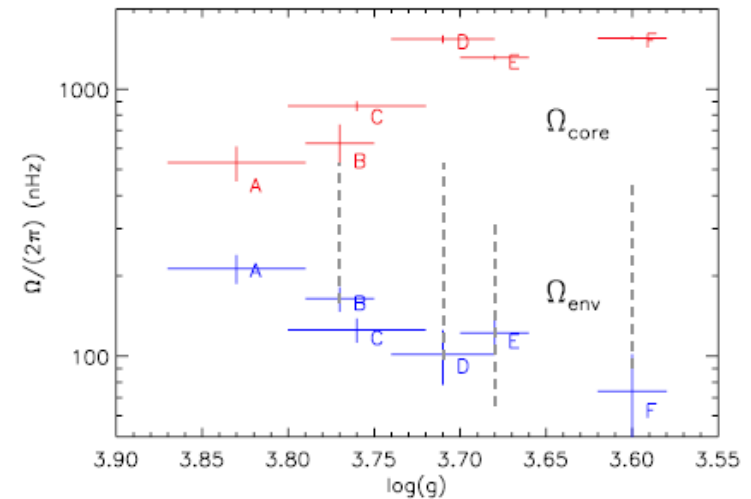
- Signature de la penetration convective dans HD52265
(Lebreton & Goupil 2012 A&A 544)
- Le profil de temperature à la base de la ZC est influencé par la pénétration convective.
- Le profil de vitesse du son c aussi...
- Une perturbation pseudosinusoidale des frequences d'oscillation:
 - periode -> profondeur acoustique
 - amplitude -> profil de variation de c
- Distance de pénétration plus élevée que dans le Soleil.



Les applications- analyse sismique détaillée / sondage sismique



- Inversion sismique du profil de rotation de 7 sous-géantes (Deheuvels 2012,2014)
- Accélération du cœur et ralentissement de la surface avec l'évolution. TROP faible comparé aux prédictions théoriques -> mécanisme d'extraction du moment angulaire ?...



Les applications- ages determination

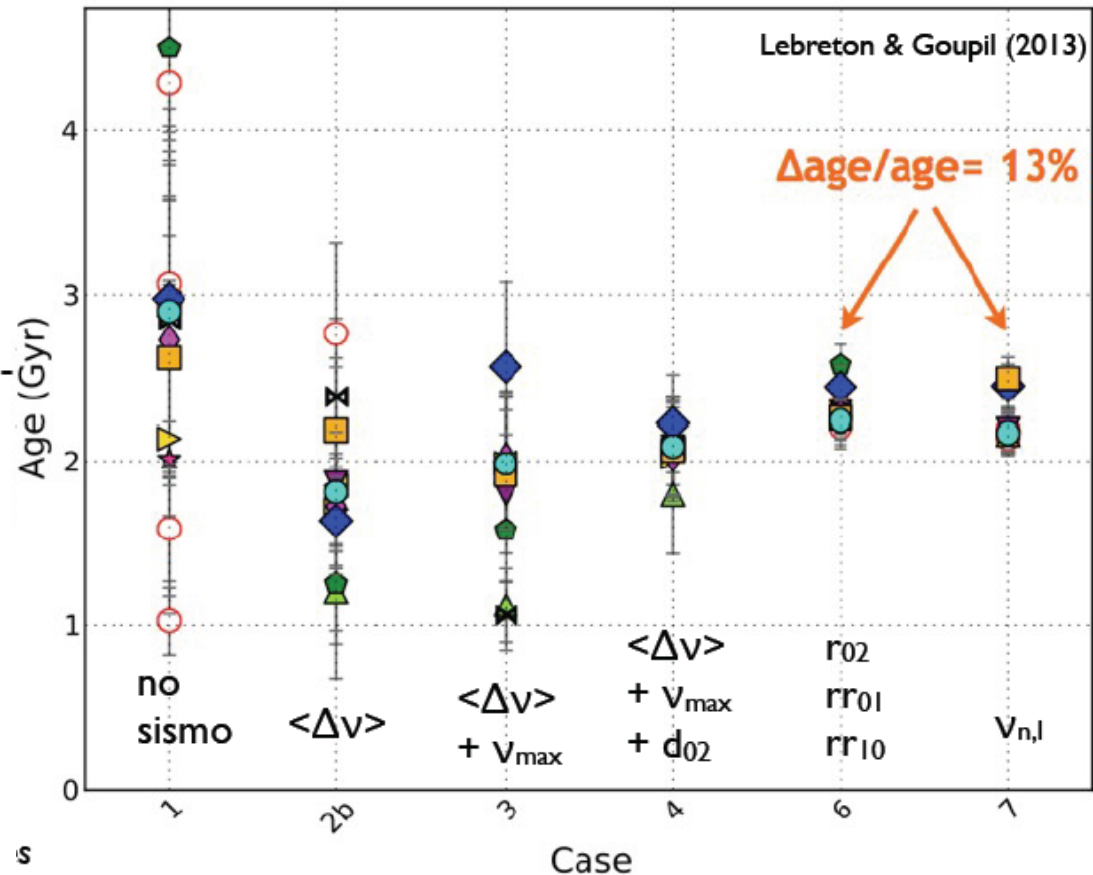
Ex : paramètres globaux et âge de la
cible CoRoT HD52265

(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



Les applications- analyse sismique détaillée / sondage sismique:

Intérêt pour autres communautés?

- Quelques étoiles de référence bien contraintes (e.g. étoiles hôtes de planètes)
- Amélioration de la physique stellaire
 - > meilleure représentativité des grilles de modèles

Les applications- la sismologie d'ensemble / indices sismiques:

- Fréquences propres -> D_n , DP , d_{02} , d_{01} ,...
- Amplitudes et durées de vie des modes -> n_{max} , ...
- Autres signatures photométrique -> t_{ef} , ...


-> possibilité de caractériser sismiquement
de larges échantillons d'étoiles

First order asymptotic approximation

p-mode frequencies

$$\nu_{n,\ell} \simeq \left(n + \frac{\ell}{2} + \frac{1}{4} + \alpha\right) \Delta\nu$$

constant frequency spacing




$$\Delta\nu = \left(2 \int_{r_0}^r \frac{dr'}{c(r')}\right)^{-1}$$
$$\propto (M/R^3)^{1/2}$$

