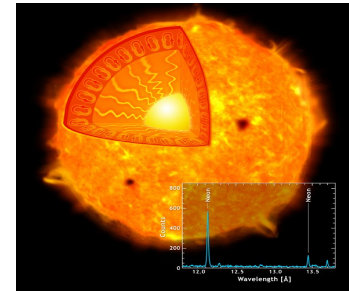


Des données atomiques précises à la modélisation astrophysique: Opacités stellaires



Franck Delahaye

Collaborations:

The Opacity/Iron/RmaX Project team (M.J. Seaton et al.)

Georges Alecian (LUTh)

Edouard Audit (CEA/DAPNIA)

Emile Biémont (Univ. Liège)

Christophe Blancard (CEA/DAM)

Philippe Cossé (CEA/DAM)

Gérald Faussurier (CEA/DAM)

Jean-Claude Gauthier (CELIA)

Olivier Peyrusse (CELIA)

Marc Pinsonneault (Ohio State Univ.)

Guy Schurtz (CELIA)

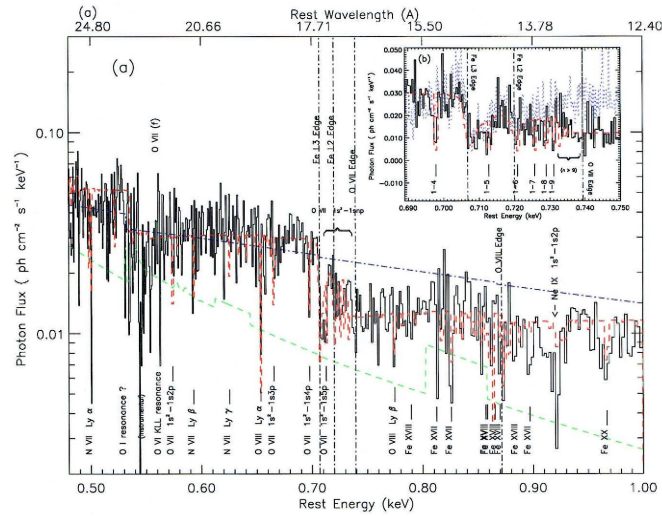
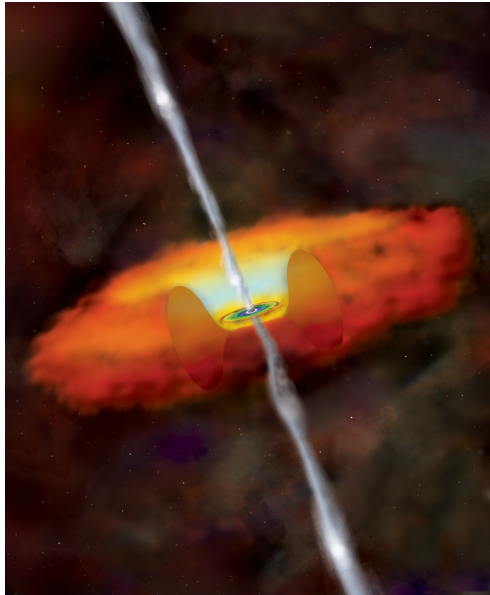
Chantal Stehlé (LERMA)

Frédéric Thais (CEA/DRECAM)

Sylvaine Turck-Chièze (CEA/DAPNIA)

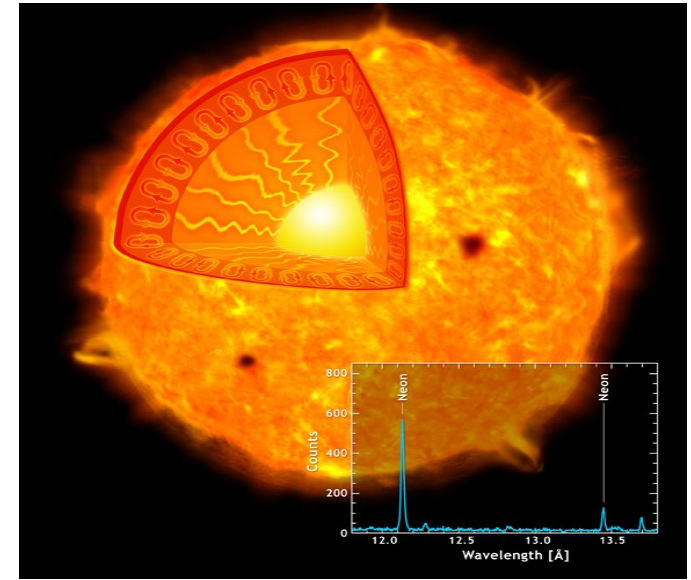
Claude Zeppen (UMS 2201)

Qu'est ce qu'un noyau actif de galaxie ?

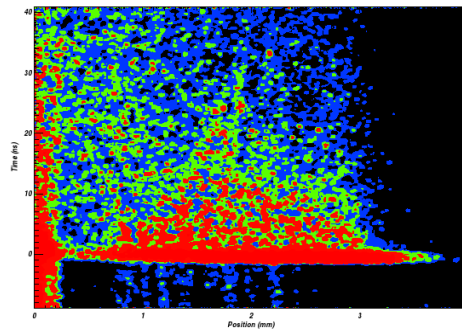
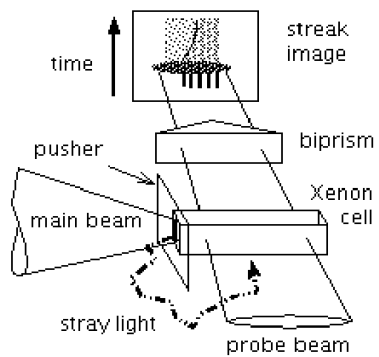


Lee et al. 2001 (ApJ558:377-391)

Quelle est la composition du Soleil? Comment évolue la structure des étoiles?



Comment simuler les expériences de chocs radiatifs astrophysiques ?



Comment retracer l'historique de l'enrichissement chimique de l'univers? Quel est l'âge de l'univers?

H																			He
Li	Be									B	C	N	O	F					Ne
Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl					Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br			Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I			Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At			Rn
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub								
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb			Lu
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No			Lr

Données atomiques et Opacités

Quel élément? à quelle précision? pour quelles applications?

Opacités

“Coefficient caractérisant le transport de la lumière à travers un milieu. Pour calculer des opacités, cela requiert des données atomiques pour un grand nombre de processus d’absorption et de diffusion “

(M.J. Seaton, J.Phys.B. 1987, 20 6363)

- **Trois étapes pour le calcul des opacités**

- Détermination des niveaux de populations (Equation d’état)
- Détermination des sections efficaces d'absorption et diffusion (Phy. Atm.)
- Calcul des moyennes d’opacités pour les conditions et compositions considérées

Conditions physiques

Equation d’état (populations)

Effets de plasmas

Données atomiques

Niveaux d’énergies

Forces d’oscillateurs

Sections efficaces de photoionisation

Paramètres d’élargissement de raies

Différentes méthodes pour plusieurs communautés.

Il existe plusieurs approches pour calculer les opacités. Chacune possède des avantages et répond à une problématique précise.

- Quels éléments?
- Quels domaines de Température et de densité?

- Approche détaillée : The Opacity project (OP), OPAL
- Approche statistique: UTA
- Approche hybride: DLA – RTA

Plusieurs codes sont en services: OP, PROTEC, OPAL, LEDCOP, OPAS

Des stratégies et approximations sont associées ...

Equation de transfert radiatif

Soit $I_\nu(\vec{r}, \hat{s})$ Intensité à la fréquence ν du rayonnement en position r dans la direction s .
L' énergie rayonnante par unité de temps et de surface dans un angle solide $d\Omega$ est $I_\nu d\nu d\Omega$
et le flux est $\vec{F}_\nu(\vec{r}) = \int I_\nu(\vec{r}, \hat{s}) \hat{s} d\Omega$

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\tilde{\kappa}_\nu I_\nu + j_\nu$$

I_ν Intensité spécifique du rayonnement à la fréquence ν dans la direction \hat{s}

ds Element de distance dans la direction \hat{s}

$\tilde{\kappa}_\nu$ Opacité monochromatique

j_ν Emisivité

Variation de I_ν sous l'effet d'absorption $-\tilde{\kappa}_\nu I_\nu$ et d'émission j_ν

$$\tilde{\kappa}_\nu = \tilde{\kappa}_\nu^{abs} + \tilde{\kappa}_\nu^{diff}$$

combinaison d'absorption vraie et diffusion

Absorption vraie: photoionisation (bound-free), photoexcitation (bound-bound), free-free

Diffusion: Thomson scattering ($\gamma + e^-$), Rayleigh scattering ($\gamma + molecule$) ...

Approximation et simplification

Intérieurs stellaires et atmosphères profondes:

Equilibre Thermodynamique Locale (LTE) → loi de Kirchhoff-Planck

$$j_\nu = \tilde{\kappa}_\nu B_\nu(T(r)) \quad B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} [e^{h\nu/kT} - 1]^{-1}$$

Diffusion approximation $F_\nu(r) = -\frac{4\pi}{3} \frac{1}{\kappa_\nu} \frac{dB_\nu}{dT} \frac{dT}{dr}$

On définit l'opacité de Rosseland telle que

$$F(r) = \int F_\nu d\nu = \int -\frac{4\pi}{3} \frac{1}{\kappa_\nu} \frac{dB_\nu(T)}{dT} \frac{dT}{dr} d\nu = -\frac{4\pi}{3} \frac{1}{\kappa_R} \frac{dB(T)}{dT} \frac{dT}{dr} \quad B(T) = \int B_\nu(T) d\nu$$

On définit l'opacité de Planck telle que

$$\kappa_P B(T) = \int \kappa'_\nu B_\nu(T) d\nu \quad \kappa'_\nu = \tilde{\kappa}_\nu^{abs}$$

Rosseland $\frac{1}{\kappa_R} = \frac{\int \frac{1}{\kappa_\nu} \frac{dB_\nu(T)}{dT} d\nu}{\frac{dB(T)}{dT}}$

Planck $\kappa_P = \frac{\int \tilde{\kappa}_\nu B_\nu(T) d\nu}{B(T)}$

Moyenne de Rosseland et de Planck

Rosseland mean opacity

$$\frac{1}{\kappa_R} = \int \frac{1}{\kappa_\nu(\text{total})} f_\nu^R d\nu \quad \kappa_P = \int \kappa'_\nu f_\nu^P d\nu$$

Total monochromatic opacity

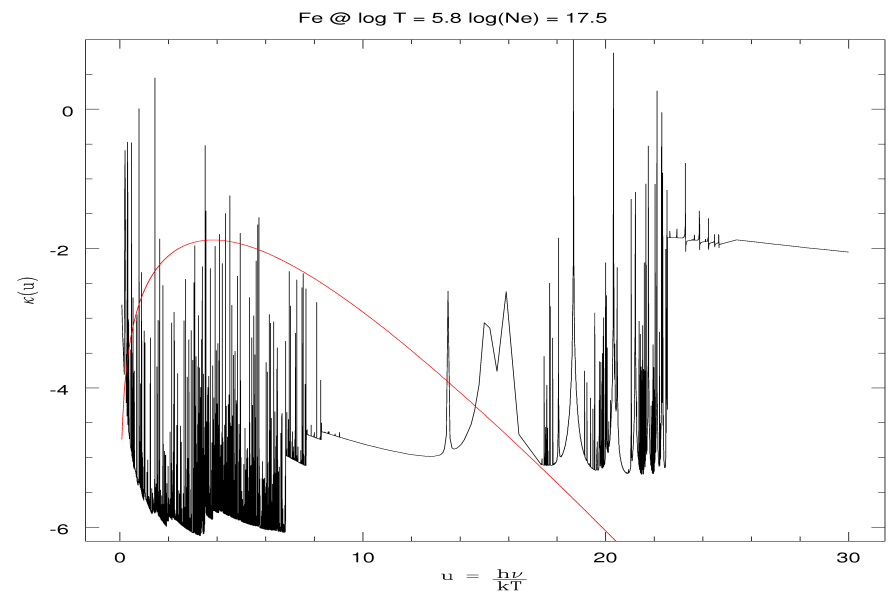
$$\kappa_\nu(\text{total}) = \kappa_\nu^{\text{abs}} + \kappa_\nu^{\text{scat}} \quad \kappa'_\nu = \kappa_\nu^{\text{abs}}$$

pour un mélange $\kappa_\nu(\text{total}) = \sum_i N_i (k_i^{\text{abs}}(\nu)(1 - e^{h\nu/kT}) + k_i^{\text{scat}}(\nu))$

Weighting function

$$f_\nu^R = \frac{15h^4\nu^4}{4\pi^4k_B^4T^4} \frac{e^{-h\nu/k_B T}}{(1 - e^{-h\nu/k_B T})^2}$$

$$f_\nu^P = \frac{15h^3\nu^3}{\pi^5k_B^3T^3} \frac{e^{-h\nu/k_B T}}{(1 - e^{-h\nu/k_B T})}$$



Les Opacités et les modèles stellaires

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

Continuité de la Masse

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \rho$$

Equilibre hydrostatique

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho \epsilon$$

Equilibre thermique

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4ac} \frac{\rho \kappa_R}{T^3} \frac{L}{4\pi r^2}$$

Equilibre radiatif

Opacités stellaires: Historique

Historiquement, le fournisseur de table d'opacités était Los Alamos National Lab. avec les tables de Los Alamos Astrophysical Opacity Library (LAAOL), projet dirigé par A. Cox (de 1965 à fin 80).

