

Bilan et prospective PNPS

“Expérimentation numérique en physique stellaire”

Jean-Pierre Chièze (Sap), Luc Dessart (LAM),
Eric Josselin (LUPM), Boris Dintrans (IRAP)

Programme de la session

15:15 - 15:35 Bilan et prospective exp. numérique (*Boris Dintrans*)

15:35 - 15:55 Bilan et prospective exp. laboratoire (*Jean-Pierre Chièze*)

15:55 - 16:25 Pause café

16:25 - 16:40 Stellar Convection, Rotation and Magnetism (*Sacha Brun*)

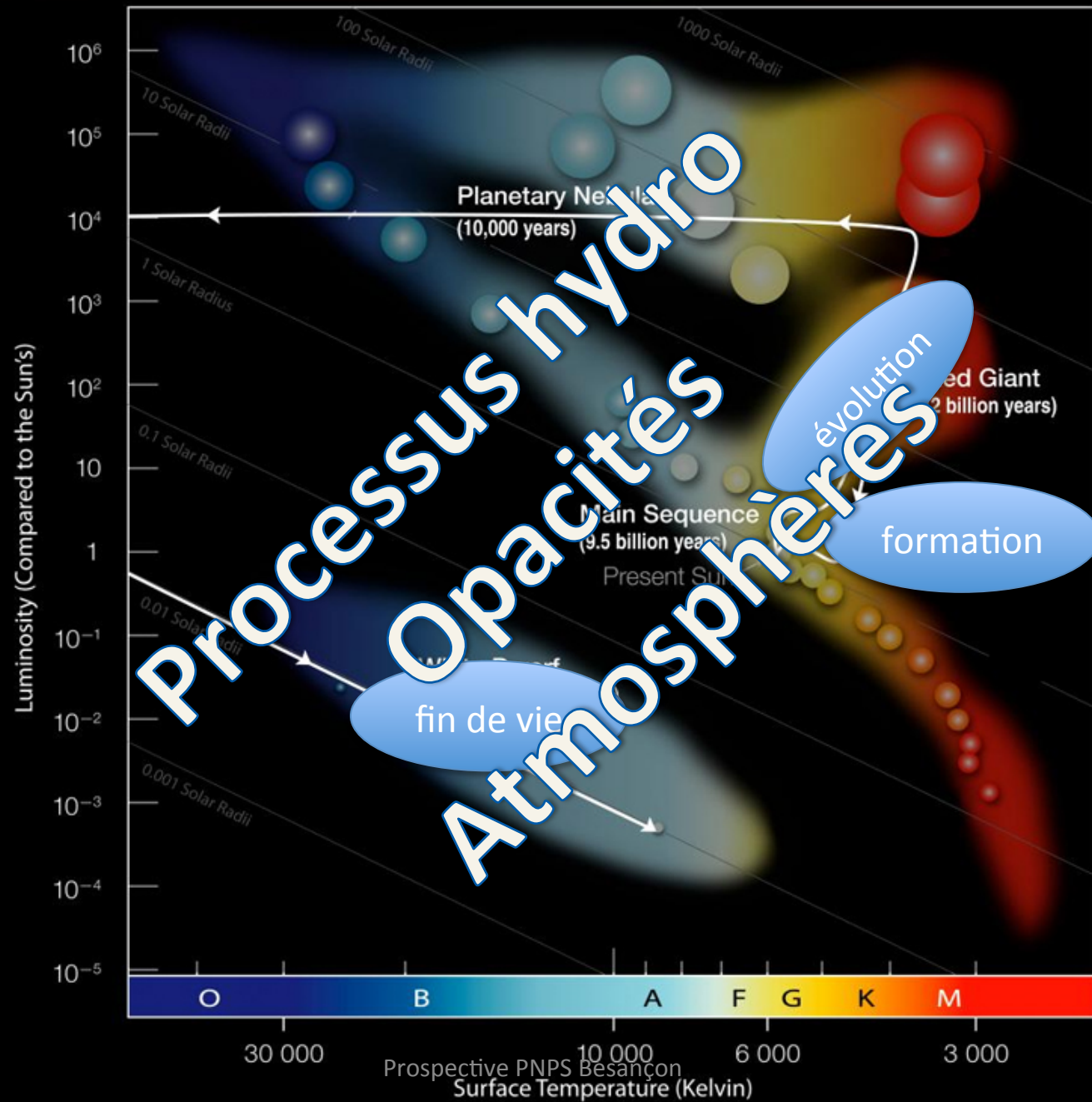
16:40 - 17:00 Hydrodynamique radiative (*Matthias Gonzalez*)

17:00 - 17:20 Tâches de service & BigData (*Franck Le Petit*)

17:20 - 17:35 Chocs d'accrétion sur les étoiles jeunes : apport de la simulation numérique et des expériences (*Chantal Stehlé*)

17:35 - 18:05 Discussion

H-R DIAGRAM - SUN'S EVOLUTIONARY TRACK



Pourquoi “autant de numérique” ?