g-mode periods

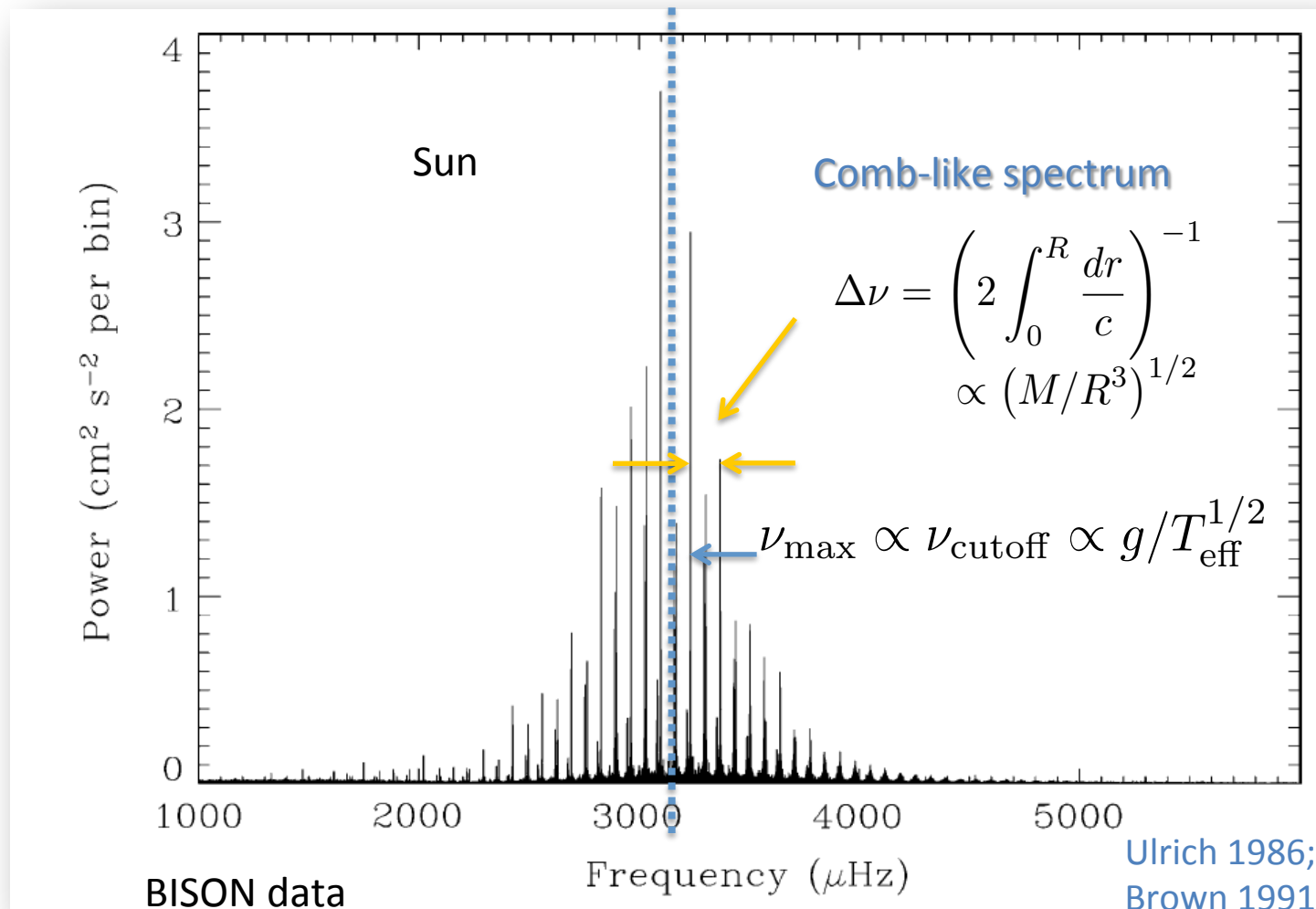
$$P_{n,\ell} \simeq \frac{P_0}{[\ell(\ell+1)]^{1/2}} (n + \epsilon)$$

constant period spacing



$$\Delta P = 2\pi^2 B_T^{-1}$$
$$B_T = \int_{x_0}^1 \frac{N_{\text{BV}}(r')}{r'} dr'$$

Solar-like oscillations



Ulrich 1986;
Brown 1991

Kjeldsen & Bedding 1995
Belkacem 2011

Ensemble asteroseismology

average seismic parameters:

$$\Delta\nu \simeq \sqrt{\frac{M/M_{\odot}}{(R/R_{\odot})^3}} \Delta\nu_{\odot}$$

$$+ T_{\text{eff}}$$

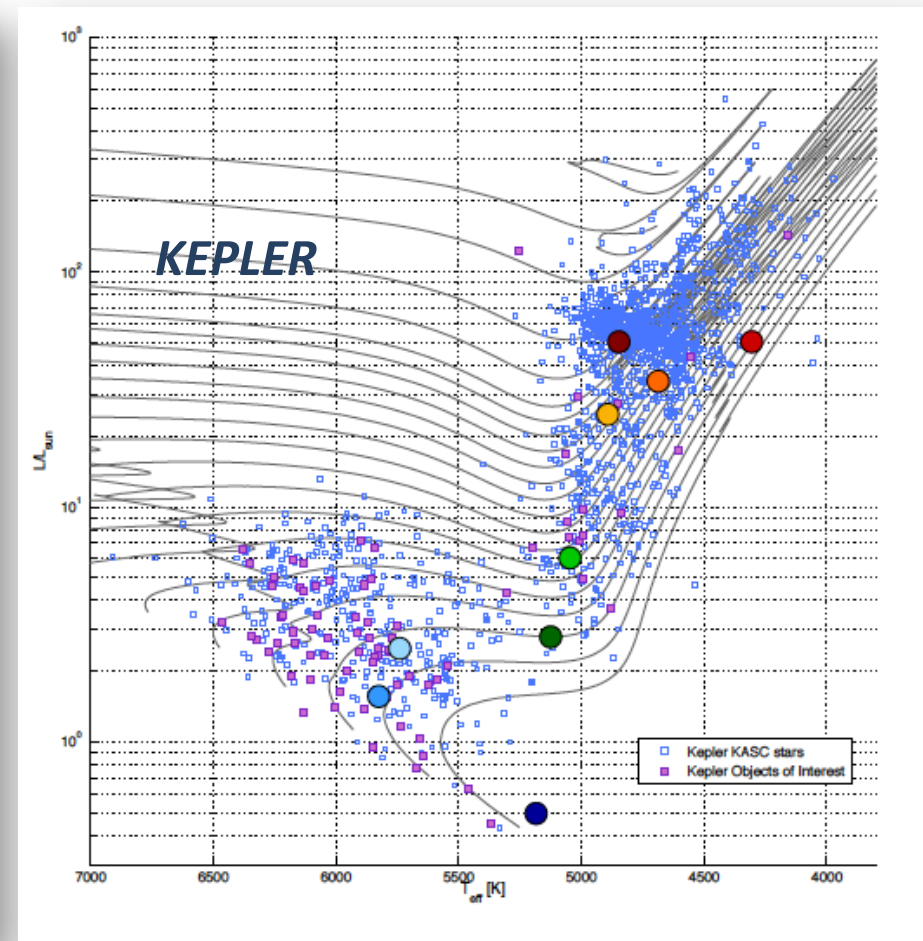
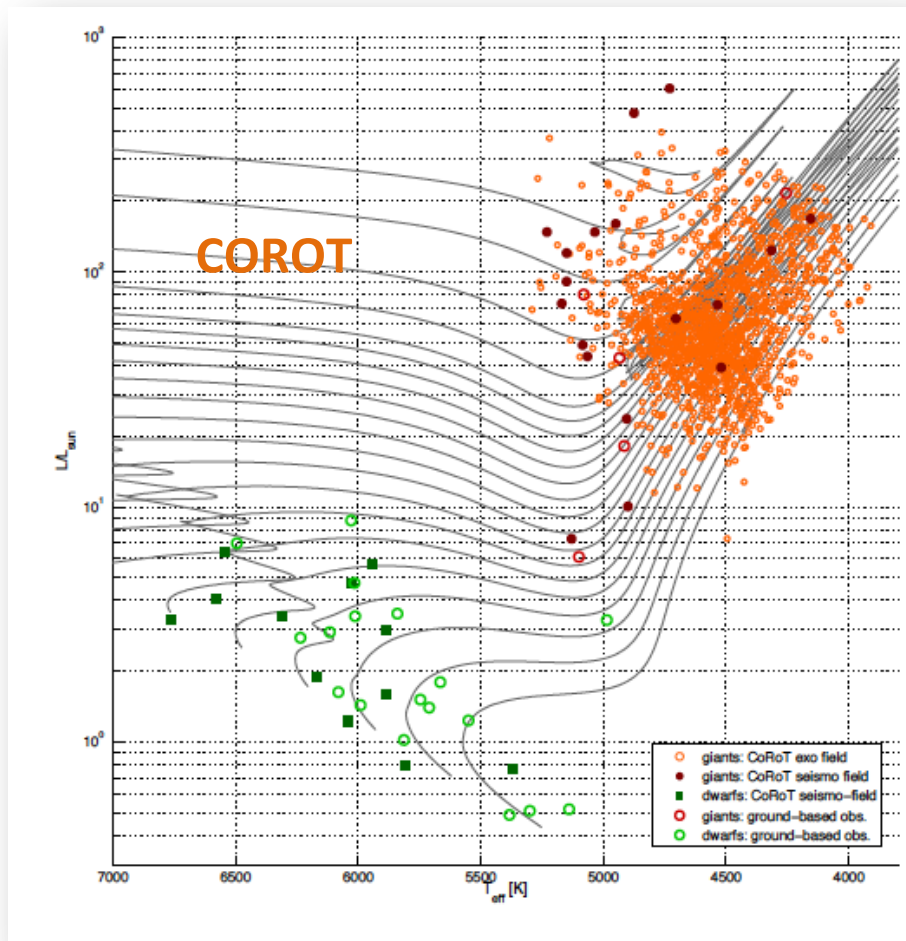
$$\nu_{\text{max}} \simeq \frac{M/M_{\odot}}{(R/R_{\odot})^2 \sqrt{T_{\text{eff}}/T_{\text{eff},\odot}}} \nu_{\text{max},\odot}$$