"A plea for Reexamining heavy element opacities in stars" N. Simon, 1982 ApJ 260, L87-L90

- Le Problème: Pour une masse et luminosité préconisées par les modèles stellaires standards dans la modélisation des Cepheids de pop. I, les modèles standards de pulsation prédisent des rapports de périodes (P_0/P_1) plus larges que les observations.
- ou: Pour un rapport de période donné, les modèles standards stellaires et les modèles standards de pulsations prédisent des masses d'étoiles très différentes.
- Deux projets pour répondre à cette demande
 - Lawrence Livermore National Lab.: OPAL project (Rogers & Iglesias)
 - The Opacity Project (Mike Seaton et al.)

The Opacity Project opacities (OP, M.J. Seaton)

Contexte Initial: Révision des opacités pour les conditions physiques caractéristiques des enveloppes stellaires afin de résoudre un problème de pulsation stellaire.

Les Choix OP – modèle chimique

- Inclusion des effets de plasma dans l'équation d'état
 - Probabilité d'occupation (MHD Mihalas Hummer Däppen)
- Produire des données atomiques précises en utilisant des méthodes sophistiquées
 - *Approximation Atome libre non perturbé (isolé)*
 - *Données indépendantes des conditions de plasma*
 - *Archivage des résultats pour chaque ion.*
 - *Seuls les éléments abondamment présents dans les étoiles et contribuant de façons significatives aux opacités sont considérés (17 espèces).*
- Opacité monochromatique calculée pour chaque élément individuellement, puis somme sur tous les éléments pour dériver la moyenne de Rosseland

La résolution du problème des Céphéïdes

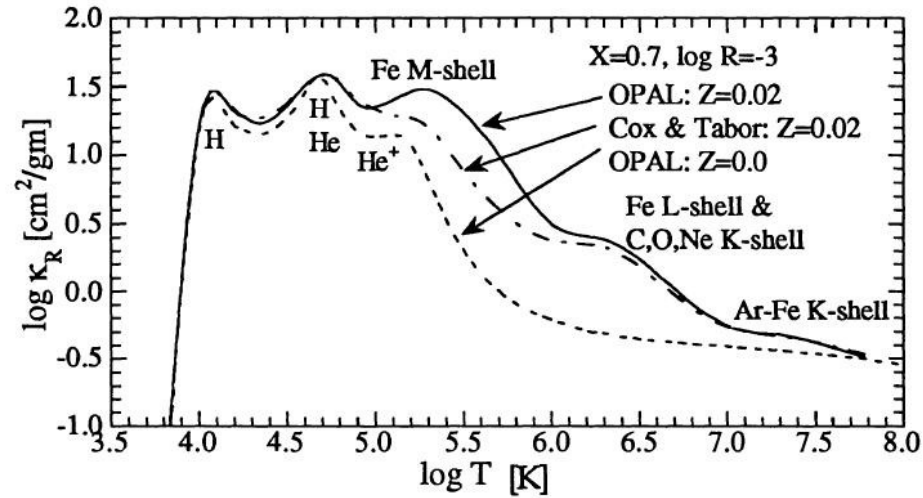


Fig. 3. Opacity versus temperature for the 12 element King4a mixture.

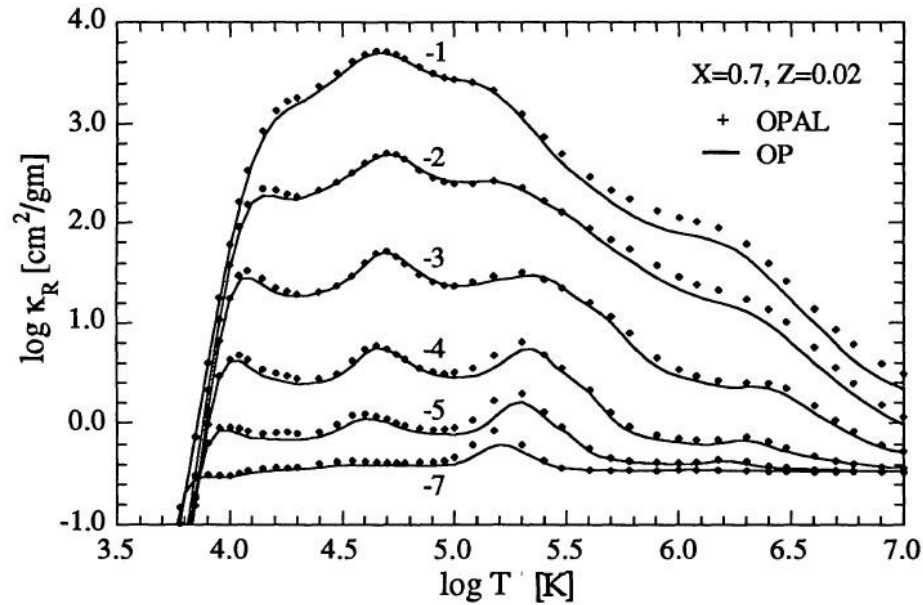


Fig. 4. Comparison of OPAL and OP for the same 14 element mixture. The results are shown for constant tracks of log R.

Opacité: OP vs OPAL

2 Calculs indépendants

- Approche physique (OPAL)
- Approche chimique (OP)

→ bon accord sur les moyennes de Rosseland pour les régimes caractéristiques des enveloppes stellaires.

Tout deux confirment les déclarations de Simon. Les opacités des 'métaux' étaient sous estimées. Le problème des Céphéides est résolue.

OPAL: nouveau fournisseur officiel

En effet....

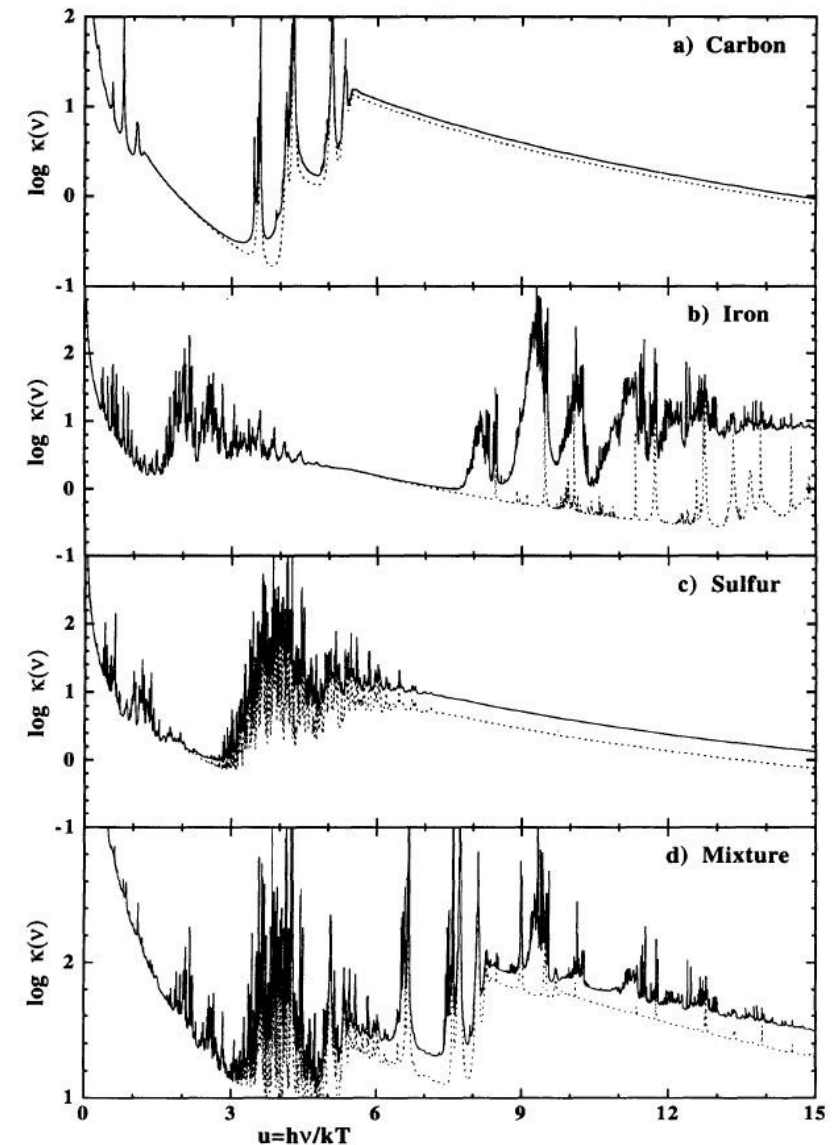
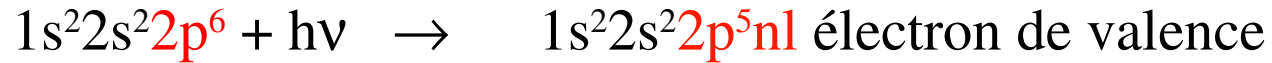


FIG. 3.—OPAL monochromatic opacity with complete atomic data (*solid*) and neglected photoabsorptions (*dashed*): (a) carbon; (b) iron; (c) sulfur; and (d) simplified astrophysical mixture in Table 2.

Opacités OP – Nouvelle génération

Les nouvelles opacités OP incluent les processus de couches internes.



- Extension de la validité des opacités aux régimes de hautes T et ρ → intérieurs d'étoiles
- Différentes sources (LEDCOP, OPAL, OP) de moyenne d'opacités calculées avec des méthodes détaillées sont à la disposition de la communauté stellaire sous forme de table.
- On peut étendre le domaine de comparaison et d'application

