

**Besoins de modélisation des grands projets
GAIA, COROT, EDDINGTON**

Yveline Lebreton

GÉPI & UMR 8111- Observatoire de Paris

Enjeu 1 : étoiles \leftrightarrow physique des milieux extrêmes

\leftrightarrow COROT, EDDINGTON, GAIA

quelques problèmes :

- processus de transport micro/macroscopique
 - \leftrightarrow éléments, moment angulaire, champ magnétique
- physique nucléaire : \leftrightarrow précision ou stades avancés
- physique statistique : \leftrightarrow étoiles froides à très froides
- interfaces : intérieur - atmosphère - MIS
 - \leftrightarrow conditions aux limites des modèles d'intérieur
 - \leftrightarrow conversion $(L, T_{\text{eff}}) \rightarrow$ couleur-magnitude

Enjeu 2 : étoiles \hookrightarrow évolution galactique & cosmologie :

\hookrightarrow GAIA

- évolution chimique galactique
 - abondance de l'hélium :
de l'hélium primordial à aujourd'hui
 - relation hélium-métallicité ? Galaxie, autres galaxies
- dynamique galactique
 - âges des étoiles :
disque mince, disque épais, bulbe, halo
- cosmologie
 - calibration des luminosités et échelle des distances
 - âges des plus vieilles étoiles < âge de l'Univers

Données attendues : futur proche ou à plus long terme

GAIA ~ 2012 :

cadre rigoureux pour la structure interne et l'évolution stellaires

~> ensemble complet, données homogènes :

astrométrie, photométrie multi-bande/époque, spectroscopie

tous types d'étoiles - toutes populations dont

★ rares : très brillantes - faibles - stades évolutifs rapides

★ particulières : variables - binaires - calibreurs de distances

~> beaucoup plus d'★ que Hipparcos et très haute précision :

μ , π , v_r , flux, température, abondances, masses

10^9 étoiles jusqu'à $V=20$ mag et $\sigma_\pi = 4 \mu as$ à $V=10$

pour $18 \cdot 10^6$ ★ : $\sigma_\pi/\pi < 1\%$ et $\sigma_V \simeq 0.001$ mag

VLT-VLTI : UVES - GIRAFFE - VINCI - AMBER- MIDI — GAIA :**paramètres globaux****↪ masses et rayons : précision 1-2 % pour beaucoup d'étoiles****↪ abondances tous éléments, sous-géantes ; températures effectives****COROT 2005 - MOST 2004 - EDDINGTON 2008 : sismologie****↪ fréquences, amplitudes → beaucoup d'étoiles****COROT : programme principal : ~ 6★ cibles : type G-F V-IV ou δ Scuti****150 jours par ★ : détection d'oscillations d'amplitude solaire, $\sigma_\nu \simeq 0.1\mu\text{Hz}$** **EDDINGTON : jusqu'à 50 000 étoiles seraient observées****30 jours par ★ : objectif \leftrightarrow précision $\simeq 0.1 - 0.3\mu\text{Hz}$** **En parallèle : travail théorique, numérique, expérimental****simulations 2D et 3D des processus de transport; laser MégaJoule, etc.**

Outils à développer ou à exploiter pour l'interprétation
code CESAM et autres codes ? code de Genève, de Århus, etc.

- **introduire/améliorer la description des processus physiques**
- **développer des interfaces et programmes liés**
 - ↪ **codes d'oscillations, codes d'atmosphères**
 - ↪ **calcul d'isochrones, conversions couleur-magnitude**
- **calcul de modèles/grilles de modèles de précision variable**
 - ↪ **modélisation fine des étoiles calibreurs**
 - ↪ **modélisation en série des autres étoiles**