$$\left(\frac{R}{R_{\odot}}\right) = \left(\frac{\nu_{\text{max}}}{\nu_{\text{max},\odot}}\right) \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}}\right)^{-2} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}}\right)^{0.5}, \quad (5-10\%)$$

$$\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) = \left(\frac{\nu_{\text{max}}}{\nu_{\text{max},\odot}}\right)^3 \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}}\right)^{-4} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}}\right)^{1.5}. \quad (15-20\%)$$

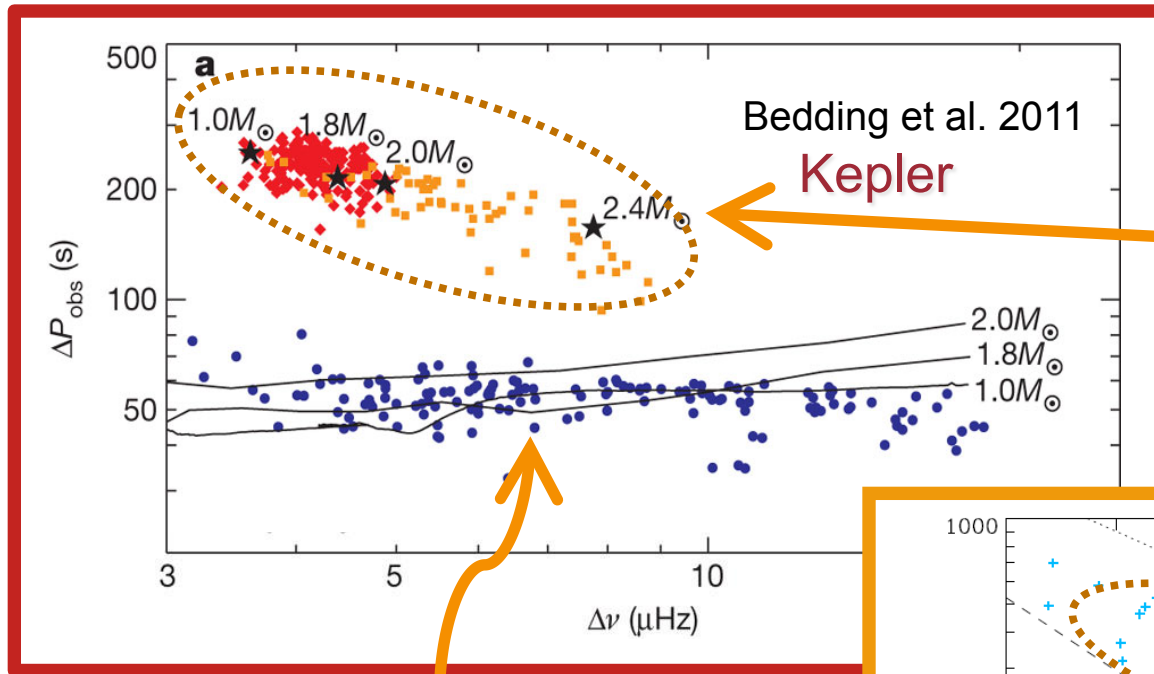
Stello et al. 2009, Miglio et al. 2009, Mosser et al. 2010,2011, Hekker et al. 2010, Chaplin et al. 2011, Kallinger et al. 2010 ...



Chaplin & Miglio 2013

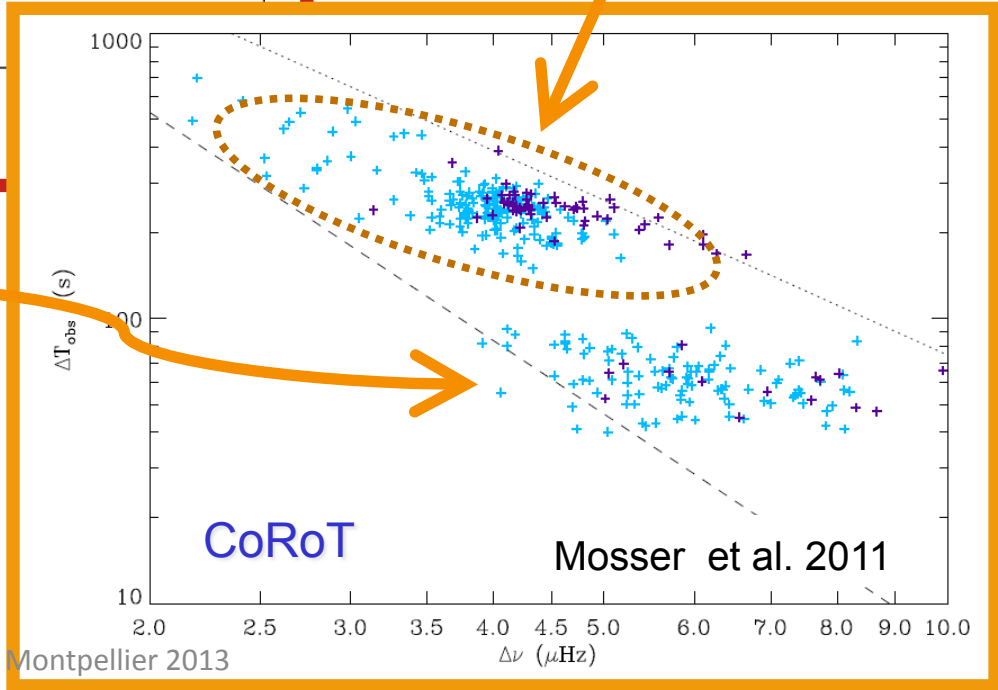
-> des indices sismiques
pour ~ 20000 étoiles