Effets de couche interne sur l'opacité spectrale

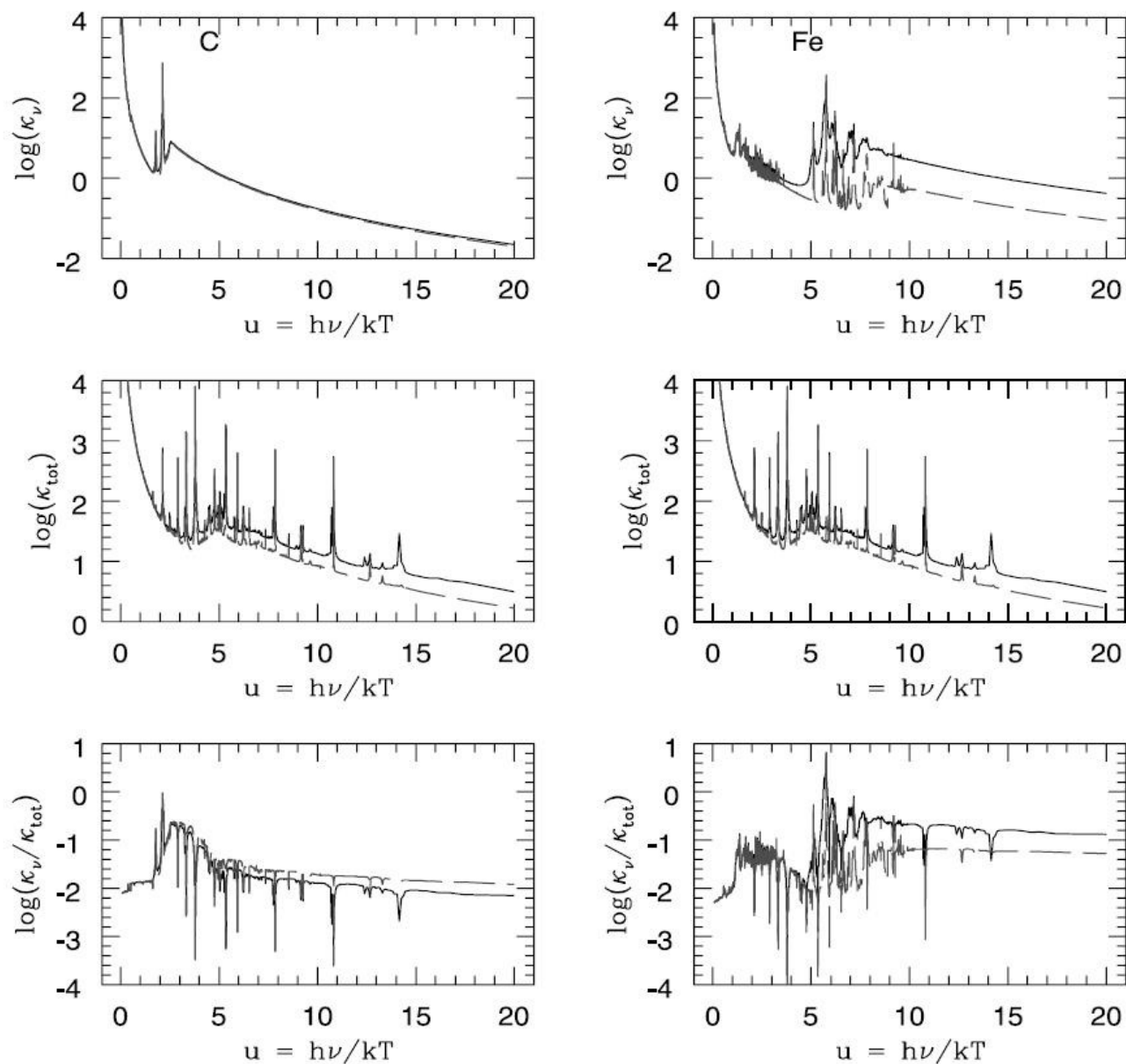


FIG. 1.—Monochromatic opacities at $\log T = 6.3$ and $\log R = -1.5$. Left, Carbon; right, iron; top, monochromatic opacities; middle, total opacities; bottom, $\kappa_\nu(\text{C})/\kappa_\nu^{\text{tot}}$; dashed line, OP1; solid line, new OP. [See the electronic edition of the Journal for a color version of this figure.]

Opacité OP: avec et sans les processus de couches internes

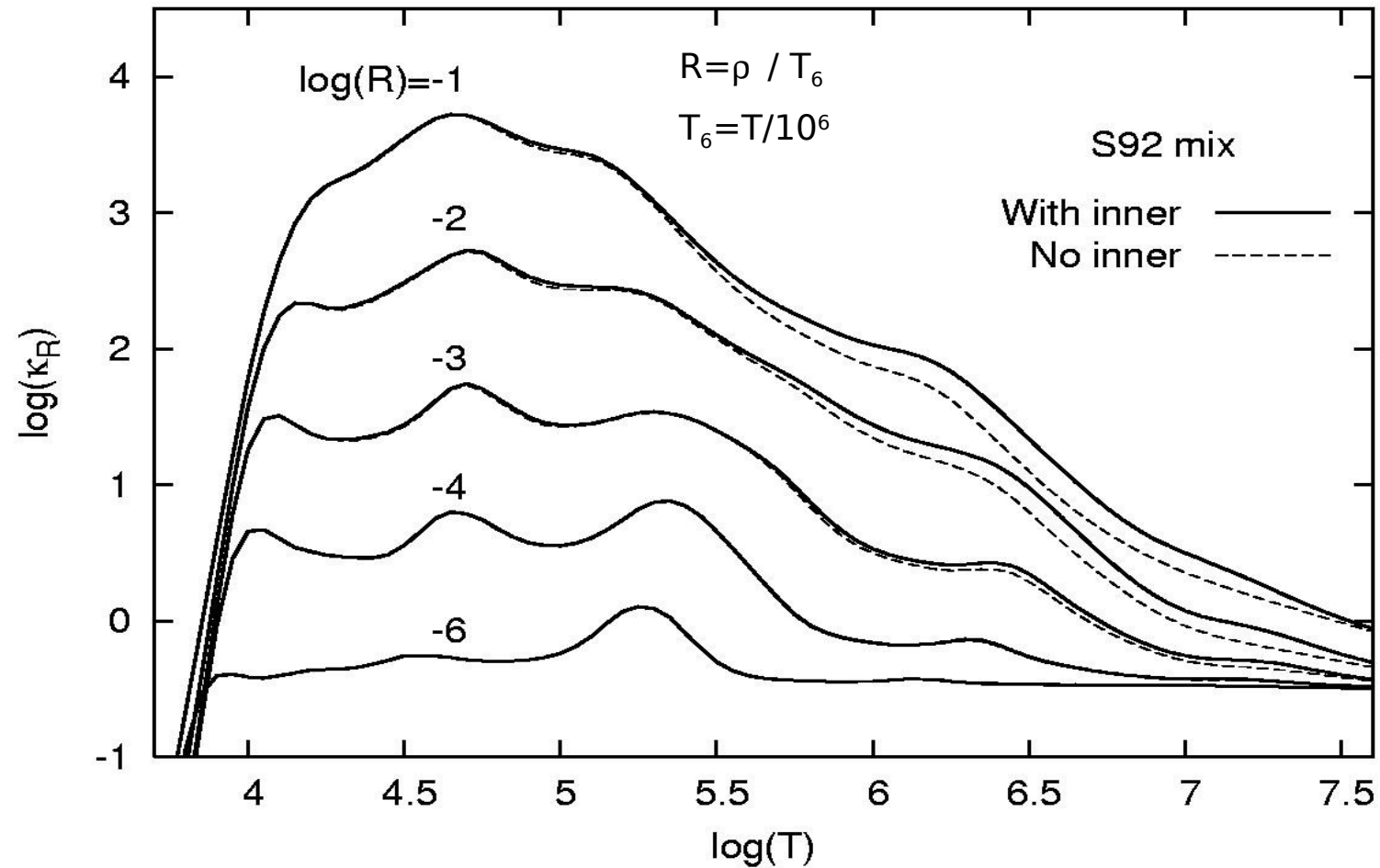


Figure 1. Rosseland-mean opacities from OP for S92 mix, with and without inner-shell contributions.

OP vs OPAL

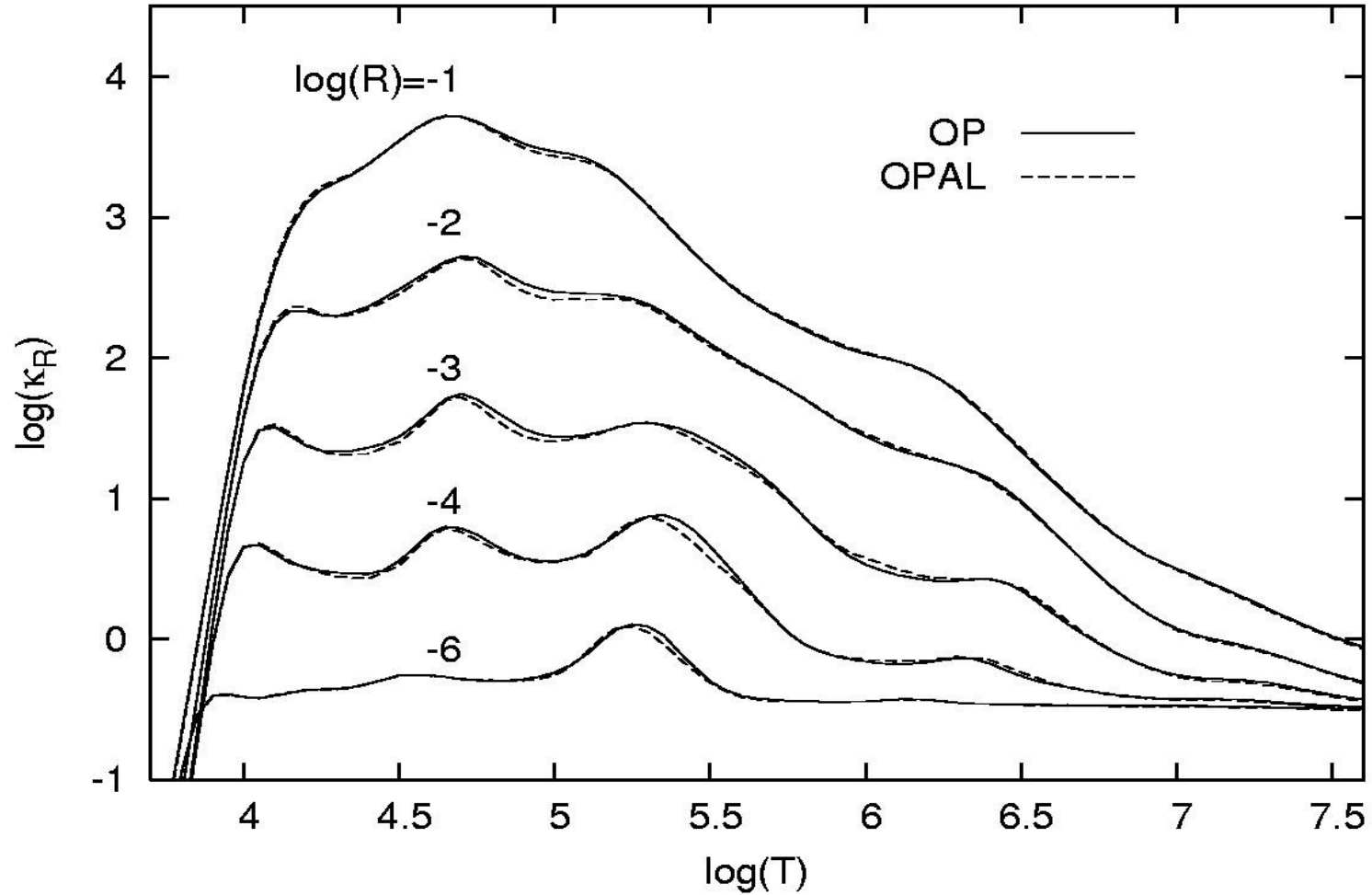


Figure 2. Rosseland-mean opacities from OP and OPAL for the S92 mix.