1. Des calibreurs... contraintes fortes, données complètes

exemples : Soleil, étoiles binaires, pulsantes ou en amas

↪ contraintes pour les processus physiques

↪ validation des modèles d'intérieur et d'atmosphère

modèles : les paramètres sont assez bien voire très bien fixés

assez peu de modèles, précision optimale, automatisation difficile

2. ...aux autres étoiles observations partielles/ moins précises

magnitudes, couleurs, T_{eff} , $[\text{Fe}/\text{H}]$, $[\alpha/\text{Fe}]$

? âges, masses, abondance d'hélium, échelle des distances

hypothèses : objets similaires aux calibreurs, même physique

correction des différences : connaissances théoriques/empiriques

modèles de diverses compositions, masses, stade d'évolution

beaucoup de modèles, précision moindre, automatisation possible

modélisation des étoiles “proches” du disque et du halo

calibreurs pour distances des amas ouverts et globulaires

↔ technique d'ajustement de la séquence principale

tests : théorie de la structure interne et atmosphère stellaires

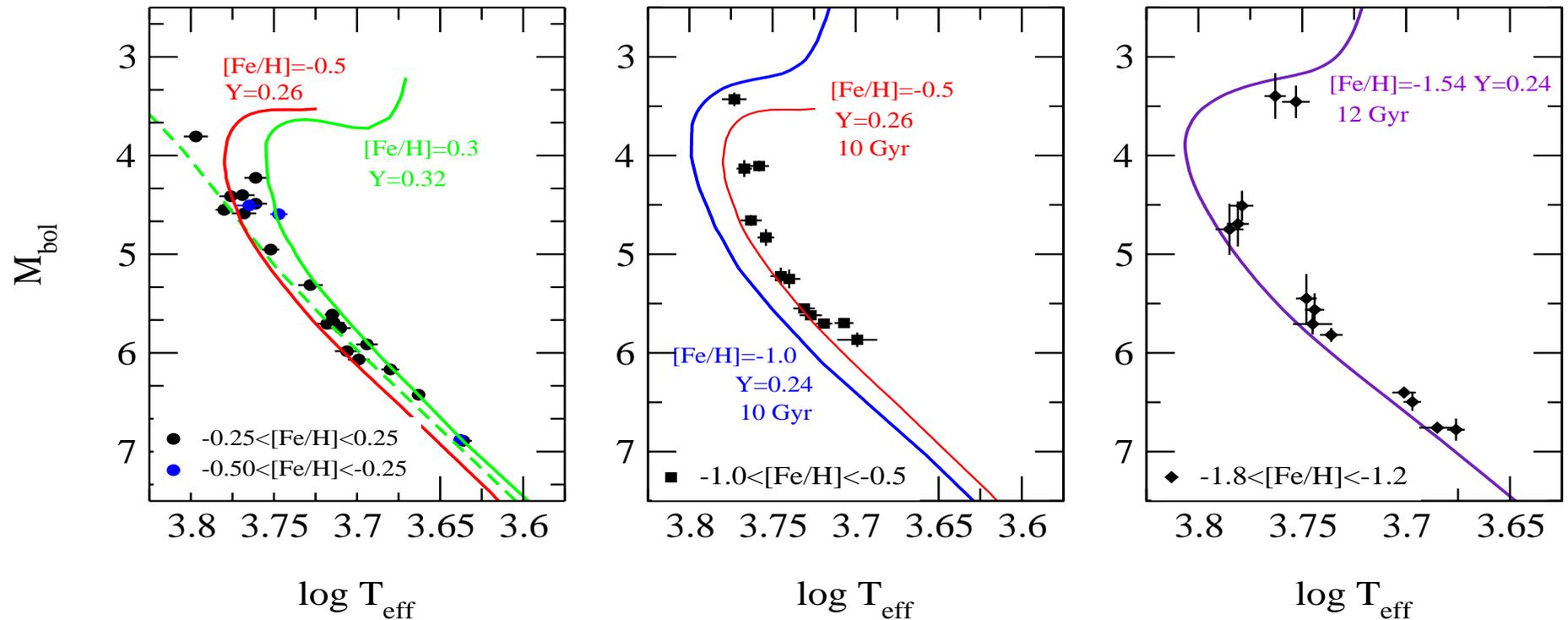
↔ sédimentation Y, Z + effets non-ETL dans l'atmosphère [Fe/H]

sélection :

étoiles Hipparcos, F_{bol} (2%), $T_{\text{eff,IRFM}}$ (1.5%), $[\frac{\text{Fe}}{\text{H}}]$ (± 0.1 dex)

	nombre	σ_{π}/π	$\sigma_{M_{\text{bol}}}$
disque	34	<5%	0.03-0.10 mag
halo	13	<12%	0.03-0.26 mag

Alonso et al 1995, 96; Cayrel de Strobel et al 1997



Lebreton et al 97, 99 ; Cayrel et al 97, 99; Nissen et al 97, 98; Pont et al 97

nombreuses grilles de modèles + isochrones associées :

17 masses de 0.6 à $10M_{\odot}$; stades évolutifs : ZAMS à début RGB

7 compositions $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.5, 0.0, -0.5, -1.0, -1.5, -2.0, -2.5$

modèles pour binaire μ Cas : variation de tous les paramètres

données de GAIA à modéliser :