Period spacing in red giants



Core Helium
burning phase

H-shell burning
RGB



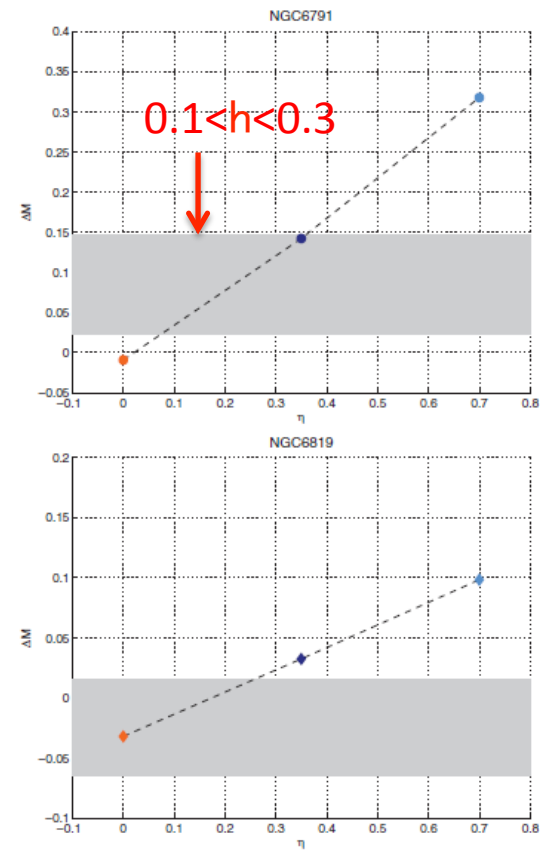
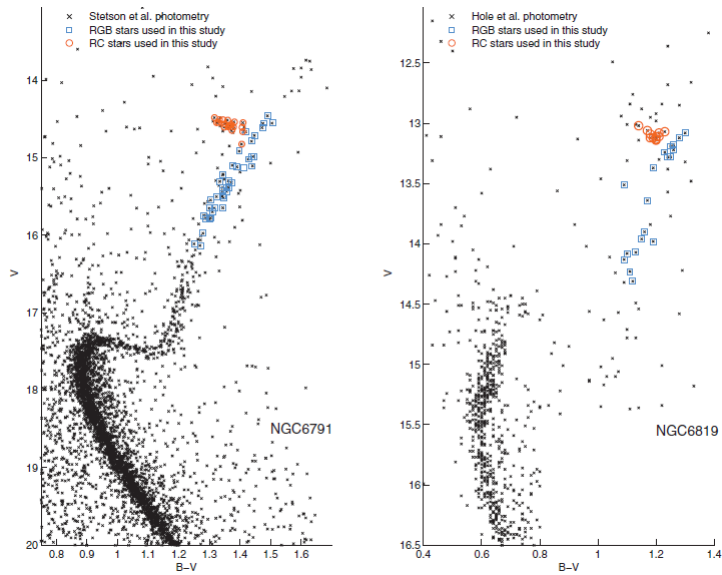
See also Stello et al 2013

Les applications- la sismologie d'ensemble / indices sismiques:

- Structure et evolution stellaire/etudes statistiques:
 - perte de masse, transfer de moment angulaire, ...
- Au delà, pour une communauté M_{sism} , R_{sism} , $\text{age}_{\text{sism}}, \dots$:
 - > Populations galactiques
 - > ...

Structure et evolution stellaire

(Miglio, 2012)

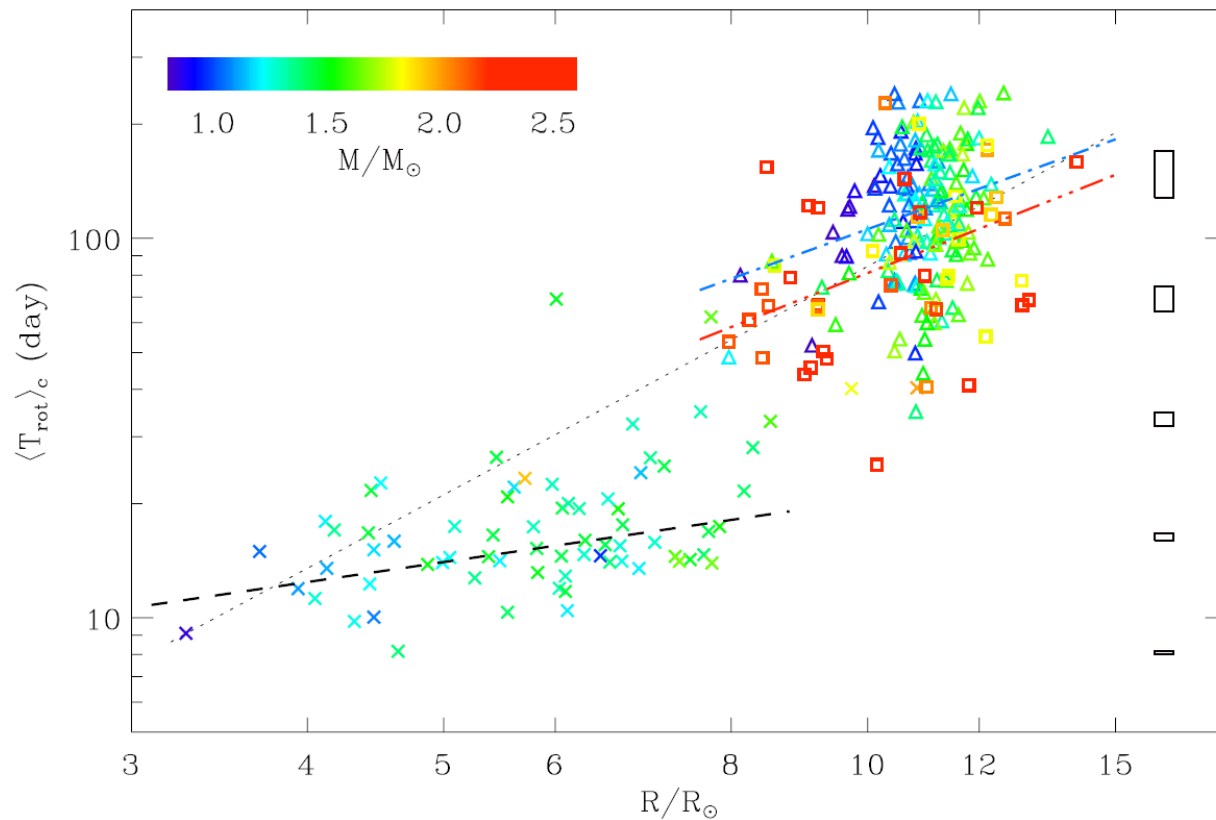


$$\frac{dM}{dt} = 1.27 \cdot 10^{-5} \eta M^{-1} L^{1.5} T_{\text{eff}}^{-2}$$

(Reimers, 1975)

Structure et evolution stellaire

- Les Géantes Rouges...Et pourtant, elles tournent...Mosser et al. 2012 A&A 548



La rotation du cœur

- Ralentit un peu sur la RGB
- Nettement plus sur la branche horizontale
- D'autant plus que la masse des étoiles est faible



-> comparaison modèles:

- Marques et al 2013, A&A 549,74,
- Goupil et al. 2013 A, A&A 549, 75,
- Ouazzani et al. 2013, A&A 554,80,



nécessite un important transfert de moment cinétique du cœur vers l'enveloppe, actuellement non modélisé.

