

# CESAM à Meudon et à Rennes

Y. Lebreton (GEPI, Paris et Rennes)

M.J. Goupil (LESIA, Paris)

A. Baglin, M. Auvergne (LESIA, Paris)

D. Cordier (Rennes, Varsovie)

R. Samadi (LESIA, Paris)

E. Michel (LESIA, Paris), J.C. Suarez (Grenade)

J. Fernandes, J.P. Marques (Coimbra, Porto)

M. Hernandez, L. Fox (IAC, Espagne)

J. Lochard (LESIA, Paris)

A. Mazumdar (LESIA, Paris)

A. Mérand (LESIA, Paris)

et bien sûr P. Morel ☺

# Travaux effectués

Extensions du domaine d'application de CESAM

Mise en place de modules de physique :

- Physique standard et non standard

Interfaçage avec d'autres programmes

Calcul intensif !

Soleil et étoiles de type solaire :  
évaluation des amplitudes d'oscillation  
R.Samadi, M.J. Goupil, Y. Lebreton, C. Van 't Veer

tests de 3 formulations de la convection : MLT, CM, CGM

mise en place de la formulation de Canuto, Goldman, Mazzitelli (R.S.)

modifications dans Canuto et Mazzitelli (R.S.)

lois  $T(\tau)$  : physique cohérente avec l'intérieur

lois  $T(\tau)$  calculées à partir du code ATLAS9 (C.VV., R.C.)

même formulation de la convection, mêmes opacités

plusieurs valeurs de  $[\text{Fe}/\text{H}]$

interpolation dans une grille  $T(\tau, T_{\text{eff}}, \log g, [\text{Fe}/\text{H}], \alpha_{\text{conv}})$

## Calibration de modèles solaires (CESAM2 puis CESAM4)

tests de diverses options physiques, comparaison avec d'autres travaux :

– EOS, atmosphère, convection, diffusion

calcul précis du profil de  $(\nabla - \nabla_{\text{ad}})$  dans les couches extérieures :

– nombre de couches dans l'atmosphère  $n_{\text{atm}} = a n_{\text{atm}} * p n_{\text{atm}} \geq 100$

–  $\tau_{\text{max}} = 20$

option precision=sa du cesam.don puis passage par for037.f

calibration : précision relative  $10^{-5}$  pour  $L/L_{\odot}$  et  $R/R_{\odot}$

calib.f : 3 versions selon le modèle de convection MLT, CM, CGM

– avec dérivées  $(dL/d\alpha)_Y$ ,  $(dL/dY)_{\alpha}$ ,  $(dR/d\alpha)_Y$ ,  $(dR/dY)_{\alpha}$  appropriées

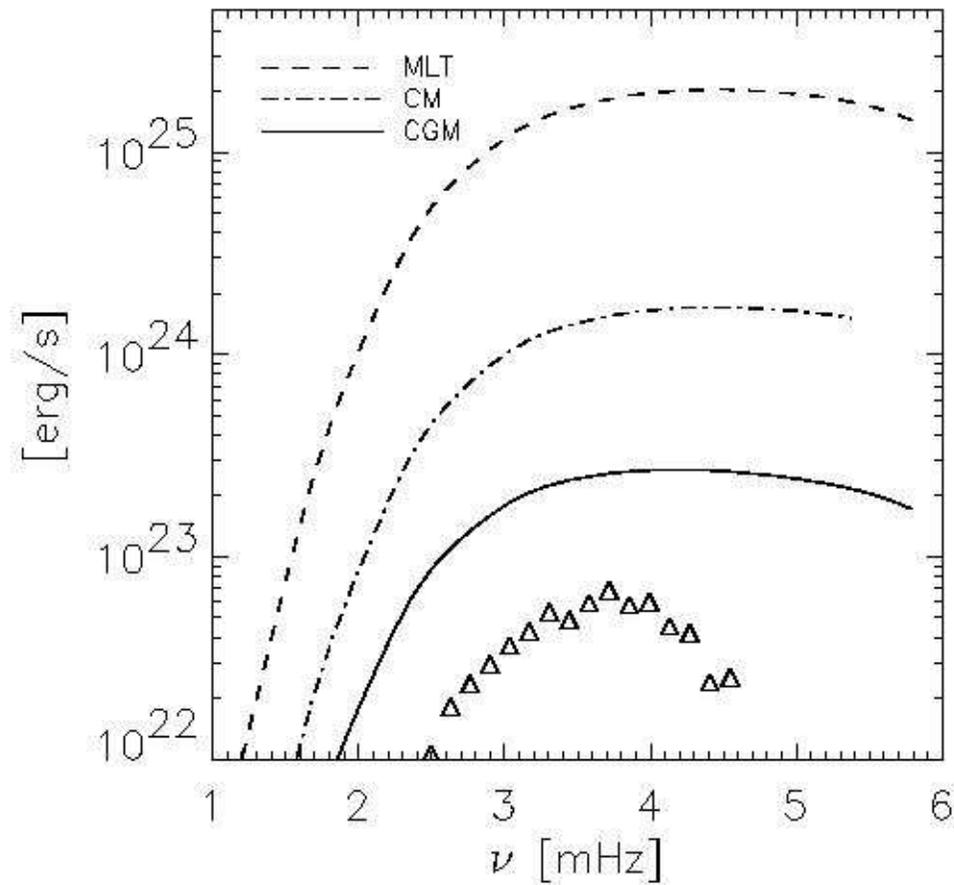
## Calcul de modèles :