étoiles du champ, masses des étoiles :

étoiles simples :

$$\frac{\sigma_{\pi}}{\pi} \lesssim 0.1 - 1 - 10\% \rightsquigarrow 7 \cdot 10^5 - 21 \cdot 10^6 - 22 \cdot 10^7 \text{ étoiles}$$

étoiles binaires :

$$\frac{\sigma_M}{M} \lesssim 1\% : 17\,000 \text{ étoiles}$$

binaires spectro, à éclipses (10^6 courbes de lumière) \rightsquigarrow cibles pour le sol

masses par événements de micro-lentilles : ~ 100

aujourd'hui

Hipparcos : $\frac{\sigma_{\pi}}{\pi} \lesssim 10\% \rightarrow 100 \text{ pc}$, pas d'étoiles rares

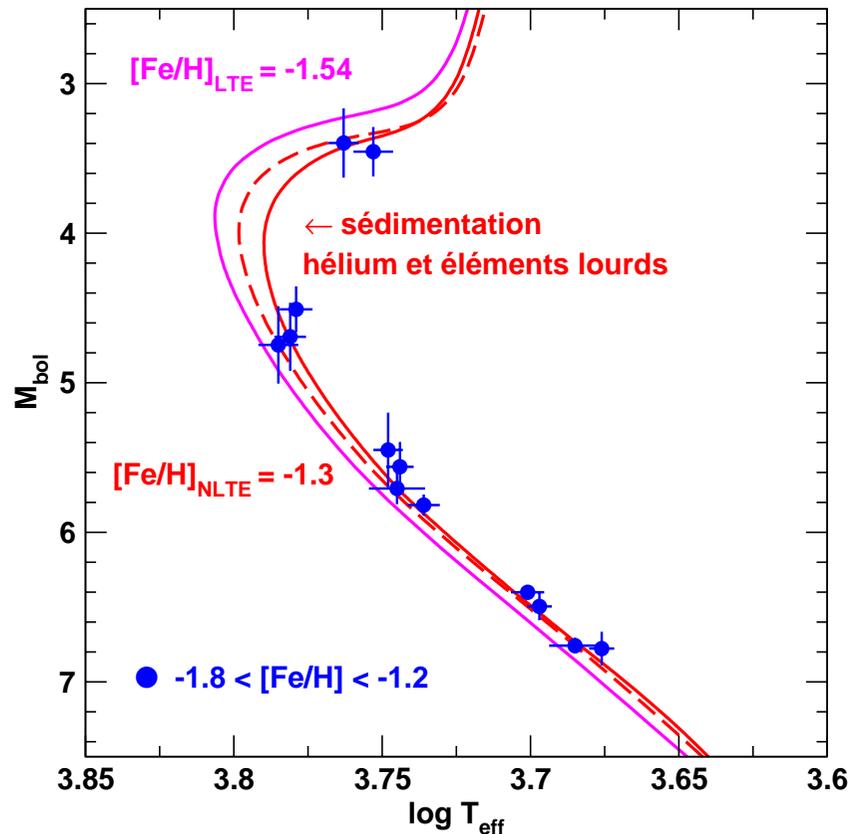
accès à 60 binaires avec $\frac{\sigma_M}{M}, \frac{\sigma_R}{R} \sim 1\%$

prévoir modèles et extensions de CESAM :

modèles : large gamme : masses, compositions, stades évolution

extensions ? PMS, stades avancés, très petites et fortes masses

modélisation des \star du halo : âge minimum de l'Univers



isochrones vs. observations

halo ou amas globulaires

âge = $12.0 \pm 2.5 \cdot 10^9$ ans

datation par radioéléments

uranium âge = $12.5 \pm 3 \cdot 10^9$ ans

refroidissement naines blanches

disque âge $9.5^{+1.1}_{-0.8} \cdot 10^9$ ans

halo âge $\gtrsim 9. \pm 10^9$ ans

âge des plus vieilles étoiles vs.