Ensemble seismology of G-K giants: AGES

- Mass → age

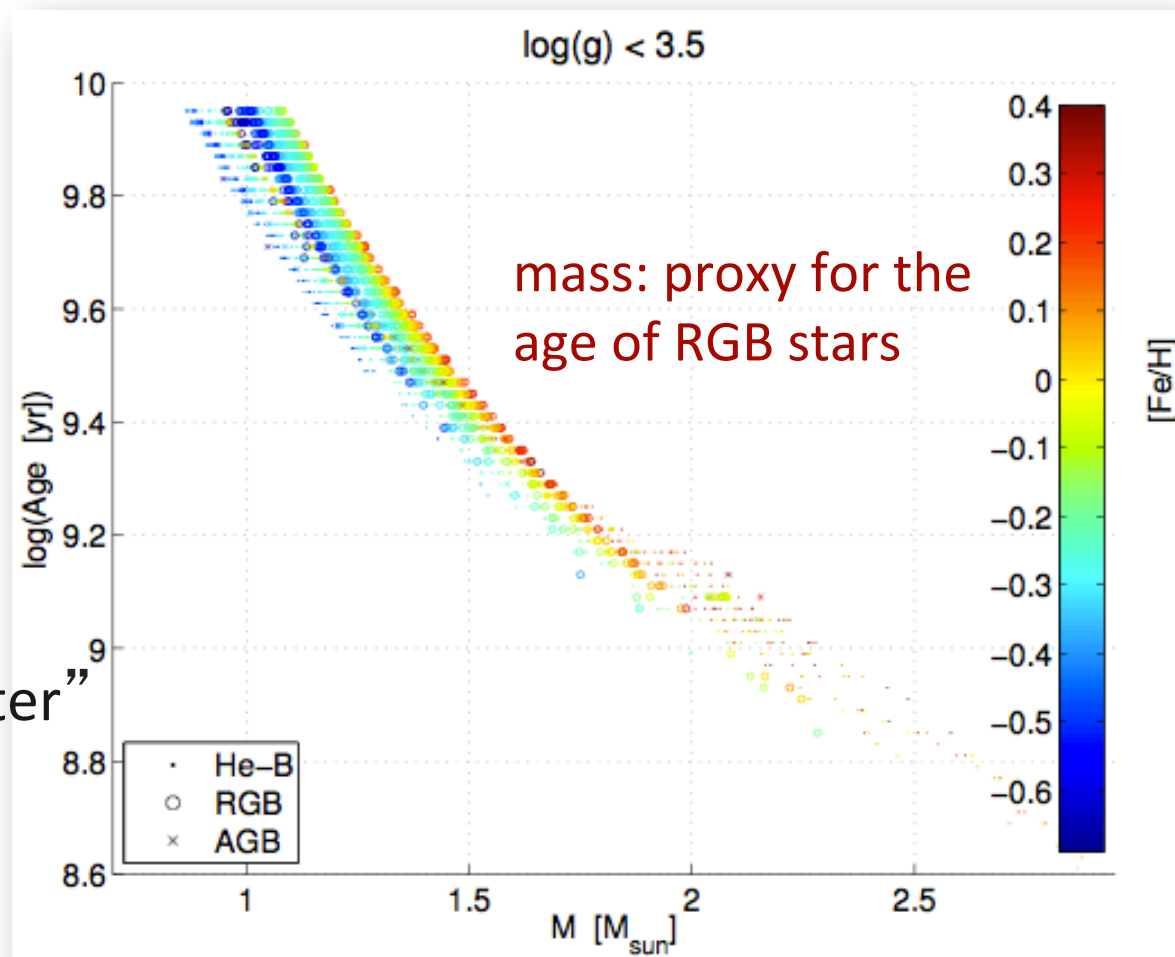
Age-mass relation
GIANTS



$M + [\text{Fe}/\text{H}]$: “chronometer”
for evolved stars



uncertainty $\sim 15\%$



(Miglio, 2012)

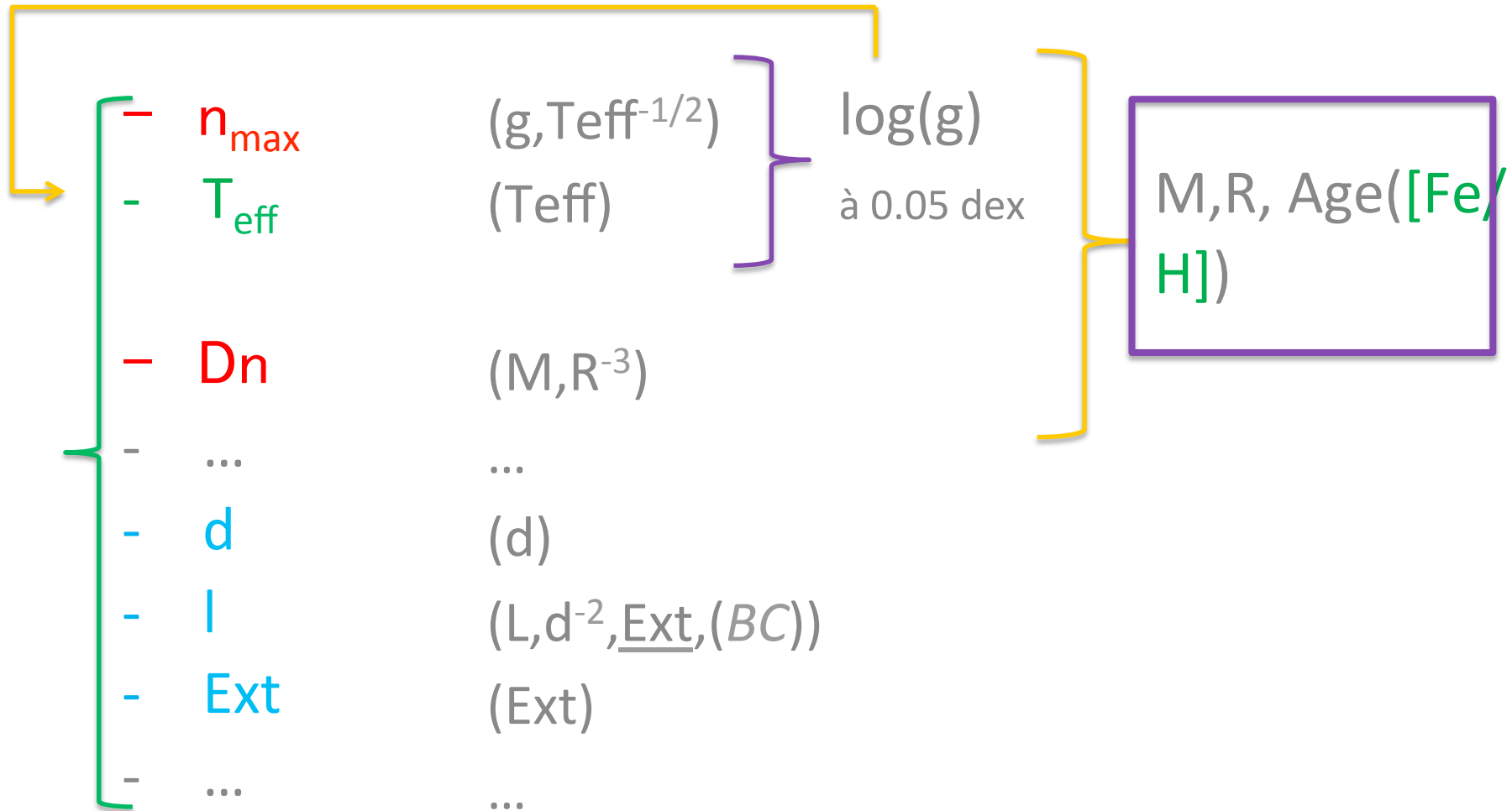
Les interactions/synergies avec GAIA

'observables'

'paramètres fondamentaux'

- D_n	(M, R^{-3})
- n_{\max}	$(M, R^{-2}, T_{\text{eff}}^{-1/2}) \rightarrow (M, R^{-7/4}, L^{-1/8})$
- T_{eff}	$(T_{\text{eff}}) \rightarrow (R^{-1/2}, L^{1/4})$
- d	(d)
- l	$(R^2, T_{\text{eff}}^4, d^{-2}, \underline{\text{Ext}}, (BC)) \rightarrow (L, d^{-2}, \underline{\text{Ext}}, (BC))$
- Ext	(Ext)
- ...	- ...

