

# Résultats scientifiques obtenus avec CESAM

**C**ode d'  
**E**volution  
**S**tellaire  
**A**adaptatif et  
**M**odulaire

V 4.4 <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> P.Morel, Astronomy and Astrophysics (Supplement Series) 124 (1997) 597 -- 614

# PLAN

## I : Historique

**GDR n°131 (1987--1995)** dont réunions du groupe code

**Initiateurs** : A. Baglin, E. Schatzman, P. Morel (début en 1987).

## II : Vie du code

Mise à disposition « *gratuite* » de CESAM ( © ) au public sur la toile (Web) depuis 1997 !

**Contributions** : Voir la section sur le contenu du code

### **Aspects numériques :**

**Pierre MOREL** : Analyse numérique,  
programmation (F77, F90, F95)  
**Bernard Pichon** (depuis 2001) : programmation (F95, F2k, POO)  
→ voir perspectives

**Extension** : CEPAM par Tristan Guillot (1991-1994)

## III : Exploitation

Voir la suite de l'exposé .... !!!

## IV : Perspectives

Voir les conclusions .... !!!

## **Equipes des collaborations directes (dès le départ) :**

OCA (Cassini)	:	G. Berthomieu, P. Morel, B. Pichon, J. Provost
Paris-Meudon (Dasgal, Daec)	:	M. Auvergne, A. Baglin, R. Cayrel, M.-J. Goupil, Y. Lebreton, E. Schatzman, C. Van't-Veer,
GONG (validation du code)	:	J. Christensen-Dalsgaard

## **Laboratoires concernés (actuellement) :**

- En France :

Observatoire de la Côte d'Azur : G.D. Cassini  
Observatoire de Paris-Meudon : DASGAL à Meudon + Rennes  
Service d'Astrophysique du CEA à Saclay

- À l'étranger :

Coimbra (Portugal)  
Bombay (Inde)  
Vienne (Autriche)  
? ? ?

## **Thèses** (par ordre chronologique avec indication du directeur de thèse) :

Tristan Guillot	1994	P. Morel
Nathalie Audard	1994	J. Provost
João Manuel Fernandes	1996	A. Baglin + Port.
Fatma Soufi	1996	A. Baglin
Allan Sacha Brun	1998	J.-P. Zahn
Thierry Corbard	1998	G. Berthomieu
M. Hernández	1998	E. Michel (?) + Esp.
Caroline Barban	1999	M. Auvergne
Daniel Cordier	2000	Y. Lebreton
Laurent Piau	2001	S. Turck-Chièze
Lionel Bigot	2002	J. Provost

# Contenu du code

## Physique implantée :

Implémentation : Pierre Morel

Aides, conseils et *debug* de/par :

### *Physique locale*

Equations d'état (EFF, CEFF, )	:	M. Auvergne, A. Baglin, M. Gabriel,
(OPAL, GONG)		Y. Lebreton, J. Provost
Opacités	:	N. Audard, S. Brun, G. Houdek,
		Y. Lebreton
Réactions thermonucléaires	:	M. Gabriel, Y. Lebreton, B. Pichon,
		S. Turck-Chièze

### *Physique globale*

Turbulence	:	E. Schatzman
Pression turbulente	:	S. Brun
Convection	:	M.-J. Goupil, J. Provost
Rotation	:	N. Audard, M.-J. Goupil
Diffusion	:	P. Morel
Accélération radiative	:	G. Alécian

### *Autres aspects astrophysiques*

Atmosphère	:	R. Cayrel, C. Van't-Veer
Neutrinos	:	G. Berthomieu,

### *Autres aspects techniques*

:	P. Morel (mode d'emploi)
:	M. Auvergne (procédures Unix)

# Résultats

## Soleil :

- Modèles standards e.g. le Soleil comme 'laboratoire de physique'
  - a) « Updated solar models » by P. Morel *et al.* , A&A 327 (1997) 349  
Introduction de la diffusion microscopique (amélioration des fréquences)  
et le la perte de masse (amélioration de l'épuisement du lithium)  
Mise en évidence du besoin de meilleure opacités et d'équation d'état.
  - b) « Standard solar models in the light of new helioseismic constraints.  
I : The solar core » by A.S. Brun *et al.* , ApJ 506 (1998) 913  
Introduction de quelques (autres) ingrédients physiques e.g. taux de réaction  
d'Adelberger *et al.*, de nouvelles tables d'opacités et d'équation d'état  
→ Figure 1
  - c) « Solar models and NACRE thermonuclear reaction rates »  
by P. Morel *et al.* , A&A 350 (1999) 275  
Utilisation de la nouvelle compilation épéenne de taux de réactions et  
comparaison avec celle plus spécifique d'Adelberger *et al.*  
→ Figure 2  
→ Figure 3
  - d) « About the time evolution of a solar model » by P. Morel *et al.* , A&A 353 (2000) 771
- Neutrinos
  - a) « Standard solar models with CESAM code : neutrinos and  
helioseismology » by G. Berthomieu *et al.* , A&A 268 (1993) 775  
Un des premiers de la série ... et un des premiers articles fait avec CESAM !
  - b) « Solar neutrino emission deduced from a seismic model »  
by S. Turck-Chièze *et al.* , ApJ 555 (2001) L69  
Un des derniers de la série ...  
  