Procyon,  $\alpha$  Tri,  $\eta$  Boo,  $\beta$  Vir,  $\pi$  Ori,  $\beta$  Hyd

## Interfaçage avec plusieurs codes d'oscillation :

code d'Åhrus, code FILOU de Meudon, code de Varsovie

# Taux d'excitation des modes p pour 3 formulations de la convection



Samadi et al. 2003, en préparation

# Préparation et exploitation de la mission Hipparcos

Modélisation de binaires aux données précises

J. Fernandes, Y. Lebreton, A. Baglin, P. Morel, M. Auvergne

Modélisation des étoiles proches : disque et halo

Y. Lebreton, R. Cayrel, A. Baglin, J. Fernandes

Modélisation d'amas galactiques et globulaires

Y. Lebreton, J. Fernandes, A. Gomez, T. Lejeune

## **Extension de CESAM vers les petites masses ( $M > 0.5M_{\odot}$ ) :**

### **équation d'état :** mise en place de formalismes

- mise en place puis débogage de l'EOS de CEFF (analytique ou tables)
- implémentation de l'EOS de Saumon-Chabrier (tables)

### **opacités :** mise en place puis actualisation de tables

- raccord soigné de tables couvrant les divers domaines du plan ( $\rho, T$ )
  - intérieur  $T > 10^4$  K : OPAL96 + Los Alamos (très hautes T)
  - atmosphère : Alexander & Ferguson (1994) ou Kurucz (1991)
  - divers mélanges :
    - solaire (GN93), enrichi en éléments  $\alpha$  ( $[\alpha/\text{Fe}] = +0.4$  dex)

### **abondances :**

- sous-programme pour le calcul des  $X_i$  de mélanges quelconques

### **atmosphères :** lois $T(\tau)$ Kurucz pour divers $[\text{Fe}/\text{H}]$ : disque et halo

- interpolation de la loi  $T(\tau)$  dans une grille  $T-\tau([\text{Fe}/\text{H}], T_{\text{eff}}, \log g)$

## **Interfaçage de CESAM avec d'autres codes :**

*Conversions DHR théorique vers plans couleur-magnitude, couleur-couleur :*  
**utilisation de la bibliothèque de spectres synthétiques BaSeL (T. Lejeune)**

entrées pour BaSeL :  $L$ ,  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ ,  $Y$ ,  $Z$

sorties de BaSeL : magnitudes, indices de couleur pour  
divers systèmes photométriques : UBVRI, Strömgren, Genève, EROS, etc.

*Calcul d'isochrones :*

**code développé à Meudon (Y.L) et/ou code de Genève**

entrées pour le code d'isochrones :

pour chaque tracé d'évolution (i.e.pour chaque masse considérée)

données de points particuliers pour des stades d'évolution remarquables

développement d'un ensemble de programmes pour sélectionner ces points

programmes peu automatisables

## Calcul de grilles de trajets évolutifs et d'isochrones associés :

masses de 0.5 à 12  $M_{\odot}$

[Fe/H] de +0.5 à -2.5 dex

de la PMS au début de l'ascension de la RGB

## phases de l'évolution très différentes de la PMS à la RGB

options de précision de CESAM :