Les interactions/synergies avec GAIA



Structure and evolution of the Milky Way : colab. sismo & spectroscopic surveys

SISMO => logg to Spectroscopic surveys
Spectroscopy => [Fe/H] to SISMO

□ GAIA-ESO survey:

Gaia-ESO Public Spectroscopic Survey, a 300-night survey of all Galactic Stellar Populations, using FLAMES (both GIRAFFE and UVES) on the VLT's Unit Telescope 2 (UT2).

~2000 CoRoT RGs in the center direction

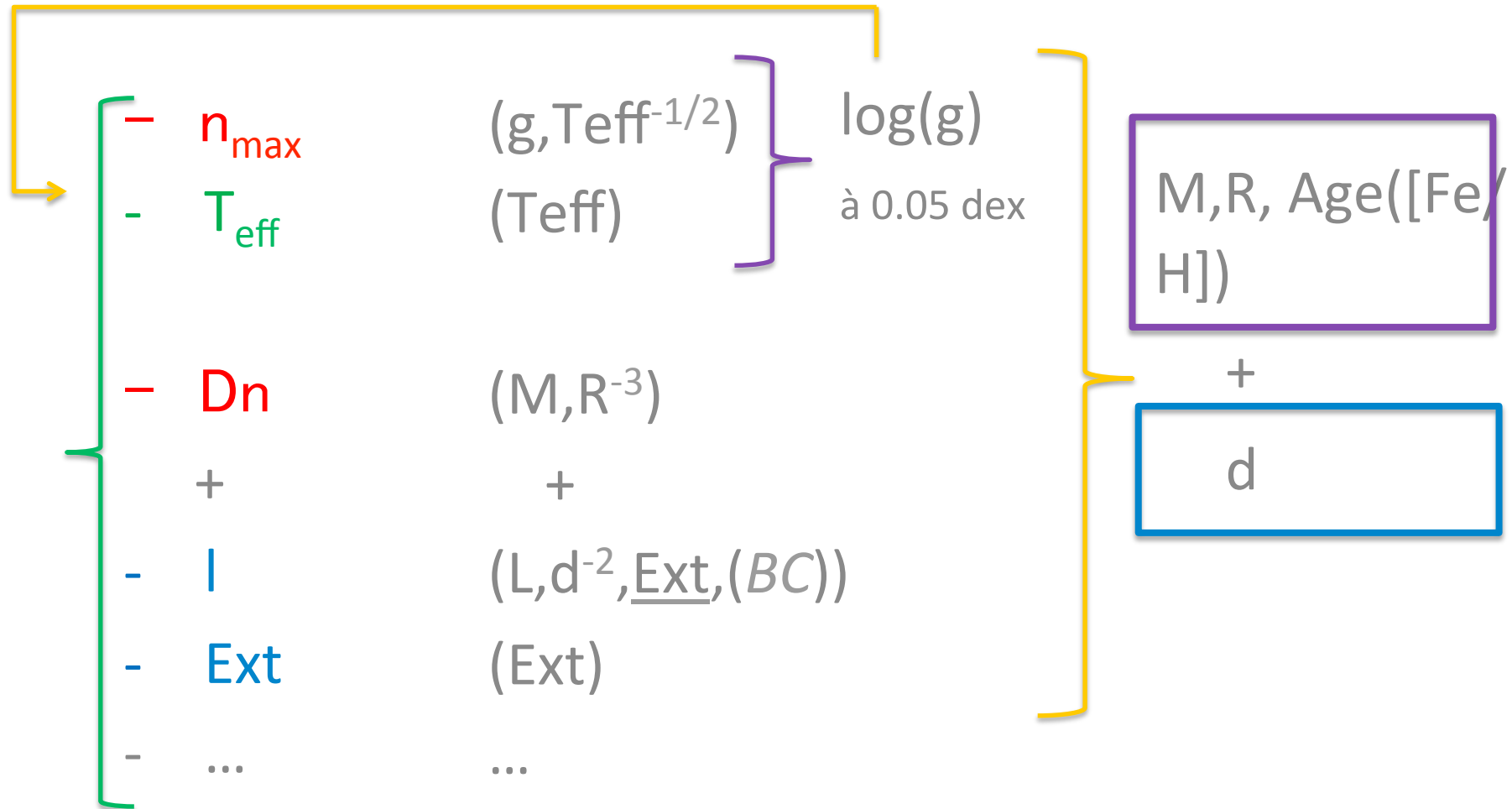
Cf présentation Catherine Turon

□ APOGEE

H-band survey of Galactic populations ($H < 12.5$) using SDSS 2.5m tel (Apache Point Obs), 100,000 stars (80% red giants); $R \sim 22500$, $S/N=100$; Chemical abundances (0.1dex) 15 elements – including : C, N, O, Na, Mg, Ca, Mn, Fe, Co, Ni. Velocity error= 0.5 km/s