âge de l'expansion : $f(H_0, \Omega, \Lambda)$

Cayrel, Lebreton, Perrin, Turon, 1997

GAIA :

étoiles du halo : distances directes

sous-naines : 4000 \star F-K \rightarrow 200 pc ; sous-géantes : toutes \rightarrow 3 kpc

amas globulaires : parallaxe π à 10% pour \star de 20 amas : $\sigma(\text{âge}) < 1\text{Gyr}$

naines blanches : 200 000 NB, dont quelques NB pulsantes

modélisation des amas ouverts :

ensembles homogènes d'étoiles issues du même nuage de gaz

hypothèses : étoiles de même âge, même composition initiale

aujourd'hui : modélisation fine des Hyades :

le plus proche à ~ 46 pc \rightsquigarrow étoiles vues individuellement

calibreur : 1^{er} barreau échelle des distances dans l'Univers

tests fins : théorie de la structure interne stellaire

modélisation plus grossière des Pléiades, Praesepe, etc.

distances moyennes, incertitudes plus grandes

relation hélium-métallicité

correction de métallicité pour calibration de l'échelle des distances

modélisation des Hyades : données d'observation

après Hipparcos :

~ 100 étoiles avec données individuelles $\rightarrow \pi, \mu, v_r$

$\frac{\sigma_\pi}{\pi} \simeq 2.5\%$, $\sigma_{B,V} \lesssim 0.01$ mag $\rightsquigarrow \sigma_{B-V} \simeq 0.01$ mag, $\sigma_{M_V} \simeq 0.05$ mag

[Fe/H] par spectroscopie et photométrie

[Fe/H] = $0.14 \pm 0.05 / 0.144 \pm 0.013$ dex

masses pour 5 systèmes binaires: $\rightsquigarrow \frac{\sigma_M}{M} \sim 1 - 25\%$

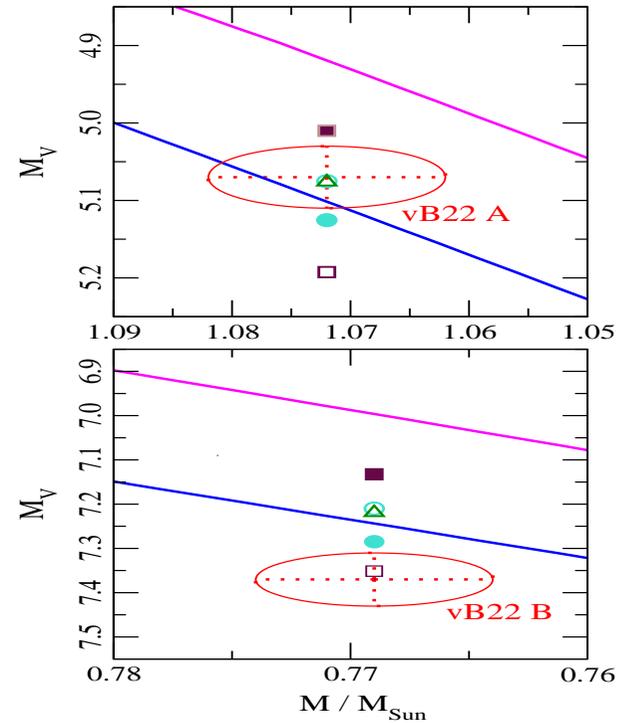
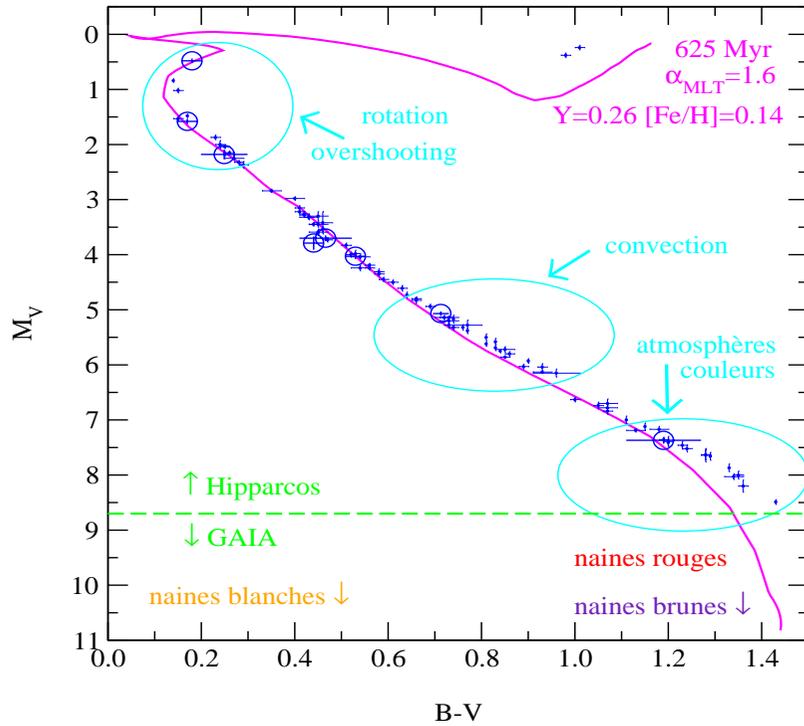
dont binaire spectroscopique à éclipses vB22