OP vs OPAL dans les modèles stellaires

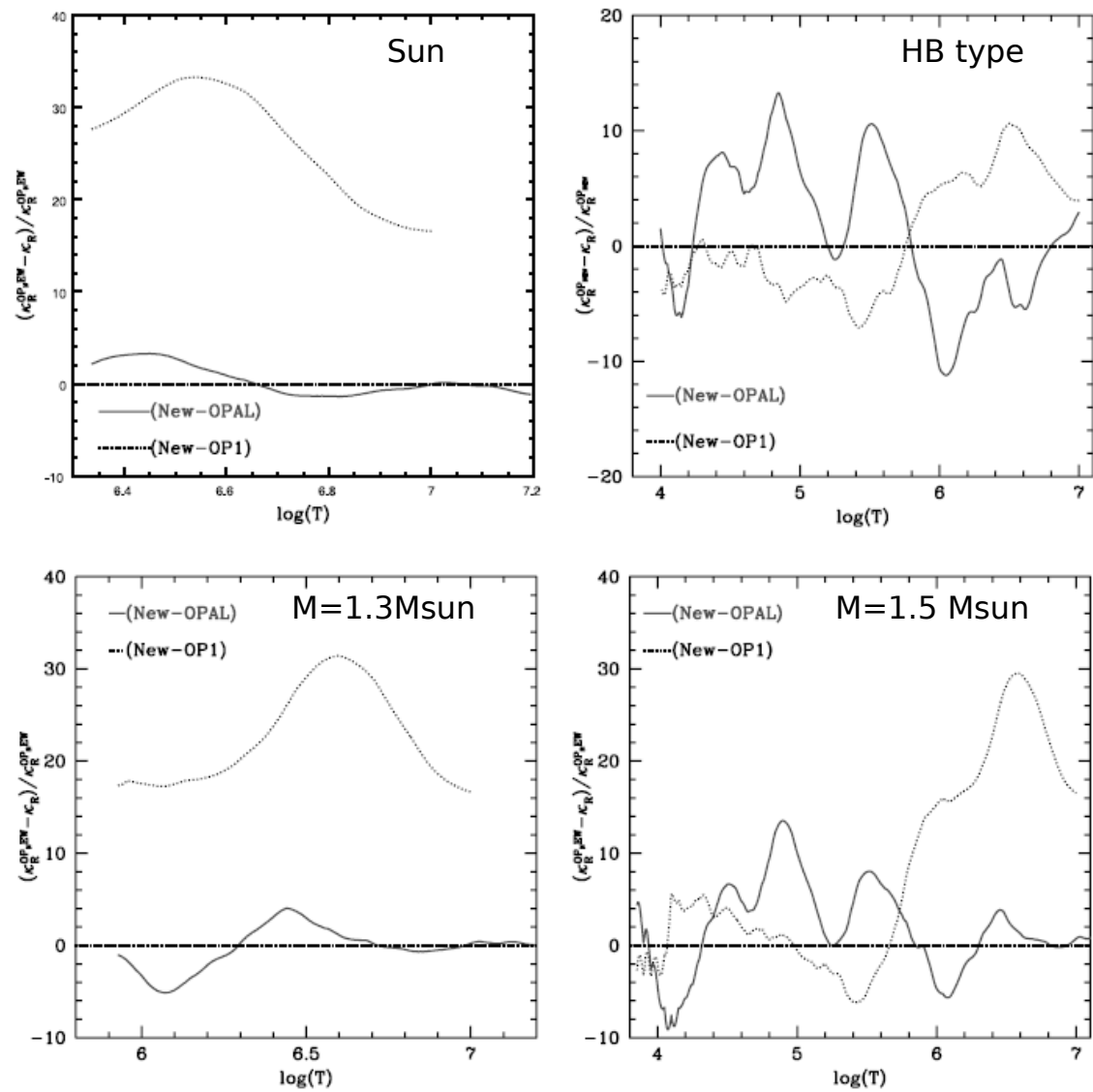
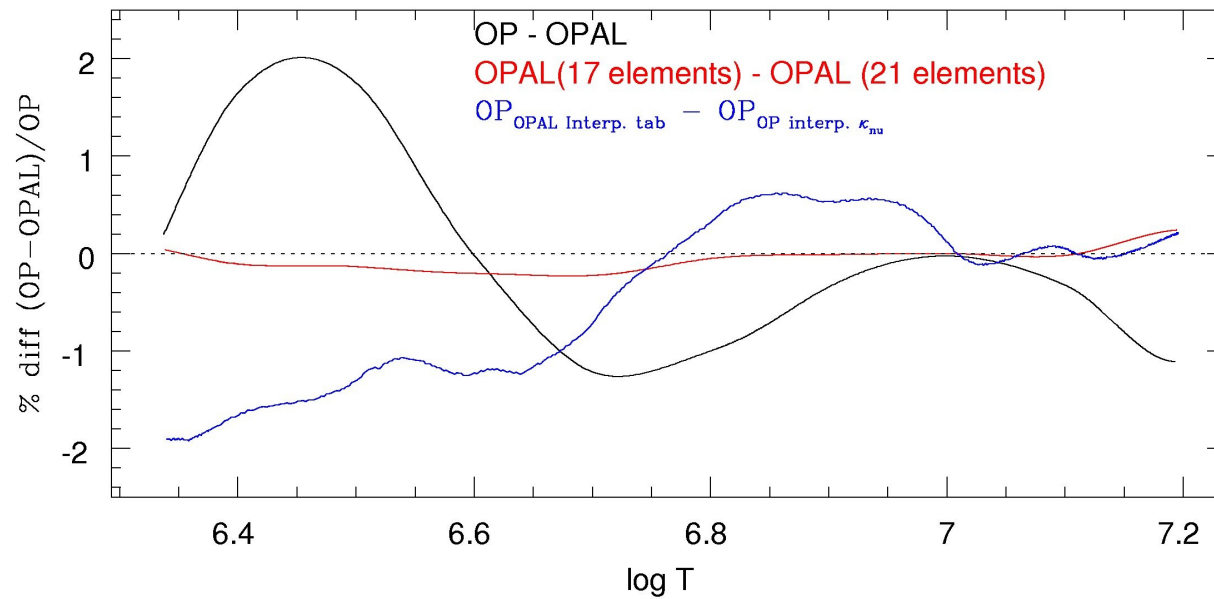
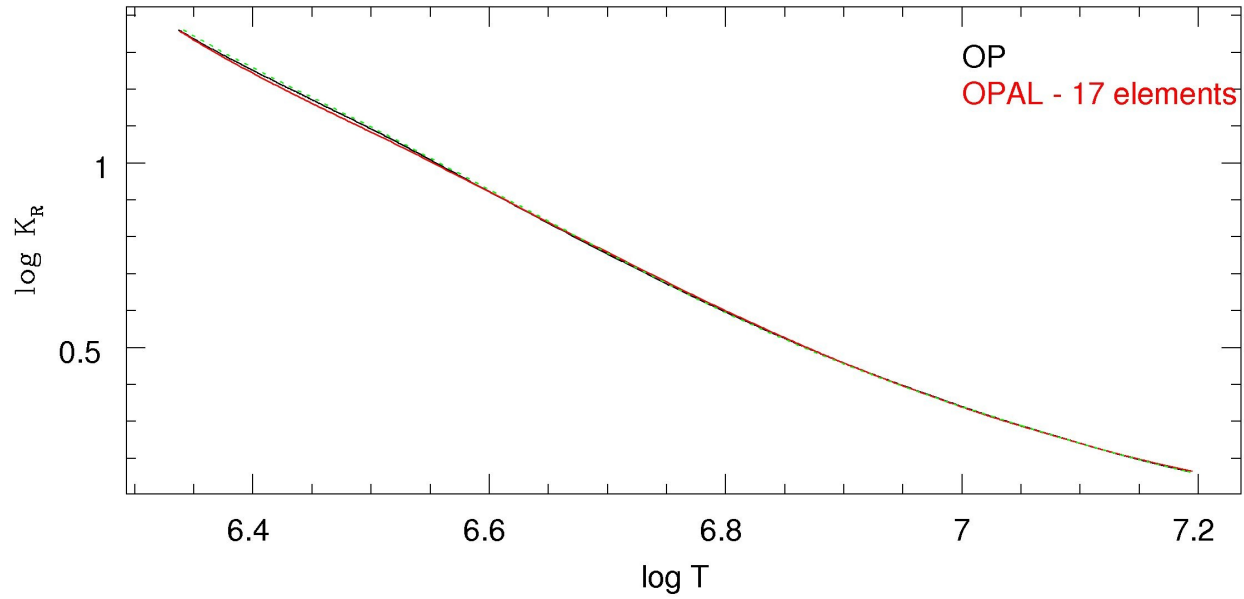


FIG. 2.—Percentage difference in κ_R between OPAL and OP. *Top left*, Sun at 4.57 Gyr; *top right*, $T_{\text{eff}} = 10,000$ K and $\log R = -3$; *bottom left*, $M = 1.3 M_{\odot}$ and $T = 6500$ K; *bottom right*, $M = 1.5 M_{\odot}$ and $T = 7070$ K. [See the electronic edition of the Journal for a color version of this figure.]

OP vs OPAL dans le modèle solaire

GS98 composition - $X = 0.7$ $Z = 0.02$



Composition Solaire: 'Solar convection zone problem'

Contexte:

Code atmosphérique 3D : M. Asplund

Révision des compositions solaires indispensable pour le fitter le spectre solaire

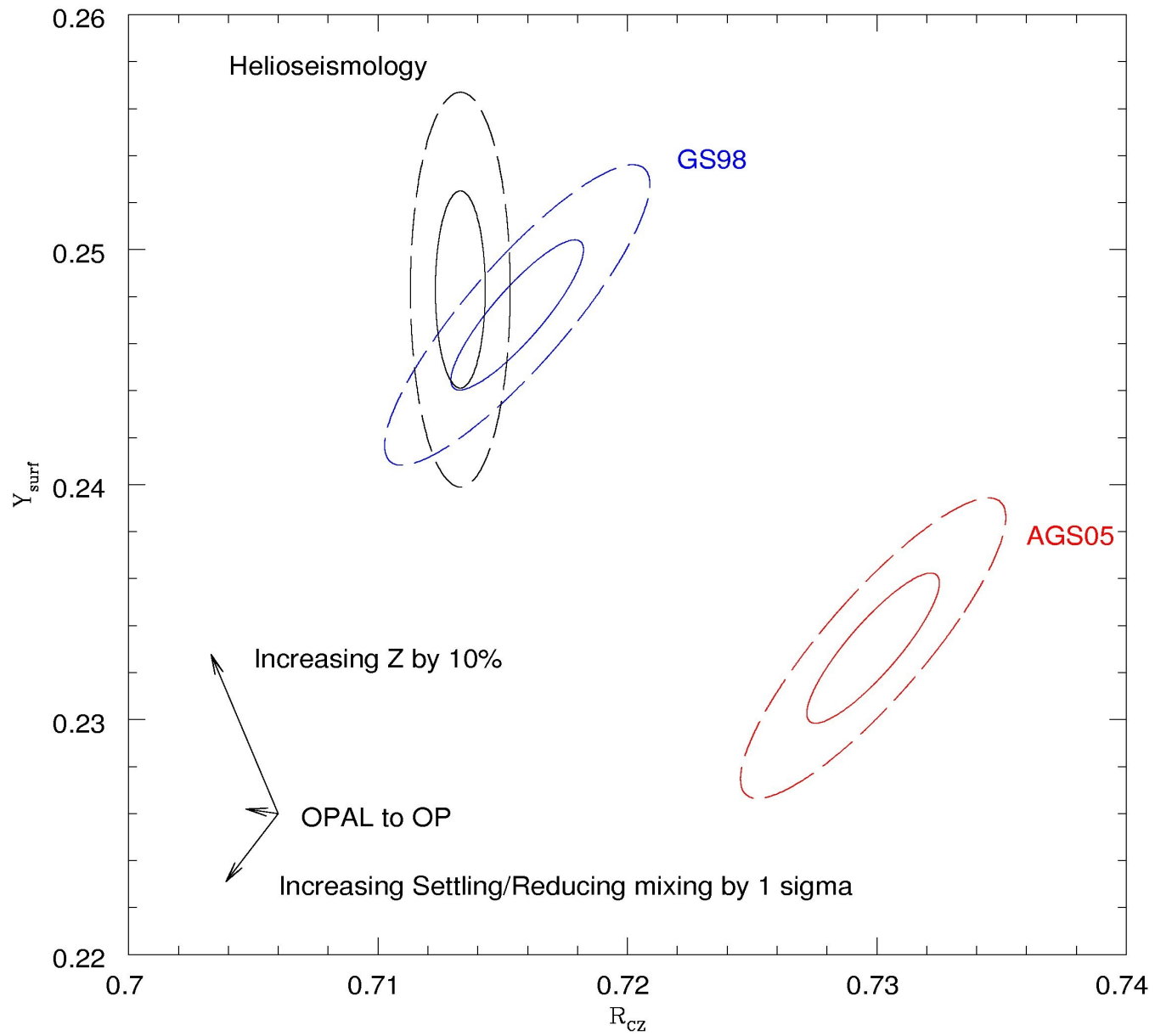
Réduction de l'ordre de 30% de C, N, O et Ne

Avantage: cela résoud le 'problème' de la particularité de la composition solaire par rapport à son environnement (qui lui est pauvre en O par rapport à l'ancienne composition standard !