- proposées via '*precision=* ' dans le namelist *nl\_espace*
- ne conviennent pas toujours pour un calcul complet
- modifiables dans *resout.f*

ajout dans le *cesam.don* d'une namelist *nl\_preci* contenant ces paramètres

## Calcul de nombreux modèles pour des “objets particuliers”

- **binaires, amas**

variation fine des paramètres au voisinage de ceux de l'objet observé

- masse, composition, âge
- longueur de mélange, overshooting, sédimentation, EOS, loi  $T(\tau)$

```
$NL_ESPACE
MTOT = 1.215
MDOT = 0.0
DER_NUM = F
PRECISION = 'y!'
TAU_MAX = 10.0
LIM_RO = T
$END

$NL_TEMPS
AGEMAX = 1000000.0
DTLIST = 100000000.0
X_STOP = 2.000000e-01
LOG_TEFF = 10.00
T_STOP = 50000000.0
ARRET = 'else'
$END

$NL_CHIM
X0 = 7.000000e-01
Y0 = 2.600000e-01
ZSX0 = 0.0117264
Z_CTE = F
D_TURB=0.
DIFFUSION = F
F_RAD=F
MITLER = T
$END
```

```
$NL_ROT
W_ROT = 0.0
ROT_SOLID = T
$END

$NL_CONV
ALPHA = 1.6
CPTURB = 0.0
OVSHTS = 0.0
OVSHTI = 0.0
JPZ = F
LEDOUX = F
$END

$NL_OPA
F_OPA = 'GN93O_S92A'
'2
'3
'4
'5
'6
'7
'8
$END

$NL_NUC
F_NUC = "
$END
```

```
$NL_PRECI
M_QS = 2
M_CH = 2
ORDRE = 2
PRECIX = 1.e-06
PRECIT = 0.005
RO_TEST = 0.01
PSI0 = 0.09
D_GRAV = 0.05
LOC_ZC = 1.e-6
DTMAX = 75.
DT0 = 10.
INI0 = 5
AN_ATM = 0.5
KIPP = F
EN_MASSE = T
CTEM = 15.
CTER = 15.
MVT_DIS = T
$END
```

# Rotation et sismologie des étoiles $\delta$ Scuti

J.C. Suarez, M. Hernandez, E. Michel, M.J. Goupil, Y. Lebreton

Interprétation des observations multisites de STEPHI

Préparation de la mission COROT

modélisation d'étoiles  $\delta$  Scuti membres d'amas galactiques :  
situées dans la région du coude des amas  
modèles sensibles à la rotation et à l'overshooting

travail qui a nécessité le calcul d'isochrones  
mise en place de la rotation  
(cf. exposé de JC Suarez et MJ Goupil)

# Modélisation pré séquence principale

J.P. Marques, A. Mérand, M.J. Goupil, Y. Lebreton, P. Morel, J. Fernandes

## **Sismologie :**

comparaison fréquences d'oscillation pour 2 étoiles  $\delta$  Scuti, l'une sur la PMS, l'autre en postMS (M. Suran et al, 2001)

modélisation de binaires  $\delta$  Scuti de PMS (stage DEA d'A. Mérand)

## **Effets des conditions initiales sur le modèle de séquence principale :**

travail en cours :

interfaçage de CESAM avec le code hydrodynamique de Stahler et Palla traitant l'effondrement gravitationnel en protoétoile

(cf. exposé de J.P. Marques)

# Extension vers les stades avancés

D. Cordier, Y. Lebreton, M.J. Goupil

## Objectifs :

### **modéliser des étoiles de masse intermédiaire**

- Masses de 3 à 15  $M_{\odot}$
- Séquence principale et Céphéides (fusion He)
- diverses métallicités : Galaxie, LMC, SMC

### **relation période-luminosité-métallicité-couleur**

### **interprétation des observations d'OGLE**

## Interventions dans CESAM :

Extension du réseau des réactions thermonucléaires :