$\frac{\sigma_\pi}{\pi} \simeq 1.5\%$ $\rightsquigarrow \frac{\sigma_{M_V}}{M_V} \lesssim 1\%$ $\frac{\sigma_M}{M} \lesssim 1\%$ $\frac{\sigma_R}{R} \sim 2 - 3\%$

étude : relation masse-luminosité et diagramme HR

\rightsquigarrow **abondance d'hélium, âge**

de Brujine et al 00, Cayrel de Strobel et al 97, Grenon 00, Torres et al 97, Lebreton et al 01



Lebreton, Fernandes, Lejeune 2001

GAIA : distances individuelles et même type d'étude possible pour :

120 amas \rightarrow 1 kpc: $\sigma_{m-M, V < 15} \lesssim 0.02$ mag ; $\sigma_{\langle m-M \rangle} \lesssim 0.01$ mag ; 10 binaires/amaz

prévoir grilles fines : masse, Y, Z, paramètres de la physique

prévoir isochrones, conversion vers les \neq plans couleur-magnitude

prévoir extensions : PMS ; très petites masses, autres ?

étude de la structure et évolution du disque galactique

requiert l'estimation des âges des étoiles A-F

âge par comparaison isochrones théoriques/observations L, T_{eff}

précision dépend de masse, stade évolutif, étoile seule ou en groupe

étoile AIV-V; $M \sim 2M_{\odot}$, $M_{\text{bol}} = 1$ mag, $T_{\text{eff}} = 8500$ K, $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$.

erreur %	$a_{T_{\text{eff}}}$	a_L	$a_{\alpha_{\text{MLT}}}$	$a_{\alpha_{\text{ov}}}$	a_Y	a_Z	a
2001 - d=200 pc	13	6	0.3	24	11	12	32
2015 - d=1 kpc	3	0.3	0.2	5	4	7	10