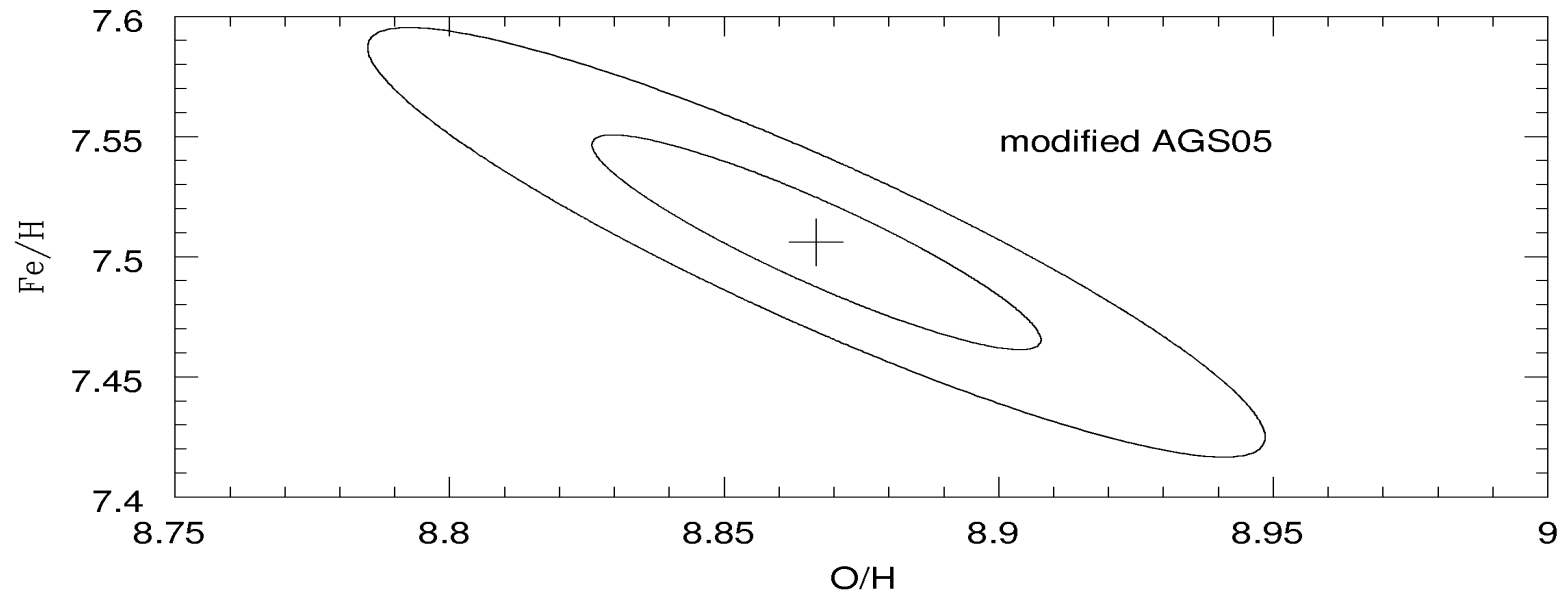
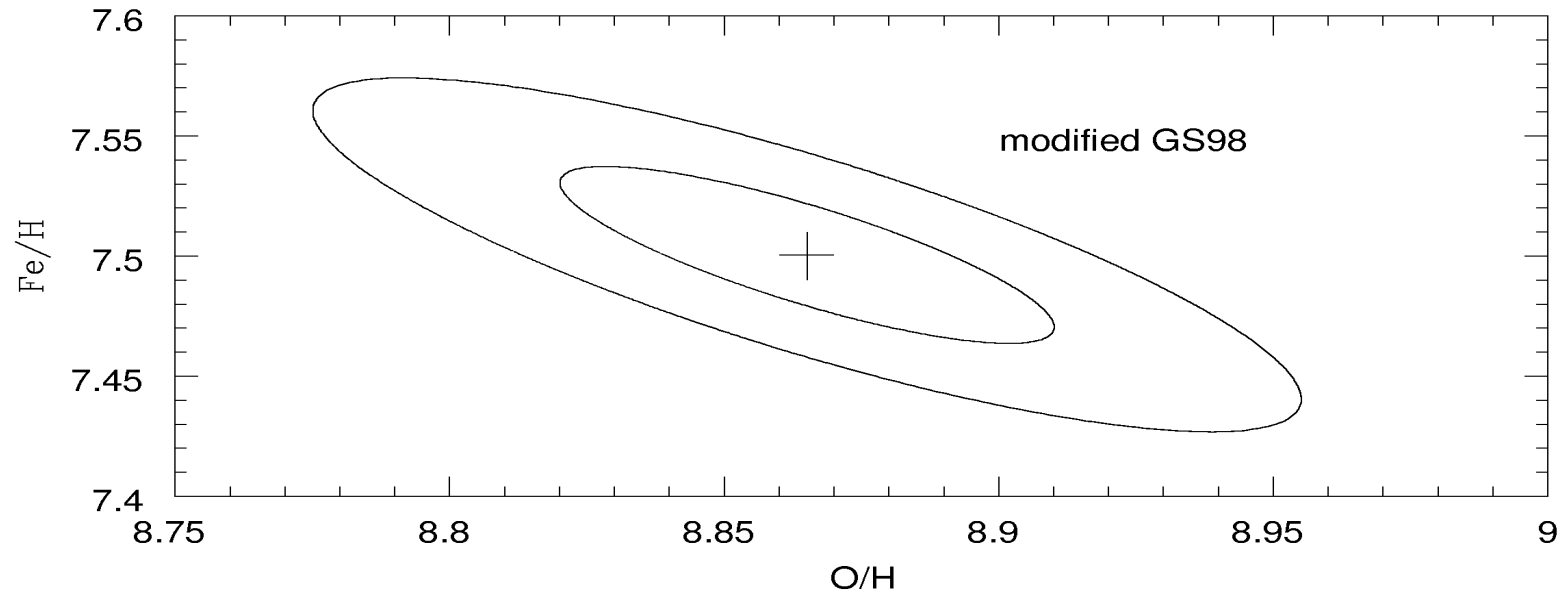
Problème: Les modèles standards d'évolution stellaire utilisant ces nouvelles compositions préconisées par Asplund et al. ne produisent plus d'observable en accord avec l'hélioseismologie Rcz et Ysurf ou le profil de vitesse du son.

Réaction générale: Les modèles standards doivent être faux et particulièrement les opacités.

Composition Solaire (2)



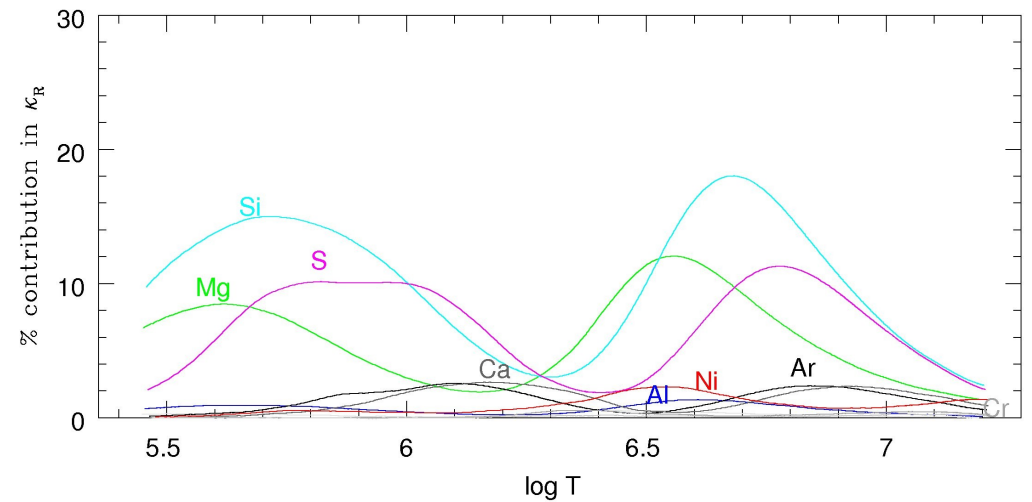
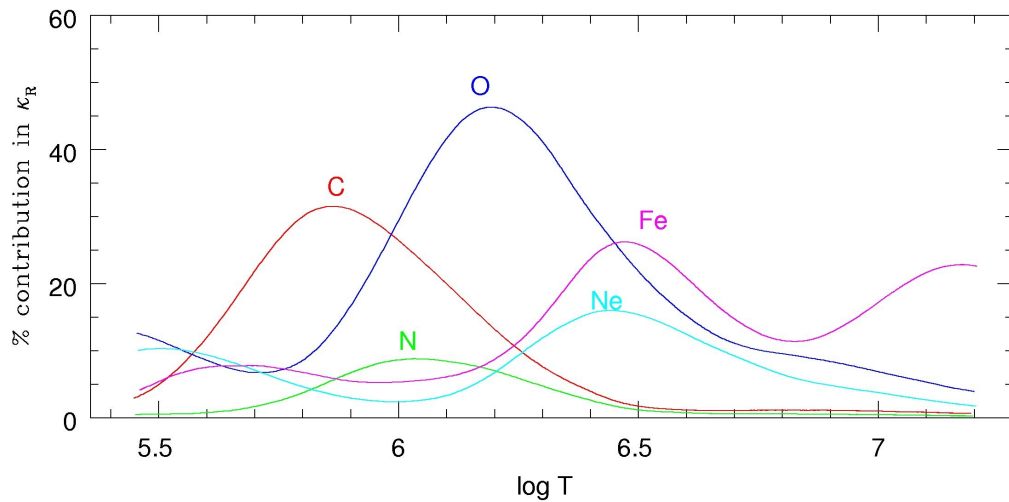
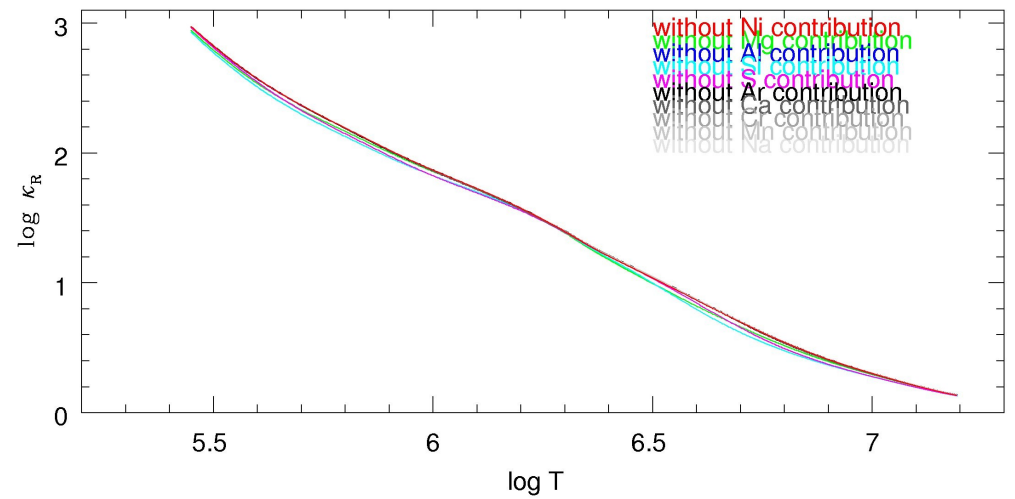
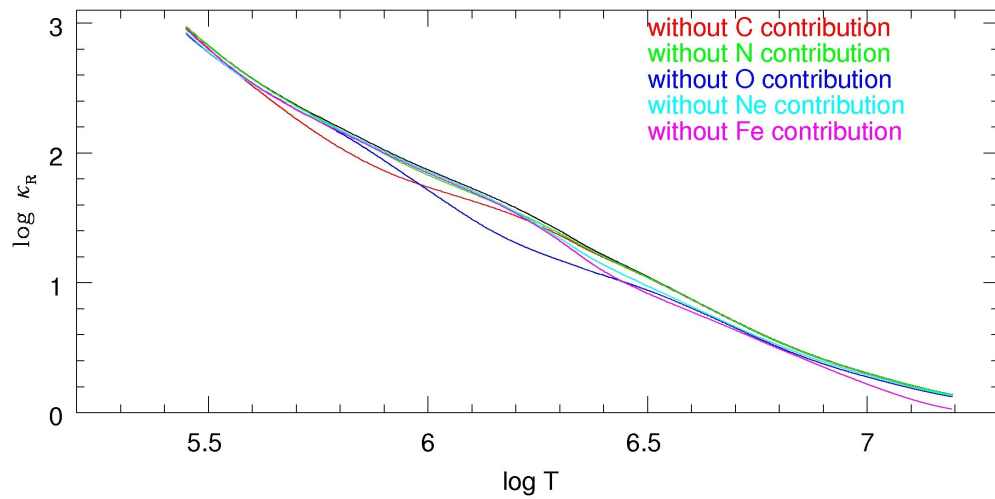
Composition Solaire (3)