- cycle CNO complet, fusion de He

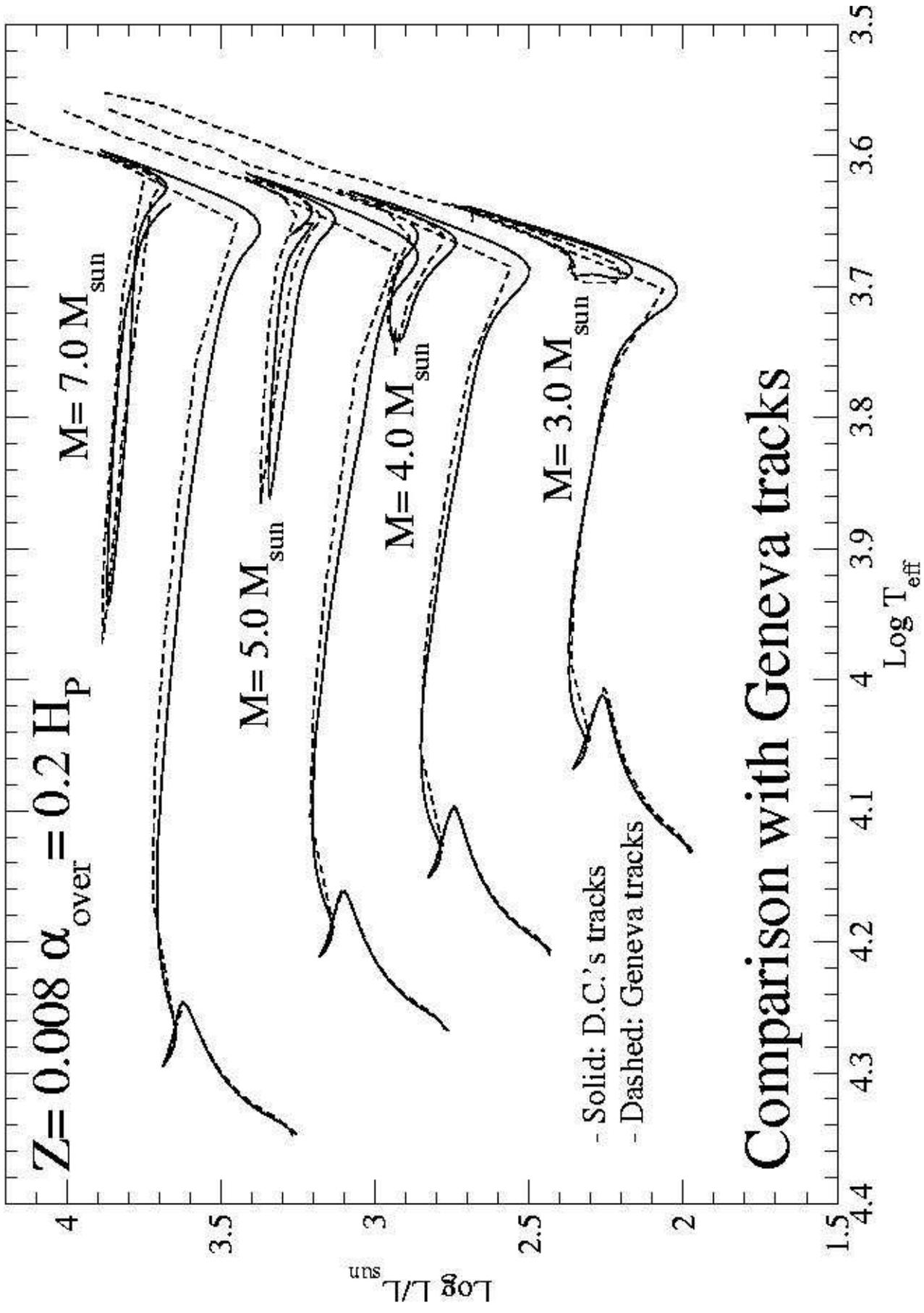
Extension des tables d'opacité

- tables de Los Alamos : les proportions de He, C, O dans le mélange varient pendant la fusion de He