Lebreton, Michel, Goupil, Baglin, Fernandes 1995 ; Lebreton 2001

2001 : après Hipparcos : $d \lesssim 200$ pc \leadsto quelques 10^3 étoiles A-F

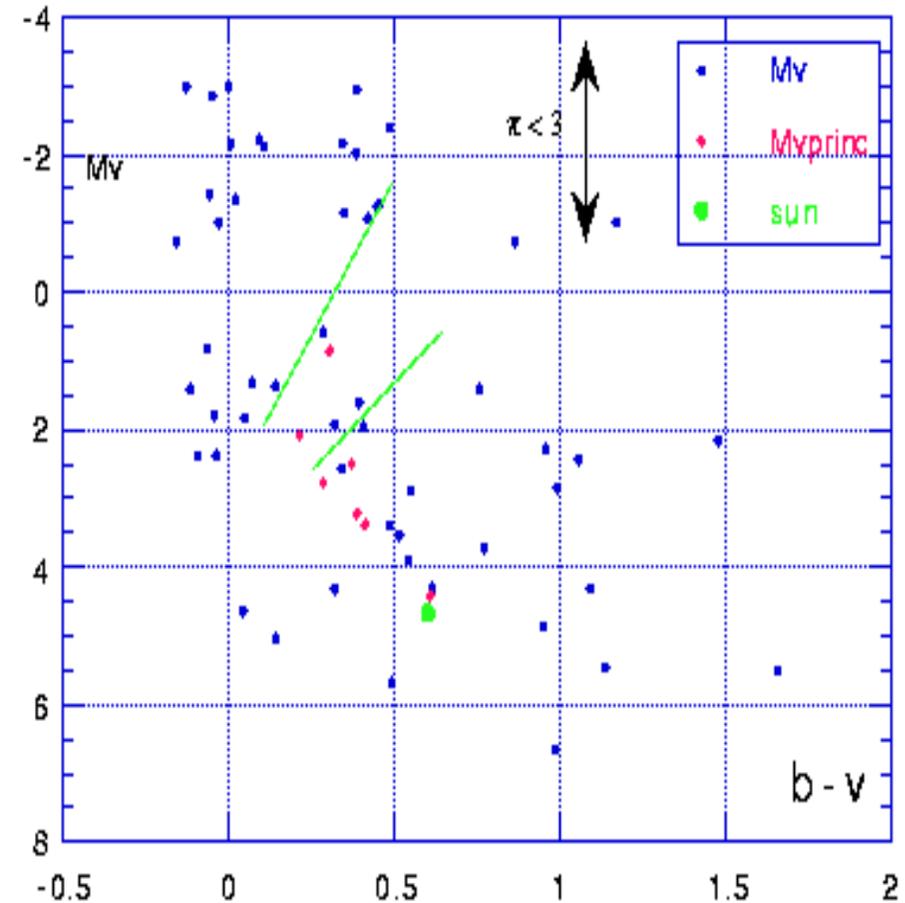
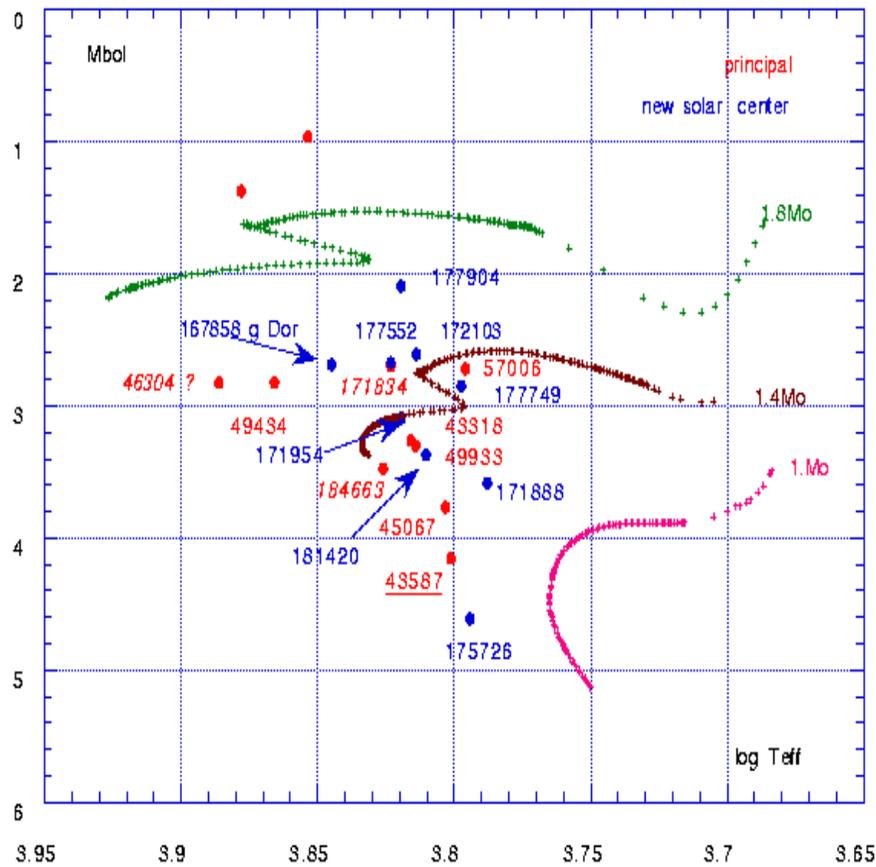
2015 : après GAIA : $d < 1$ kpc \leadsto $5 \cdot 10^5$ étoiles A

prévoir grilles d'isochrones :

physique : rotation, overshooting

précision moyenne ; large domaine de compositions chimiques

modélisation pour l'astérosismologie : COROT



pour l'analyse sismologique il faudra trouver pour chaque cible :

multiplets (M, Y, Z, t, physique) \rightsquigarrow modèles bien placés dans le DHR

modélisation des étoiles pulsantes : GAIA, OGLE...

problèmes physiques : convection, opacités ...

calibration des distances extragalactiques, évolution chimique via \dot{M}

GAIA : tous les indicateurs de distance (π, μ) \rightsquigarrow position précise bande d'instabilité

Céphéides		RR Lyræ		LPV : Miras	
Galaxie	LMC-SMC	\rightarrow 3-5 kpc	Galaxie	\rightarrow 3 kpc	Galaxie
$\sigma_\pi/\pi < 1\%$	10-30%	$< 1\%$	$< 10\%$	$< 1\%$	$< 6\%$
P-L-C-Z			M_V	P-L-Z	
point zéro/pente/dispersion					

prévoir poursuite des extensions de CESAM :

masses intermédiaires, stades avancés (fusion de l'hélium et au-delà)

\hookrightarrow diagramme HR : boucles bleues, branche horizontale, AGB

physique appropriée : nucléaire, convection, mélange, perte de masse