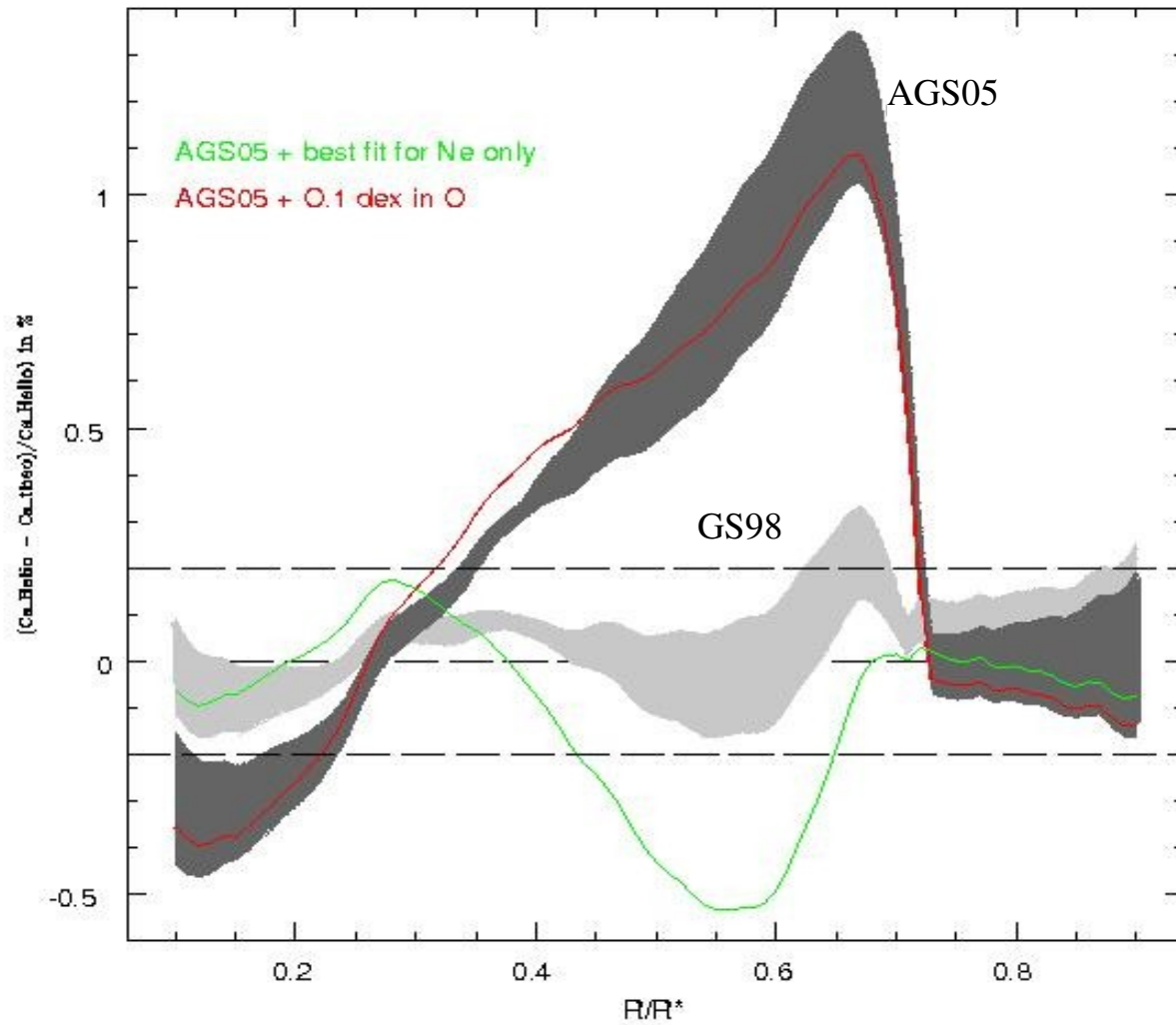
remarques

$$\frac{1}{\kappa_R} = \int \frac{1}{\kappa_\nu(\text{total})} f_\nu d\nu$$

$$\kappa_\nu(\text{total}) = \sum_i N_i (k_i^{\text{abs}}(\nu)(1 - e^{-h\nu/kT}) + k_i^{\text{scat}}(\nu))$$



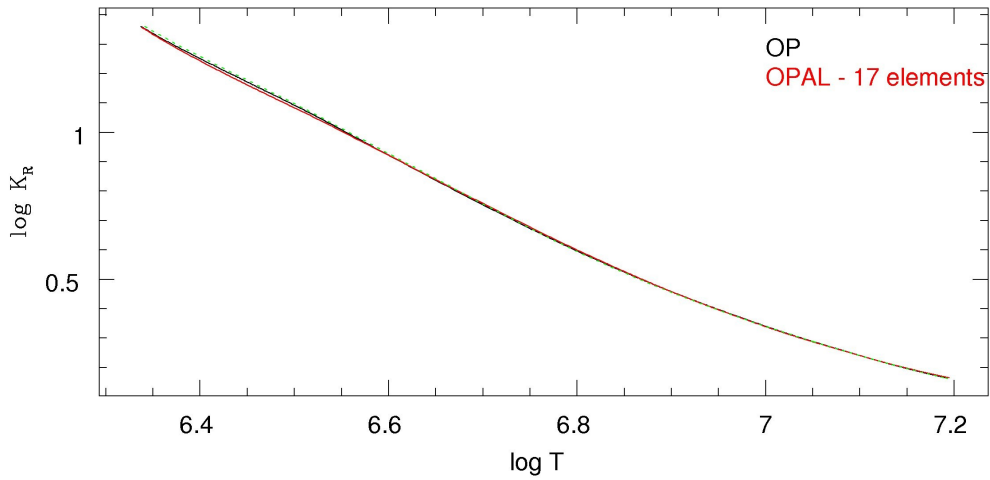
Composition Solaire



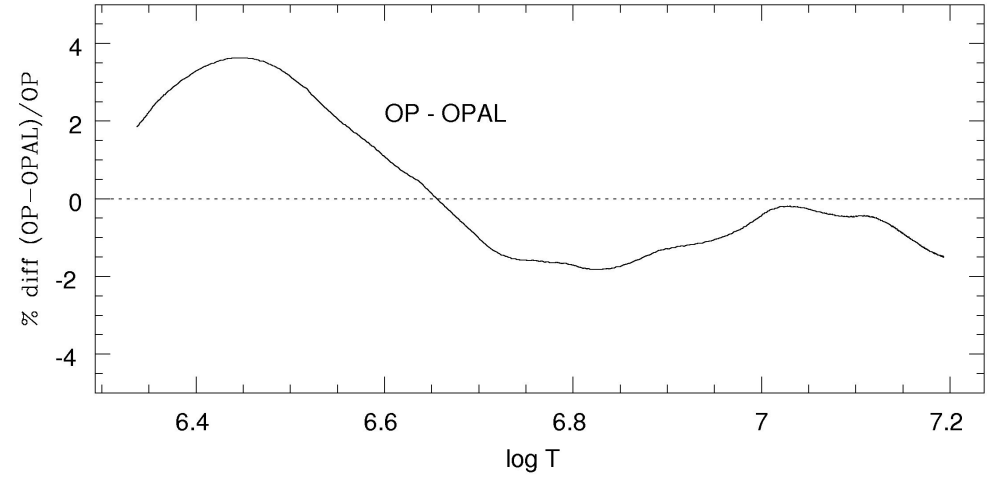
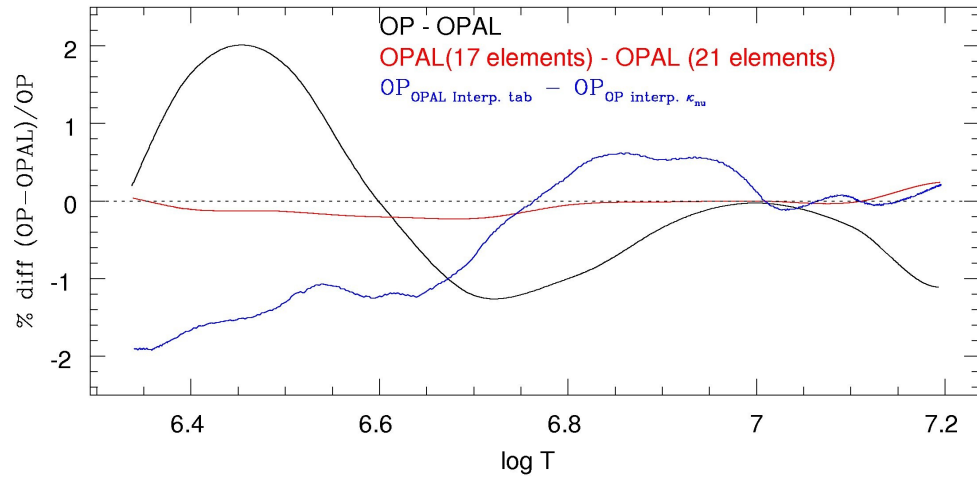
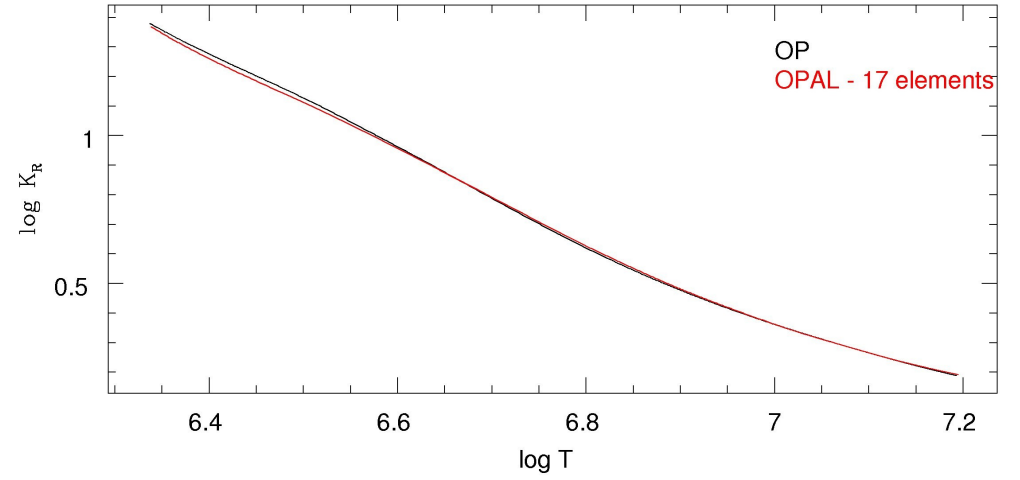
Delahaye, Pinsonneault & Zeppen 2008, en préparation

Pour Vincent ...

GS98 composition - $X = 0.7$ $Z = 0.02$



AGS05 composition - $X = 0.7$ $Z = 0.02$



Pause

2 Calculs indépendants

- Approche physique (OPAL)
- Approche chimique (OP)

→ bon accord sur les moyennes de Rosseland

Quid de toutes ces différences si flagrantes montrées par Christophe?

- Différences dans les fractions ioniques
- Différences dans les populations
- Différences dans certaines sections efficaces

Elles existent mais n'ont pas de signature dans la moyenne de Rosseland d'un mélange de type solaire pour les conditions physiques du soleil !

Attention: La moyenne de Rosseland d'un mélange lisse les différences parce qu'on regarde un mélange et parce qu'on regarde une moyenne pondérée par la dérivée de la fonction de Planck.