Mise en place du critère de Roxburgh pour l'overshooting

- actuellement seulement dans Cesam2 et 3

Prescriptions empiriques pour la perte de masse

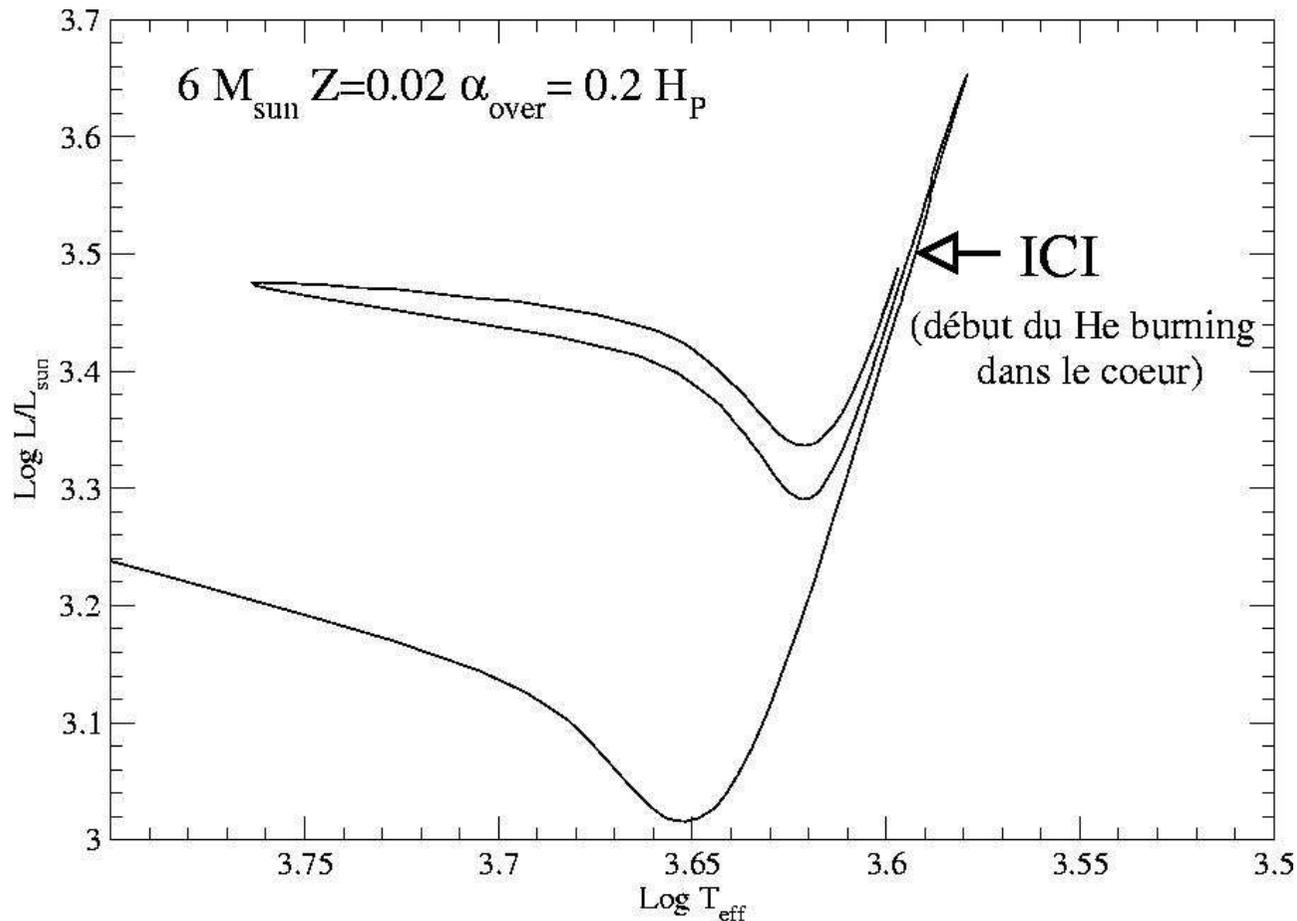