~ 600 CoRoT RGs center & anticenter: COROTGEE
~10k in Kepler field: APOKASC

Les interactions/synergies avec GAIA



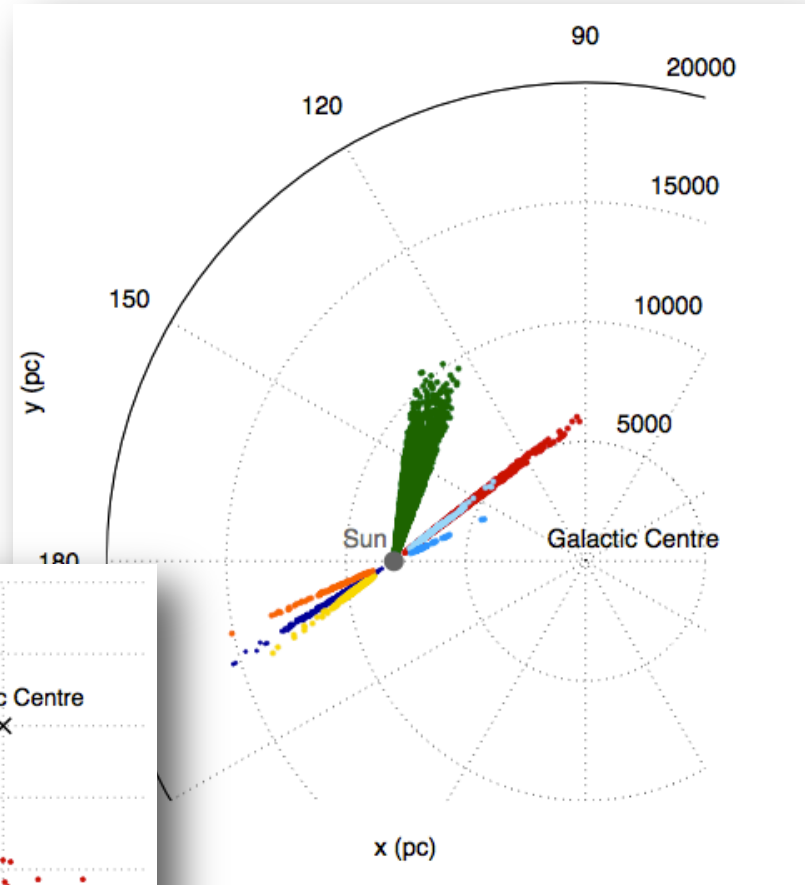
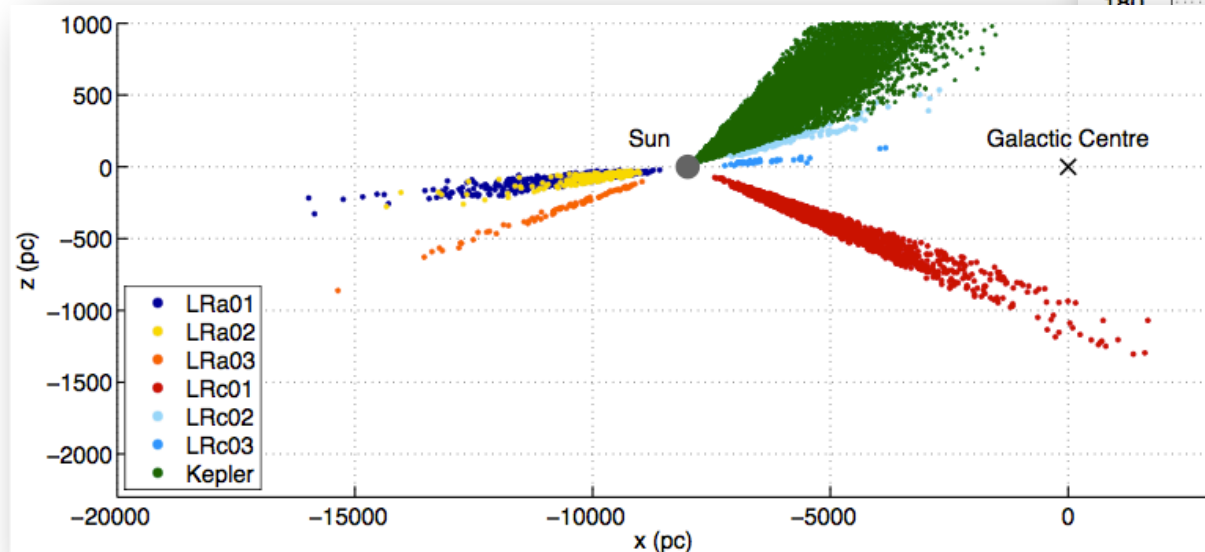
3D map of G-K giants

$$\log d = 1 + 2.5 \log T_{\text{eff}} + \log \nu_{\text{max}} - 2 \log \Delta \nu + 0.2(m_{\text{bol}} - M_{\text{bol}\odot})$$