Il faut comprendre les différences existantes et tester dans d'autres étoiles

Quelques remarques sur la moyenne de Rosseland

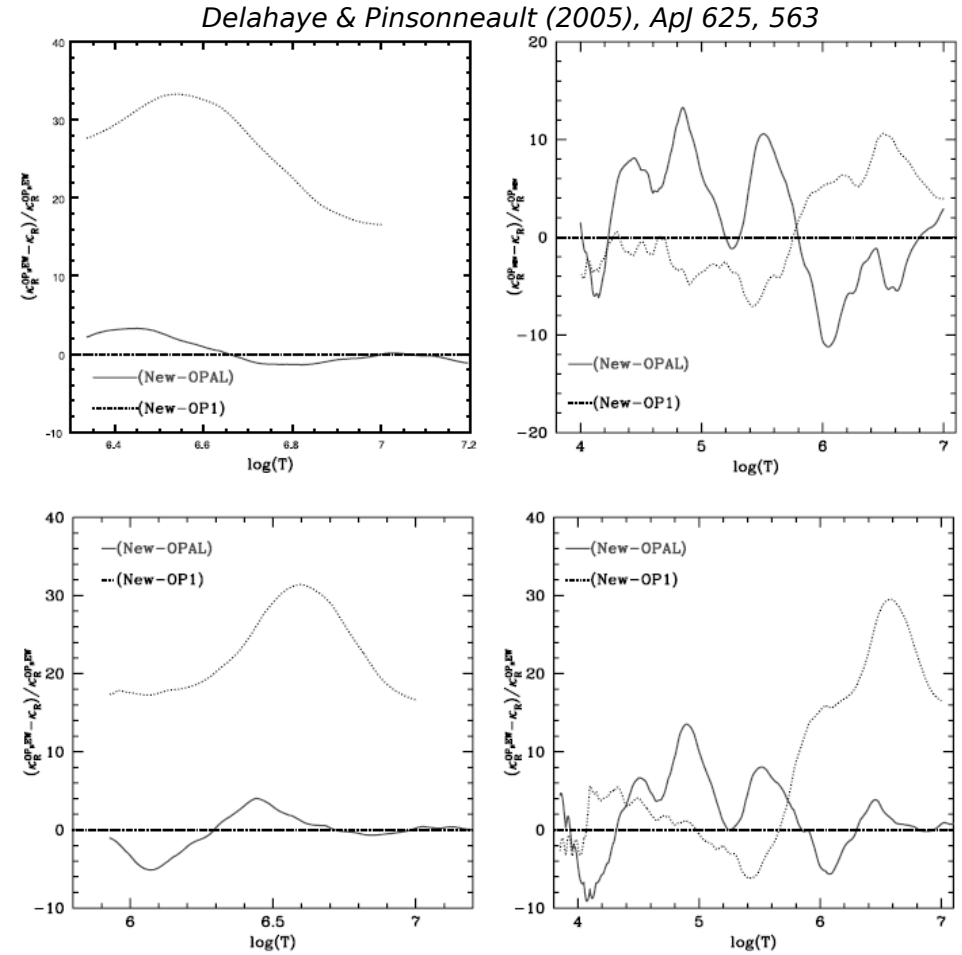
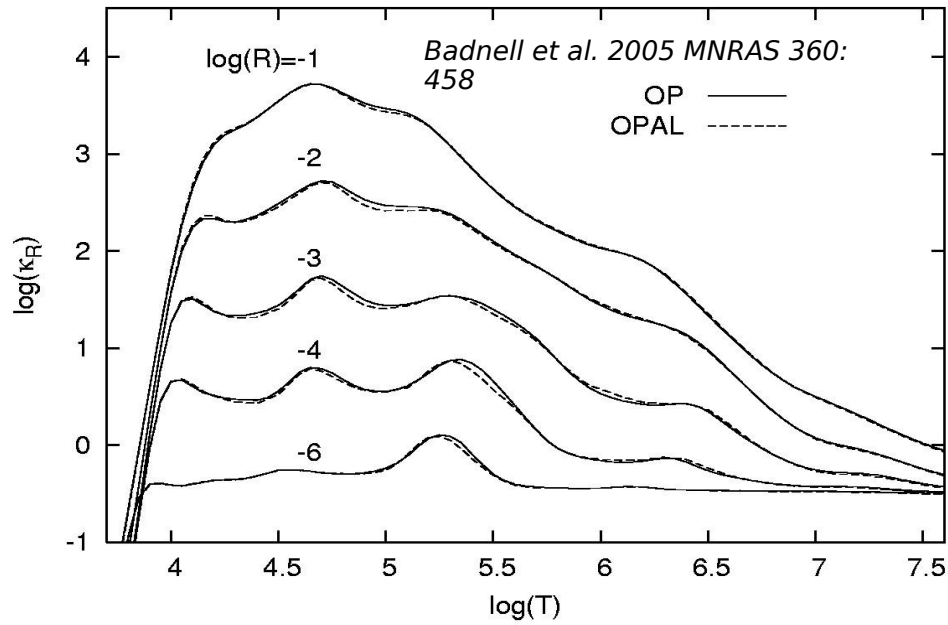
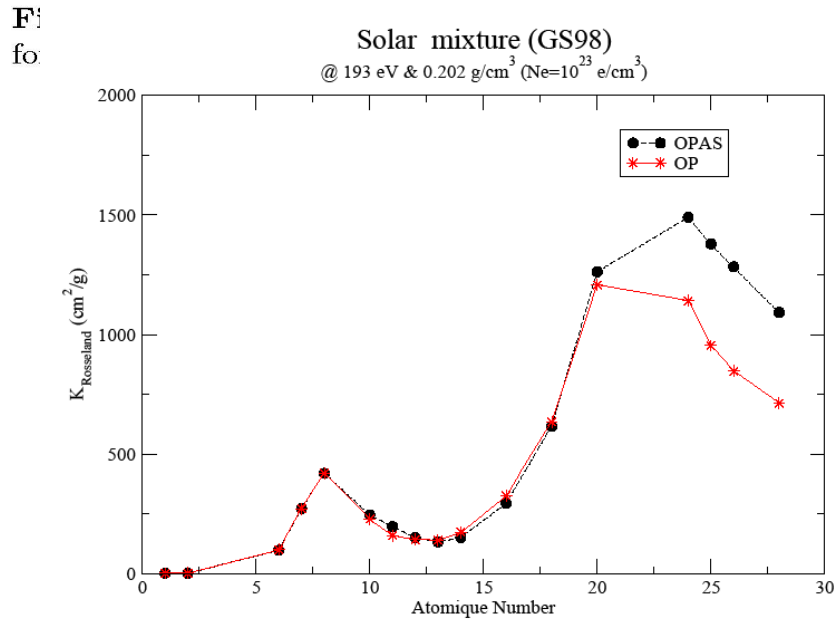


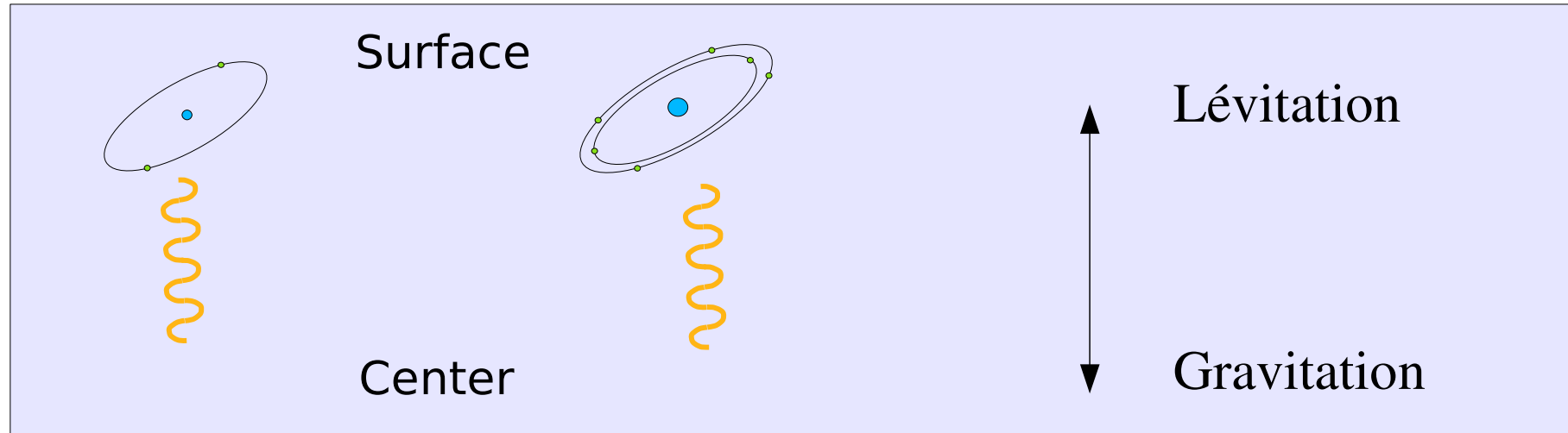
FIG. 2.—Percentage difference in κ_R between OPAL and OP. Top left, Sun at 4.57 Gyr; top right, $T_{\text{eff}} = 10,000$ K and $\log R = -3$; bottom left, $M = 1.3 M_{\odot}$ and $T = 6500$ K; bottom right, $M = 1.5 M_{\odot}$ and $T = 7070$ K. [See the electronic edition of the Journal for a color version of this figure.]



C. Blancard (private communication)

Microdiffusion

Compétition entre les processus de sédimentation gravitationnelle et les accélérations radiatives



Gravitation: Les éléments lourds coulent par rapport aux éléments légers

Levitation: Les éléments très absorbants lèvitent par rapport aux éléments moins absorbants

$$\text{Accélération totale} = g_{\text{rad}} - g_{\text{grav}}$$

- Anomalies d'abondance
- Stratification (modification de la composition chimique)

Attention: Là où les processus de mélange (convection, rotation ...) dominant, pas de microdiffusion effective.

Accélération radiatives

Radiative acceleration for species k

$$g_{rad}(k) = \frac{F}{c} \frac{M}{M(k)} \kappa_R \gamma(k)$$

Total opacity

$$\frac{1}{\kappa_R} = \int \frac{1}{\kappa_\nu(total)} f_\nu d\nu$$

Specific opacity of a given element

$$\gamma(k) = \int \frac{\kappa_\nu(k)}{\kappa_\nu(total)} f_\nu d\nu$$

Radiative acceleration is a sensitive test of opacity calculations

Total monochromatic opacity

$$\kappa_\nu(total) = \sum_k \kappa_\nu(k) + \kappa_{scat}$$

$$f_\nu = \frac{15h^5\nu^4}{4\pi^4k_B^5T^5} \frac{e^{h\nu/k_B T}}{(e^{h\nu/k_B} - 1)^2}$$

Accélération radiatives: OP vs OPAL

Comparison OP-OPAL

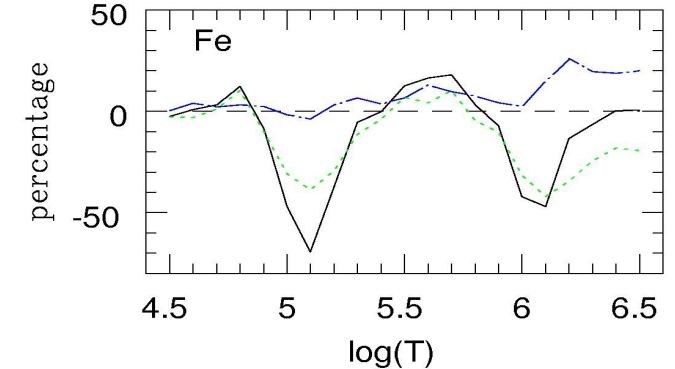
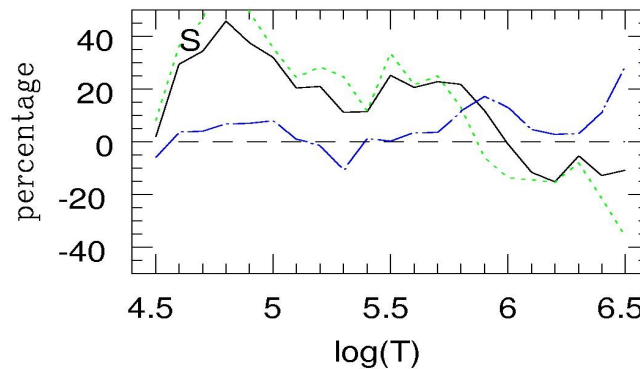
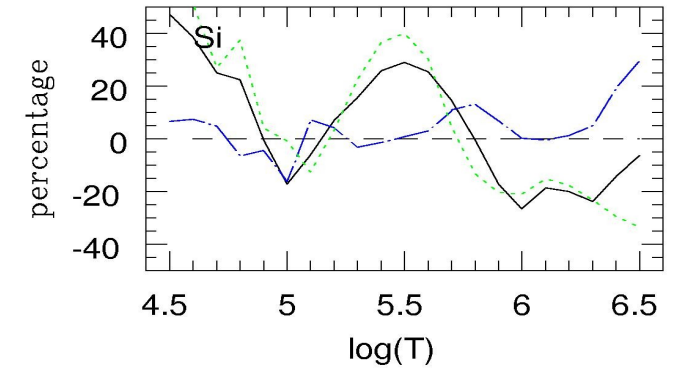
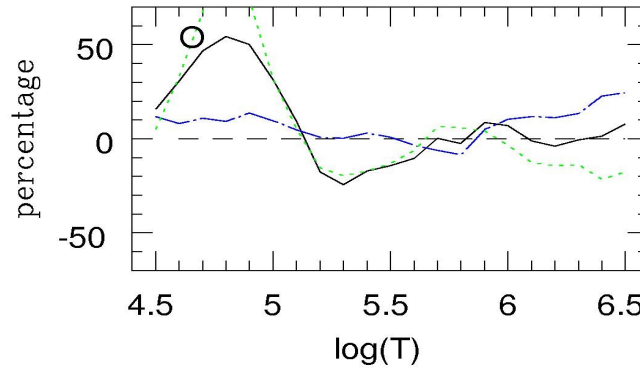
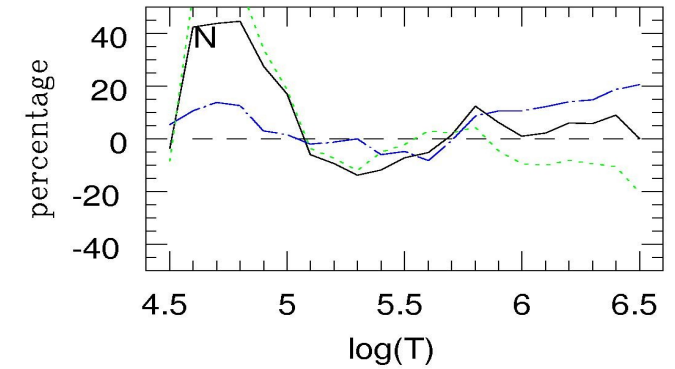
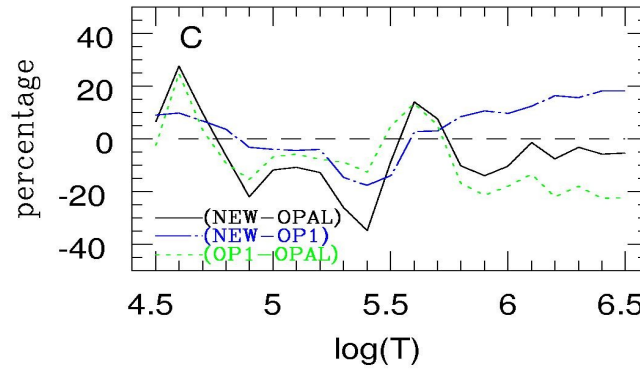
- Données OPAL extraites de travaux précédents par digitalisation des courbes.