## Comparison with Geneva tracks

# Quelques problèmes numériques

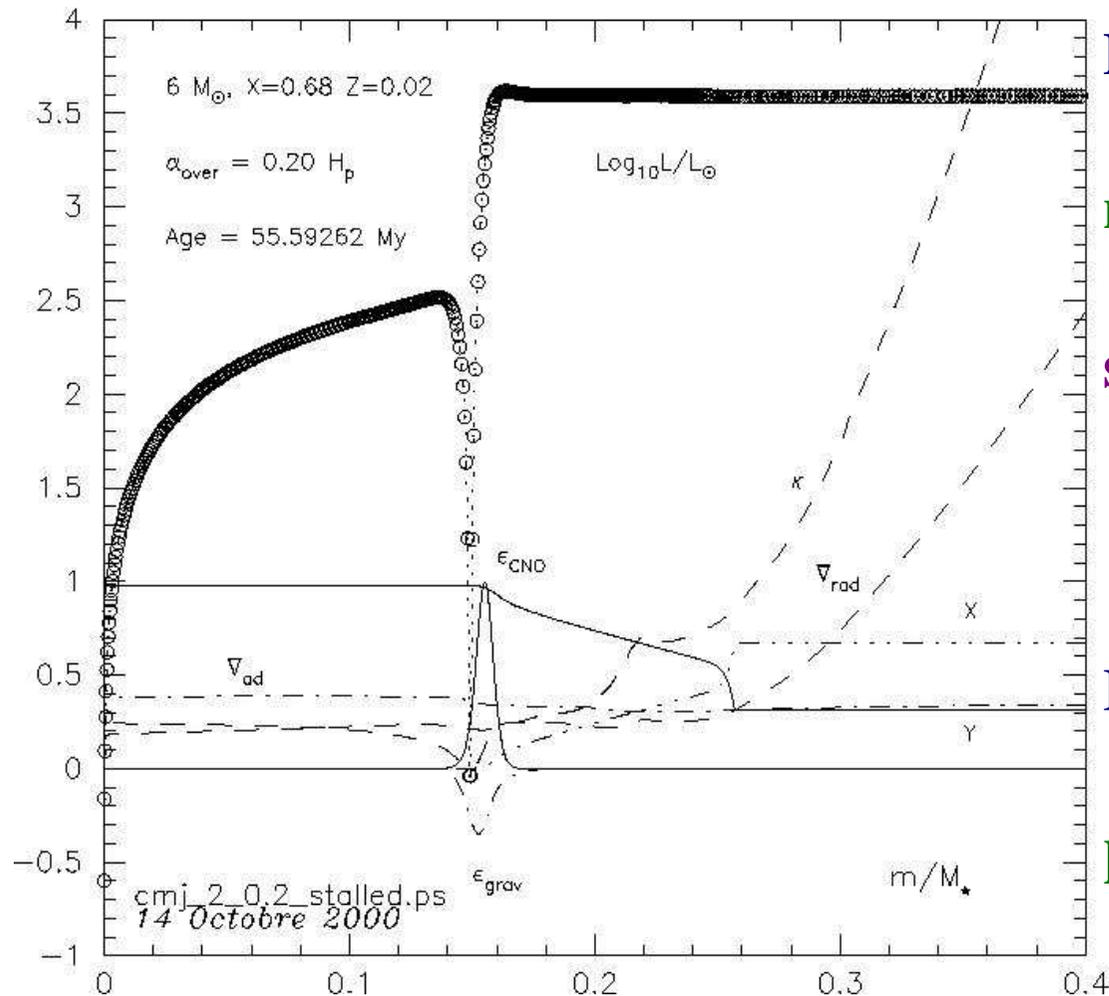
## Pour certaines phases de l'évolution SP et post SP