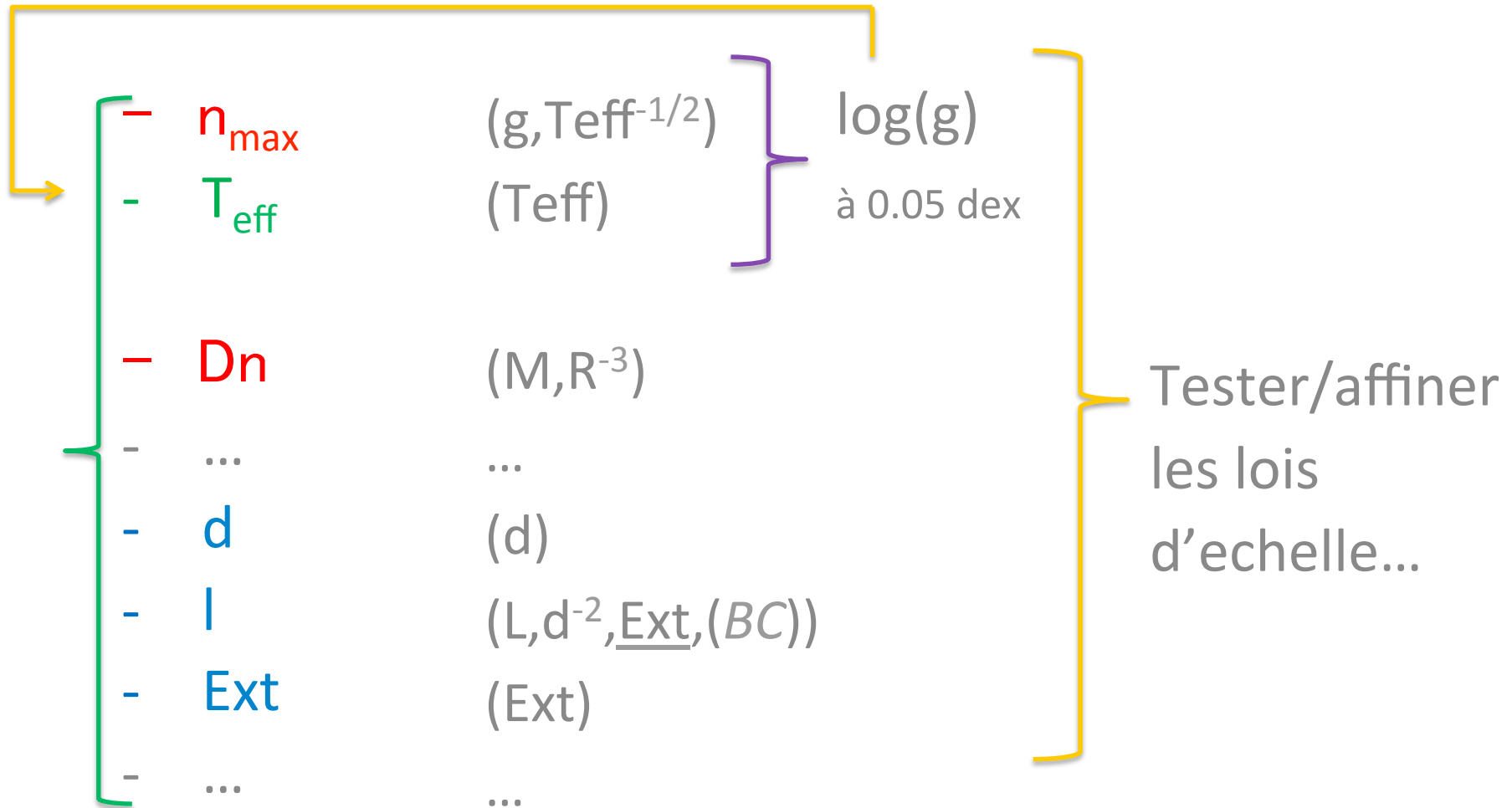
CoRoT LRs: ~ 10-15000 stars

Kepler data: ~ 10-15000 stars

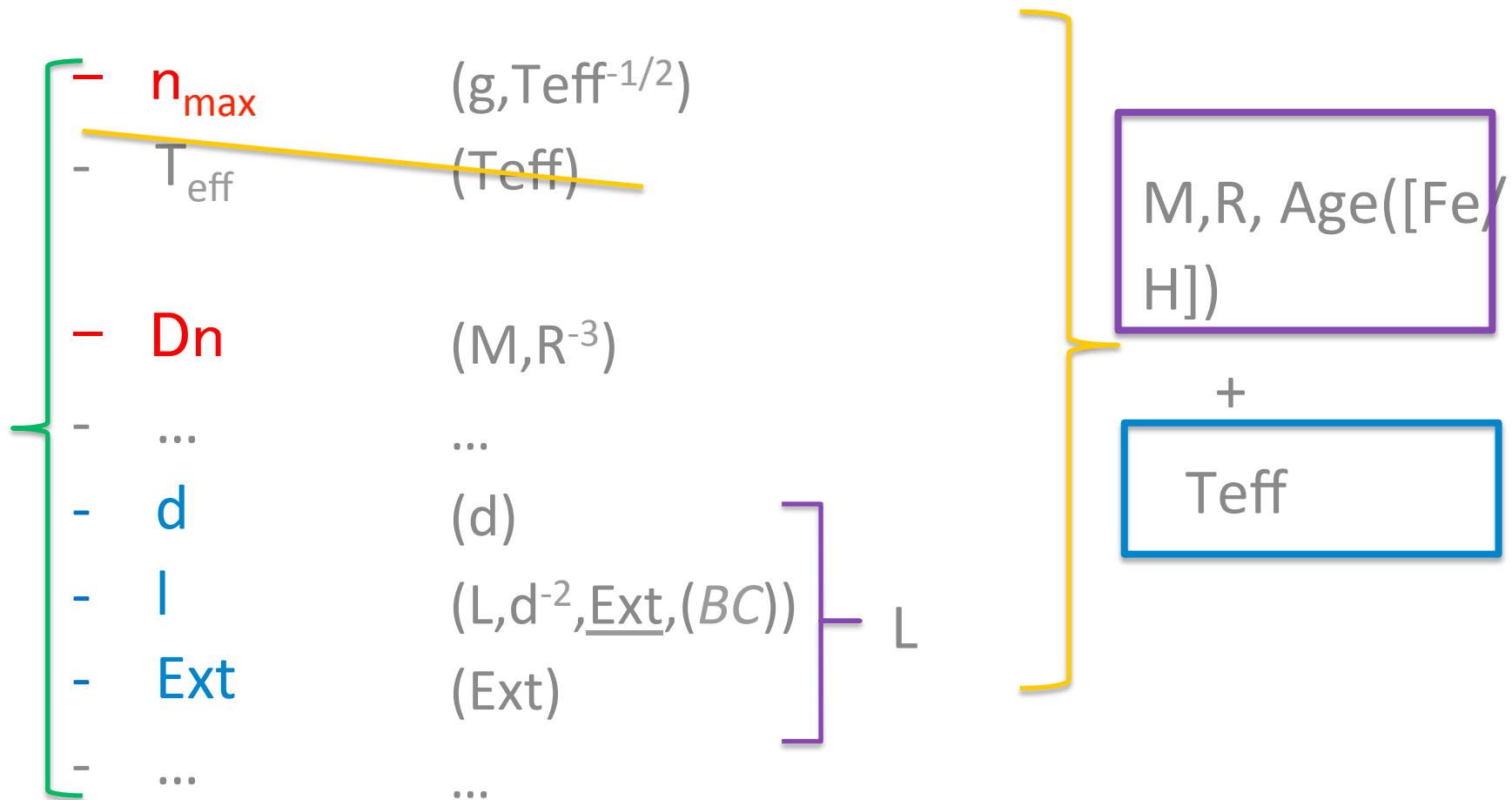
CoRoT provide M, R, ages and distances for Red Giants up to 10 Kpc from the Sun



Les interactions/synergies avec GAIA



Les interactions/synergies avec GAIA





Structure interne stellaire – sismologie / GAIA - synergies

- CoRoT+ *Kepler* -> Les indices sismiques deviennent un outil applicable à de grands échantillons d'étoiles

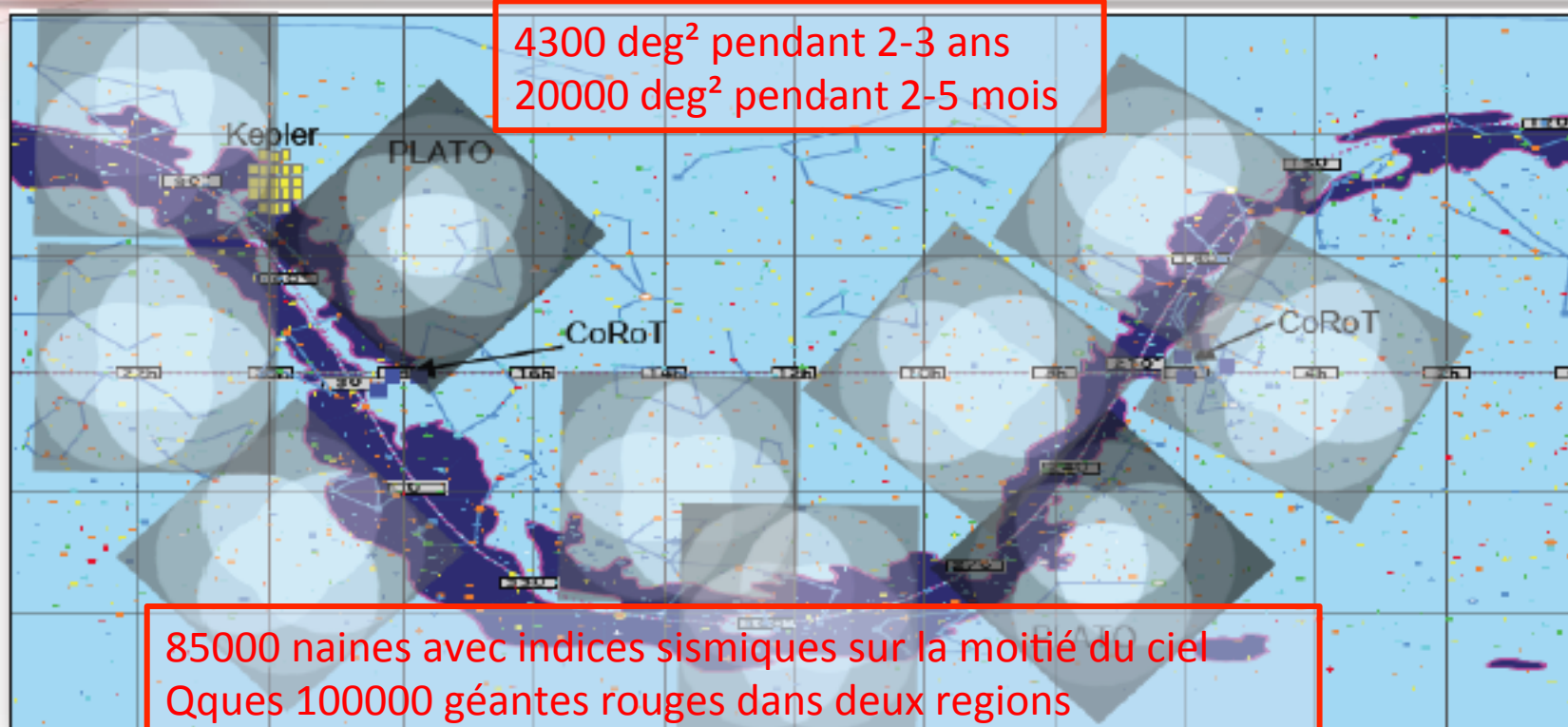


R. Samadi (PI), C. Renié (CP)

- Nombreuses applications potentielles au delà de la physique stellaire: exoplanètes, populations galactiques, MIS,...
- Les lois d'échelle sismiques doivent être encore testées/affinées



PLATO: FIELD OF VIEW



The M2 baseline assumed 2 long pointing + step-and-stare phase

For M3: Other observing other strategies are possible, e.g.:

- Start with step-and-stare phase for large coverage in the early phase → > 50% coverage
- Start at regions with interesting objects

courtesy of H. Rauer (DLR)