- Même Structure stellaire

 - Simulation d'étoiles HB ou de masse intermédiaire

- Trend: $Z \nearrow$ Diff. \nearrow

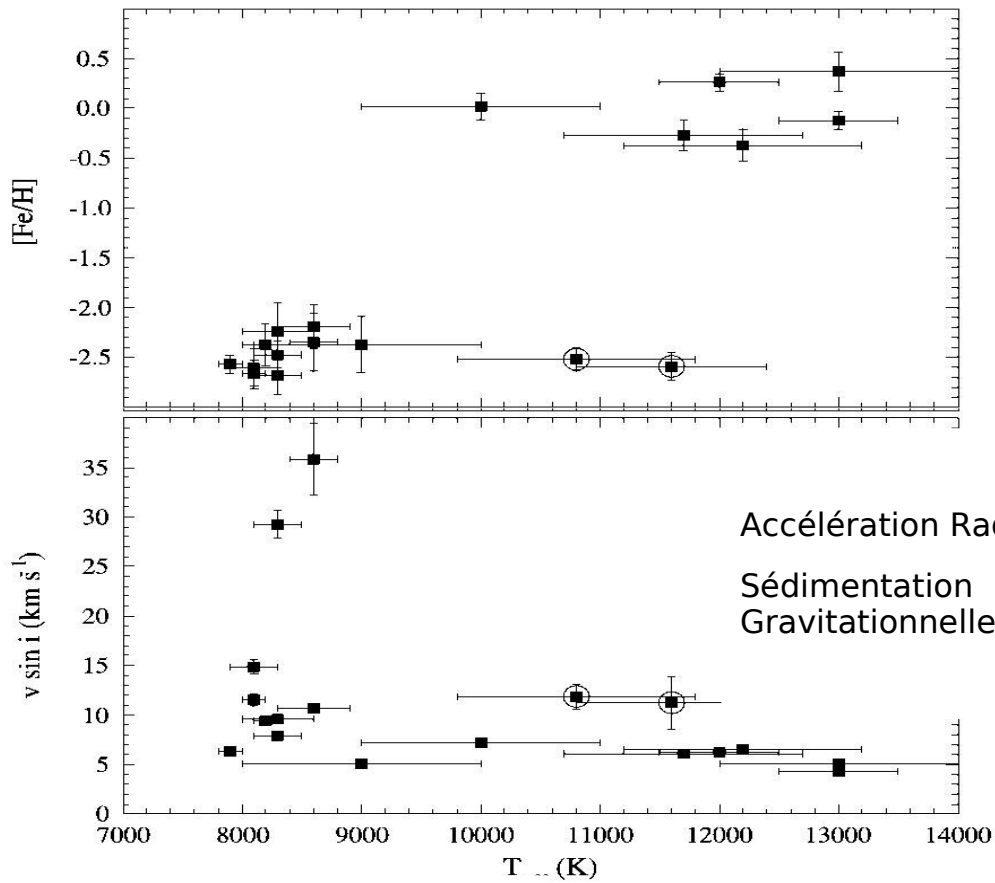
$T_{\text{eff}} = 10000 \text{ K}$ $\log(R) = -3$



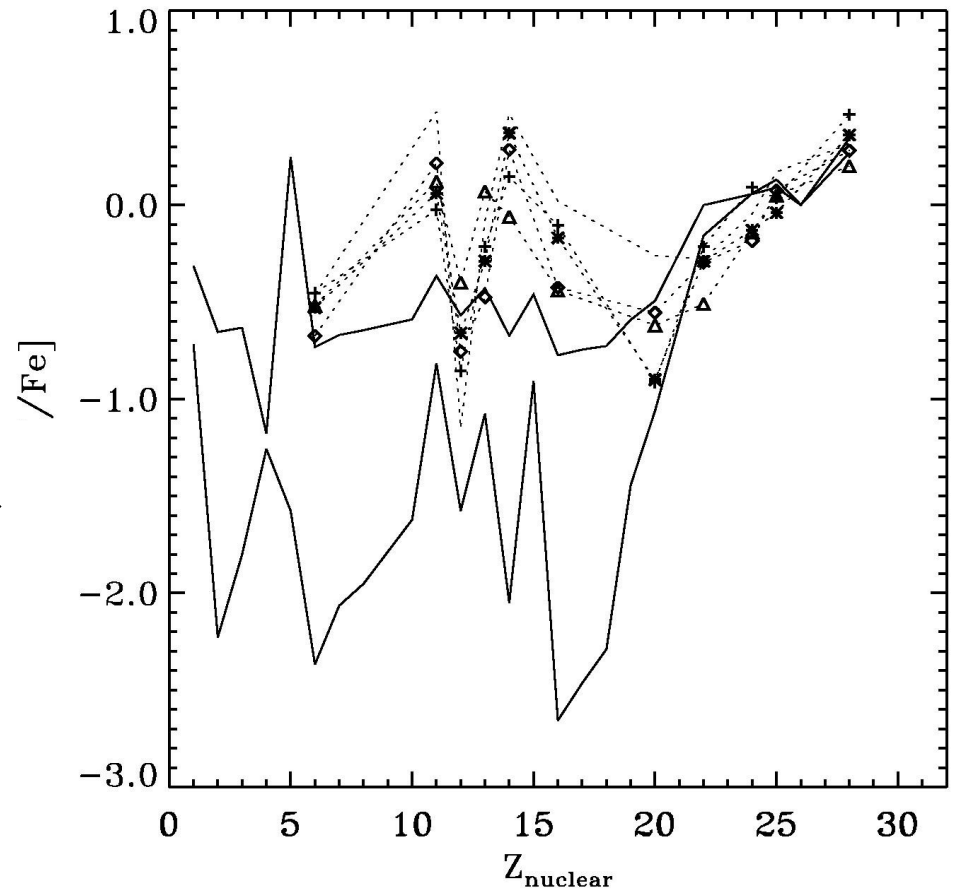
conséquences ...

Anomalies d'abondances incertaines

Comparaison: observations vs prédictions (OPAL)



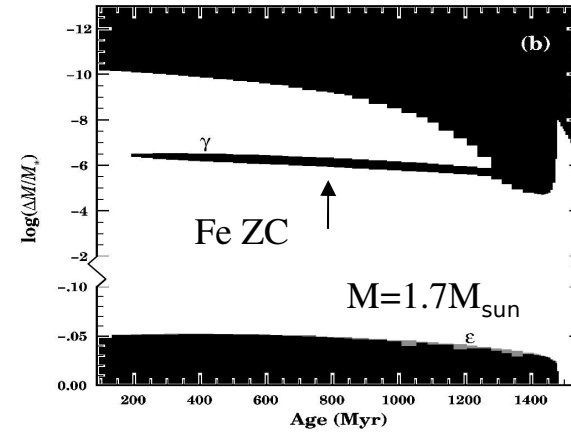
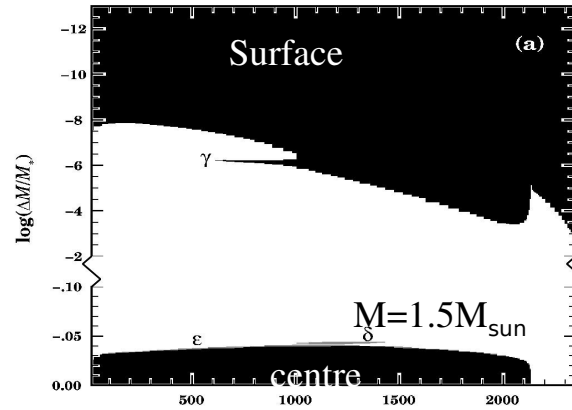
Behr et al. 2000 (ApJ 531:L37)



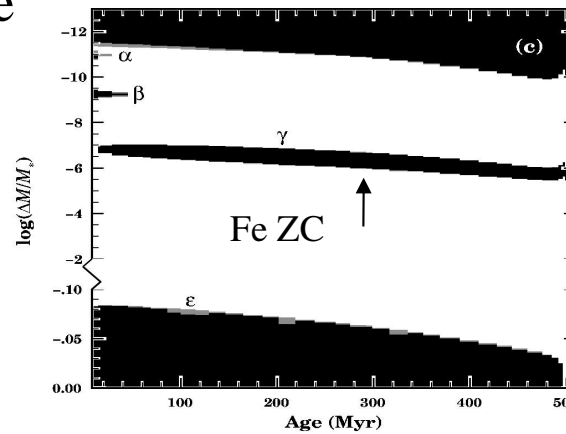
Turcotte et al. 1998 (ApJ 504:559-572)

... conséquences ...

Structure interne des étoiles
différente.



Age



$M=2.5M_{\text{sun}}$

Accélération
Radiative ↑
Sédimentation
Gravitationnelle ↓

conséquences

- **Modélisation Stellaire - Isochrones:**

- Masse des étoiles, compositions, métallicité, structure interne, variabilité, Age des amas globulaires .

- **Evolution stellaire – Enrichissement métallique:**

- Evolution chimique du MIS, de la galaxie.

- **Modélisation Atmosphérique - Spectres synthétiques:**

- composition, carte d'abondances, naissance et évolution des galaxies.

- **Expériences de laboratoires:**

- Calibration, chemin expérimental, mise à l'échelle.

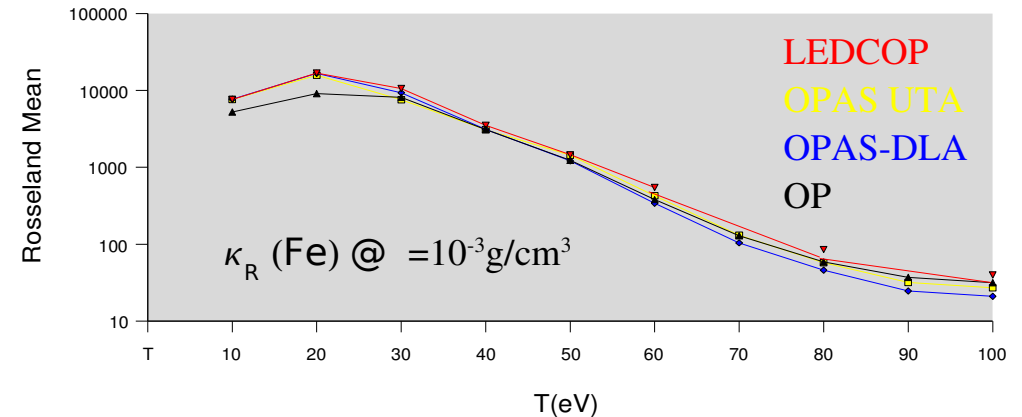
Conséquences: Feedback sur les données atomiques

F. Delahaye, C. Blancard, P. Cossé, G. Faussurier, J.C. Gauthier, O. Peyrusse

Quelles sont les sources de ces différences?

- ✓ L'équation d'état?
- ✓ Les données atomiques?
- ✓ Le calcul des moyennes?

Il faut démonter la machine entièrement!



Projet ODALISC:

◆ Objectif:

- Base de données d'opacités spectrales
- Beaucoup d'éléments – large domaine $\rho - T$
- Différentes sources/méthodes

◆ Equipe:

- 4 groupes de Phy. Atomique.
- Des expérimentateurs.
- Des spécialistes des simulations
- Une équipe informatique