- Nécessité d'adapter les paramètres numérique mais



Parfois :  
calcul bloqué  
ici au  
point de fusion de He

## Sources des difficultés de convergence



Distribution des points automatisée :

nb. insuffisant dans la région critique

solution : désautomatiser ?

Luminosités négatives interdites :

pb. du choix de la variable  $(L/L_{\odot})^{2/3}$

Solution à trouver pour pouvoir modéliser :

les étoiles massives, les petites masses vers les RR Lyrae

# COROT Hare et Hound exercise

A. Mazumdar, J. Lochard, R. Samadi, E. Michel, M.J. Goupil, Y. Lebreton

## **Sélection des cibles à observer par COROT :**

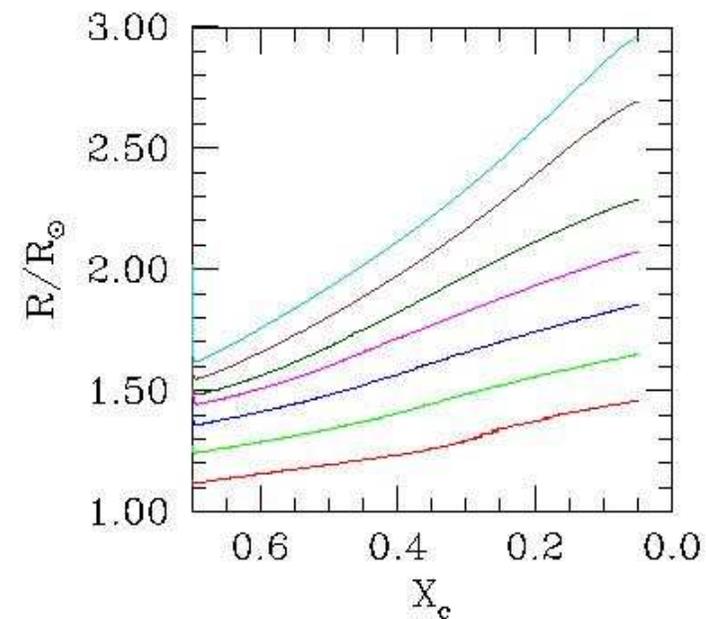
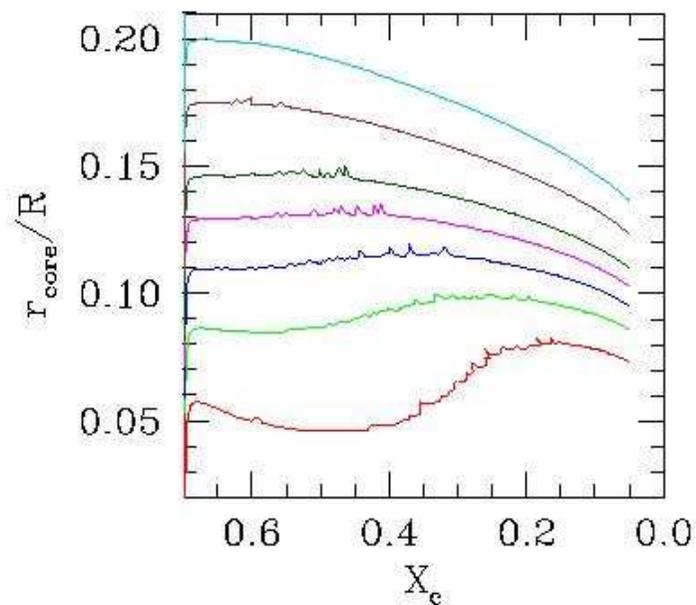
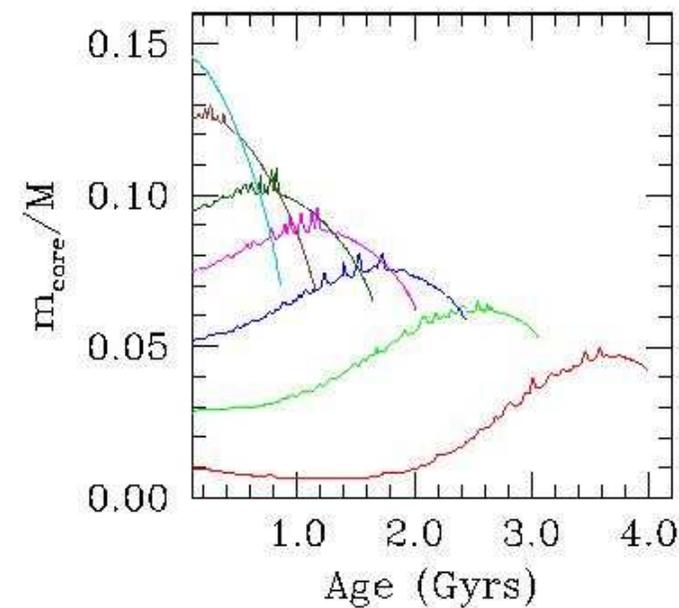
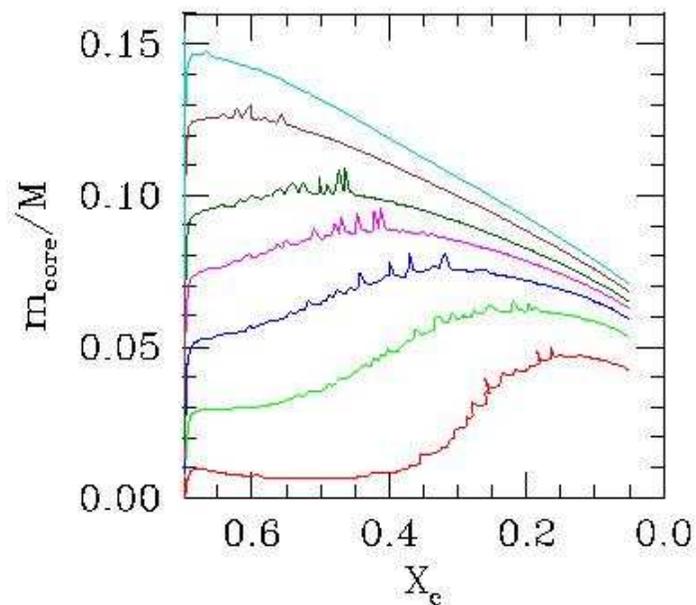
**pour quelles étoiles potentiellement observables l'analyse sismologique fournira-t-elle le plus d'informations ?**

- calcul d'un modèle représentant une cible potentielle
- simulation de données d'observation à partir du modèle

puis :

- à l'aide des seules pseudodonnées d'observation :
- on cherche à retrouver les caractéristiques du modèle initial  
(cf. exposé de J. Provost)