Remarque : aucune différence ( Cl : de 7.43 à 7.44 , Ga : de 127.7 à 127.8 ) !
  - c) « Diffusion near the solar core » by P. Morel and E. Schatzman , A&A 310 (1996) 982

- Héliosismologie :

- a) « Incorporating the atmosphere in stellar structure models : the solar case »  
by P. Morel *et al.* , A&A 286 (1994) 91  
Nécessité d'avoir un raccord *correct* de l'atmosphère pour le calcul des  
fréquences d'oscillations.

Vitesse du son :

- b) « Solar neutrino emission deduced from a seismic model »  
by S. Turck-Chièze *et al.* , ApJ 555 (2001) L69  
→ Figure 4
- c) « Structure of the solar core : Effect of asymmetry of peak profiles » by S. Basu *et al.* ,  
ApJ 535 (2000) 1078

Tachocline et rotation :

- d) « Standard solar models in the light of new helioseismic constraints.  
II : Mixing below the convective zone » by A.S. Brun *et al.* ,  
ApJ 525 (1999) 1032  
Introduction de la problématique de la tachocline solaire ; problème du  
lithium dans la séquence principale.
- e) « Shear turbulence beneath the solar tachocline » by E. Schatzman *et al.* ,  
A&A 364 (2000) 876
- f1) « Solar internal rotation from LOWL data : A 2D regularized least-square inversion  
using B-Splines » by Th. Corbard *et al.* , A&A 324 (1997) 298
- f2) « Inferring the equatorial solar tachocline from frequency splittings »  
by Th. Corbard *et al.* , A&A 330 (1998) 1149  
Utilisation de CESAM (avec un code d'inversion et un autre d'oscillations)  
pour obtenir la carte de rotation (interne) du Soleil.
- f3) « Non linear regularization for helioseismic inversions : Application for the study of  
the solar tachocline » by Th. Corbard *et al.* , A&A 344 (1999) 696

Modes  $g$  et  $p$  :

- g) « Low-frequency p- and g- mode solar oscillations » by J. Provost *et al.* ,  
A&A 353 (2000) 775
- h) « Excitation of stellar p-modes by turbulent convection. II : The Sun »  
by R. Samadi *et al.* , A&A 370 (2001) 147

## (Autres) Etoiles :

- Abondances

- a) « Microscopic diffusion and subdwarfs » by P. Morel and A. Baglin ,  
A&A 345 (1999) 156

Importance d'inclure à la fois la diffusion et une procédure de calibration pour mieux expliquer la positionnement de certaines étoiles dans le diagramme HR (*cf.* aussi l'article suivant)

→ Figure 5

- b) « The Hipparcos HR diagram of nearby stars in the metallicity range  $-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.3$  : A new constraint on the theory of stellar interiors and model atmospheres » by Y. Lebreton *et al.* , A&A 350 (1999) 587

Introduction de la correction non-ETL de F. Thévenin et T. Idiart pour l'amélioration des analyses de ces mêmes observations.

→ Figure 6

- c) « Lithium depletion in the pre-main sequence solar-like stars »  
by L. Piau et S. Turck-Chièze , Prépublication

Étude du problème du lithium pour des étoiles de 0.8 à 1.4  $M_{\text{sun}}$

Pour en savoir plus : Thèse de Laurent PIAU le Vendredi 7 Décembre

- Procyon :

- c) « Solar-like oscillations of Procyon A : Stellar models and time series simulations versus observations » by C. Barban *et al.* ,  
A&A 350 (1999) 617

- Astérosismologie :

« Généralités » :

- a) « Oscillations of a rotating stars : A non-pertubative theory »  
by B. Dintrans and M. Rieutord , A&A 354 (2000) 86  
Utilisation de CESAM. par nos collègues toulousains ( ! )  
pour avoir un modèle initial plus réaliste.
- b) « Seismic study of stellar convective cores »  
by A. Mazumdar and H. M. Antia , A&A 377 (2001) 192  
Utilisation de CESAM. par nos collègues indiens !
- c) « Comparative seismology of pre- and main- sequence stars in the instability trip »  
by M. Suran *et al.* , A&A 372 (2001) 233
- d1) « Seismological properties of intermediate-mass stars » by N. Audard and J. Provost ,  
A&A 282 (1994) 73
- d2) « Seismological effects of convective-core overshooting in stars of intermediate mass »  
by N. Audard *et al.* , A&A 297 (1995) 427

Étoiles (ro)Ap :