**pb. numériques :**  
**étoiles dont le**  
**coeur convectif**  
**s'accroît**  
**avec l'évolution**

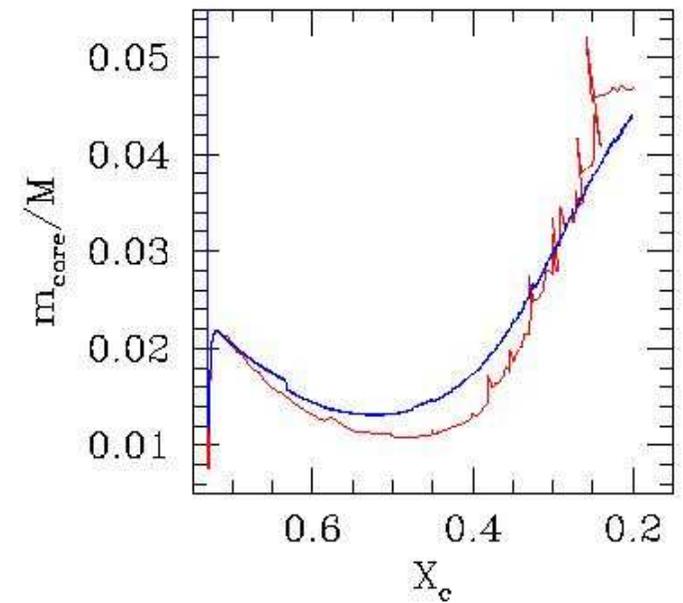
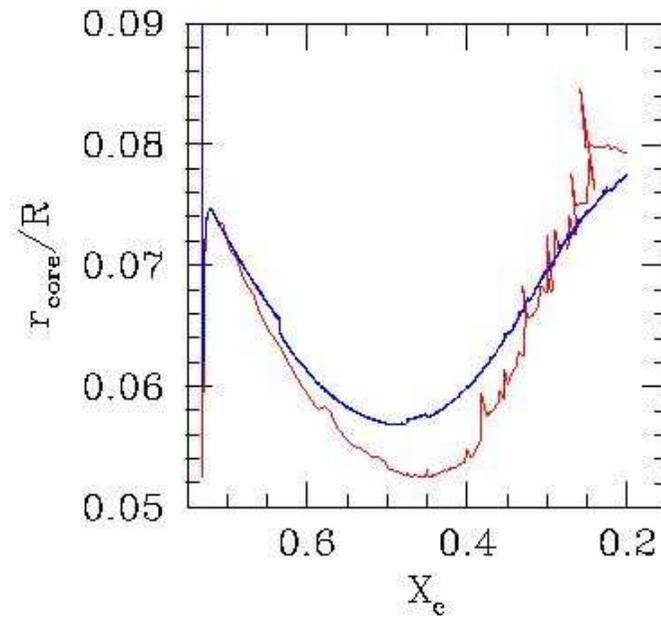
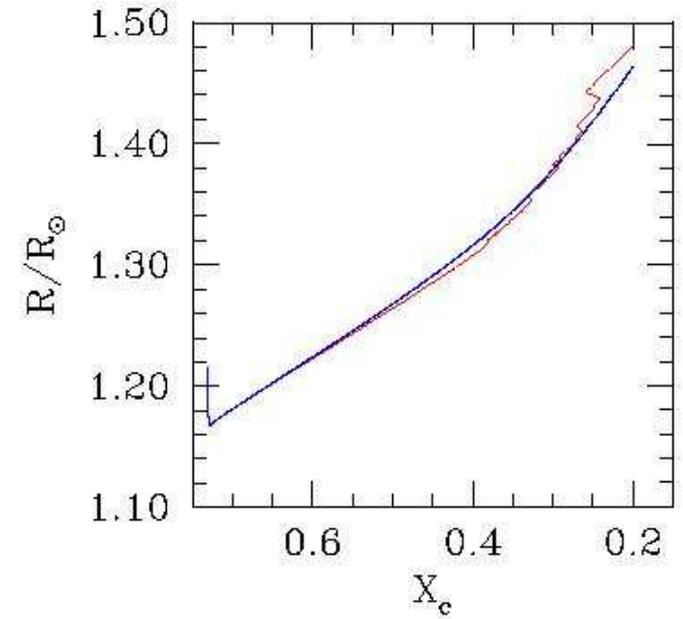
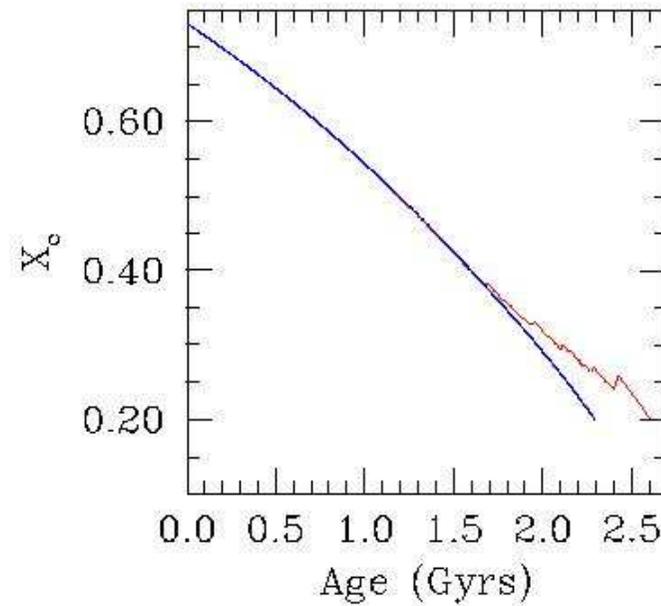


— 1.2 — 1.3 — 1.4 — 1.5 — 1.6 — 1.8 — 2.0

**Solution ?**

**modifier les options  
numériques  
en particulier  
precit**

**mais  
énormément de  
modèles !**



— 1.215 w 'sa'      — 1.215 w 'ya'