- a) « The acoustic cut-off frequency of roAp stars » by N. Audard *et al.* ,  
A&A 335 (1998) 954
- b) « Non-axisymmetric oscillations of Ap stars » by L. Bigot *et al.* ,  
A&A 356 (2000) 218  
Pour en savoir plus : Thèse de Lionel BIGOT, début 2002 @ Nice

Étoiles  $\delta$  Scuti :

- a1) « Seismology of  $\delta$  Scuti stars in the Praesepe cluster. **I** : Ranges of unstable modes as predicted by linear analysis versus observations »  
by E. Michel *et al.* , A&A 342 (1999) 153
- a2) « Seismology of  $\delta$  Scuti stars in the Praesepe cluster. **II** : Identification of radial modes and their associated stellar parameters »  
by M. N. Hernández *et al.* , A&A 338 (1998) 511



## (Calibration des) Etoiles doubles :

- $\alpha$  Cen A :

- a) « Calibrations  $\alpha$  Cen A & B » by P. Morel *et al.* , A&A 363 (2000) 675  
Prédiction des fréquences (Observations de François Bouchy *et al.* )

- $\zeta$  Her

- a) « Contribution to the study of the visual binary  $\zeta$  Herculis :  
A detailed analysis of  $\zeta$  Herculis A »  
by Y. Chmielewski *et al.* , A&A 299 (1995) 809

→ Figure 7

- b) « The  $\zeta$  Herculis binary system revisited : Calibration and seismology »  
by P. Morel *et al.* , A&A 379 (2001) 245  
De meilleures observations (Hipparcos) pour une meilleure calibration.

→ Figure 8

- $\eta$  Cas ,  $\xi$  Boo , 70 Oph et 85 Peg :

- a) « Fundamental stellar parameters for nearby visual binary stars :  $\eta$  Cas ,  
 $\xi$  Boo , 70 Oph and 85 Peg ; Helium abundance, age and mixing length  
parameter for low mass stars » by J. Fernandes *et al.* ,  
A&A 338 (1998) 455

Aussi : Détermination d'une valeur pour le rapport  $\Delta Y/\Delta Z$  (voir plus loin)

Remarque : Plus il y aurait de points (*i.e.* de systèmes doubles étudiés),  
meilleur ce serait !

→ Figure 9

- $\iota$  Peg

- a) « Calibration of  $\iota$  Pegasi system » by P. Morel *et al.* ,  
A&A 354 (2000) 636

→ Figure 10

## Amas :

- Age et abondances : e.g. les Hyades

- a) « The Hyades : distance, structure, dynamics, and age »  
by M. A. C. Perryman *et al.* , A&A 331 (1998) 81  
Calcul d'un diagramme d'amas (par Yveline) pour la détermination de  
certains paramètres.

→ Figure 11

- b) « The helium content and age of the Hyades : Constraints from five  
binary systems and Hipparcos parallaxes » by Y. Lebreton *et al.* ,  
A&A 374 (2001) 540  
Même travail avec des données plus récentes....

- c) « A Hipparcos study of the Hyades open cluster : Improved colour-absolute  
magnitude and Hertzsprung-Russell diagrams » by J. H. J. de Bruijne *et al.* ,  
A&A 367 (2001) 111  
Utilisation de modèles obtenus avec CESAM dans l'article cité en a)

## Abondances :

- Evolution chimique de la Galaxie

- a) « On the width of the theoretical lower main sequence : Consequences  
for the determination of the  $\Delta Y/\Delta Z$  ratio in the solar neighbourhood »  
by J. Fernandes *et al.* , A&A 311 (1996) 127

- Deutérium primordial solaire

- a) « A reestimate of the protosolar ( $^2\text{H}/^1\text{H}$ )<sub>p</sub> ratio from ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ )<sub>sw</sub> solar  
wind measurements » by D. Gautier and P. Morel , A&A 323 (1997) L9

# Perpectives & Développements

- Stades avancés ? ( Besoin d'opacités ! )
- Amélioration des ingrédients physiques :  
e.g. EOS, convection, réactions et réseau nucléaire,  
opacités (selon la composition chimique)
- Restructuration du code (POO, Fortran 95, F2k)
- Code 2D (physique globale vs. physique locale)  
→ cf. Michel Rieutord ...

## Conclusions

- Mise à disposition publique de CESAM à la communauté scientifique qui exploite ainsi depuis plusieurs années un code de structure et d'évolution stellaire adaptatif et modulaire <sup>2</sup>
- Les développements effectués par les utilisateurs de CESAM sont mis systématiquement à la disposition de la communauté lorsqu'ils sont communiqués !

---

<sup>2</sup> Parmi les '*tiroirs*' ainsi disponibles, citons par exemple, la possibilité de faire des modèles avec/sans diffusion, avec/sans PMS, ... , avec différentes précisions numériques, avec plusieurs phénoménologies pour la convection, ... .