- Il faut faire du multi-D :
 - Processus fondamentalement multi-D : convection, dynamo, transport, rotation, jets, formation avec **B**...
 - Dynamique très souvent non-linéaire : couplages compliqués (convection-pulsations, mécanismes d'excitation...), instabilités d'amplitude finie...
 - Calibrer/contraindre les modèles champ moyen type MLT, coeff. transport...
 - Instrumentation de plus en plus précise : temps courts et/ou petites échelles, couplages avec multi-physique/multi-échelle et non-linéarité (ex : SPIROU/NARVAL, COROT/KEPLER/PLATO, HERSCHEL/CALYPSO/ALMA/SMA...)
- Besoins reconnus au sens large du point de vue institutionnel :
 - niveau National depuis 2007 : 100M€ sur 5 ans dans GENCI/PRACE (Tier1/Tier0)
 - régional : mésocentres de calcul plus forts grâce à l'équipex Equip@Meso (PIA1), CPER dédiés...
 - PNPS : priorité transversale depuis 2 quadriennaux
 - ✓ actions visibles type EES2009, atelier PNPS dédié à la SF2A 2013, etc...
 - ✓ soutien pratique via les AO : aide au développement de codes, financement de missions collab./colloques,...

AO 2011 : 19 / 49 projets

Responsable du projet	Titre du projet	Laboratoire
Piercarlo Bonifacio	Nature et impact des premières étoiles galactiques	GEPI (Paris)
Jérôme Bouvier	Le magnetisme de etoiles de faible masse : origine, evolution, impact	IPAG (Grenoble)
Sacha Brun	Théorie, Simulations et Observations du Soleil, des étoiles de type solaire et de leur environnement	CEA IRFU (Paris)
Andrea Ciardi	Ejections des étoiles jeunes, modélisation et expériences sur installations électriques pulsée	LERMA (Paris)
Patrick De Laverny	Anomalies d'abondances chimiques, rotation, magnétisme et ondes internes dans les étoiles évoluées	CASSIOPEE (Nice)
Boris Dintrans	Simulations Numériques Multi-dimensionnelles en Dynamique des Fluides Stellaires	IRAP (Toulouse)
France Allard	Naines Brunes et Etoiles de Faible Masse : atmosphère et évolution	CRAL (Lyon)
Jean-François Gonzalez	Croissance et fragmentation des grains de poussière dans les disques protoplanétaires	CRAL (Lyon)
Jean-François Lestrade	Disques de débris et formation des planètes avec HERSCHEL et ALMA	LERMA (Paris)
Claire Michaut	Jets Astrophysiques et Rétroaction	LUTH (Paris)
Pascal Petit	Dynamo des jumeaux solaires : comparaison entre observations et simulations	IRAP (Toulouse)
Peggy Varnière	Bi-fluid vortices in 3D	AIC (Paris)
Rolf Walder	Simulations numériques multi-dimensionnelles de processus de physique stellaire	CRAL (Lyon)
Christophe Winisdoeffer	Thermodynamique des plasmas denses	CRAL (Lyon)
Georges Alecian	Impact de la diffusion des éléments et des opacités amendées sur l'évolution des étoiles	LUTH (Paris)
Lionel Bigot	Grille de modèles hydrodynamiques 3D des surfaces stellaires	CASSIOPEE (Nice)
Mohammad Heydari-Malayeri	Formation isolée et vents faibles des étoiles	LERMA (Paris)
Eric Josselin	Molécules et dynamique des étoiles supergéantes rouges	LUPM (Montpellier)
Pierre Lesaffre	Modèles de turbulence couplée à la rotation dans les étoiles	LERMA (Paris)

AO 2012 : 24 / 46 projets

Responsable du projet	Titre du projet	Laboratoire
Piercarlo Bonifacio	Nature et impact des premières étoiles galactiques	GEPI (Paris)
Andrea Ciardi	Ejections des étoiles jeunes, modélisation et expériences sur installations électriques pulsée	LERMA (Paris)
Benoît Commerçon	Formation des étoiles : théorie et observables synthétiques	LERMA (Paris)
Emmanuel Di Folco	Disques de poussières et Formation Planétaire	LAB (Bordeaux)
Patrick De Laverny	Anomalies d'abondances chimiques, rotation, magnétisme et ondes internes dans les étoiles évoluées	CASSIOPEE (Nice)
Boris Dintrans	Etude du couplage convection-pulsations et saturation non-linéaire des oscillations stellaires	IRAP (Toulouse)
Catherine Dougados	Etudes Multi-Echelles du processus Accretion-Ejection dans les étoiles Jeunes	IPAG (Grenoble)
Pierre Lesaffre	Modèles de turbulence couplée à la rotation dans les étoiles	LERMA (Paris)
France Allard	Naines Brunes et Etoiles de Faible Masse : atmosphère et évolution	CRAL (Lyon)
Jean-François Gonzalez	Croissance et fragmentation des grains de poussière dans les disques protoplanétaires	CRAL (Lyon)
Jean-François Lestrade	Disques de débris et formation des planètes avec HERSCHEL et ALMA	LERMA (Paris)
Ana Palacios	Comprendre les étoiles géantes et leur rôle dans l'évolution des galaxies	LUPM (Montpellier)
Ludovic Petitdemange	Modélisation des dynamos stellaires en rotation	LERMA (Paris)
Christophe Sauty	Accrétion-éjection au cœur des étoiles jeunes	LUTH (Paris)
Claire Michaut	Hydrodynamique radiative dans les processus d'accrétion/éjection	LUTH (Paris)
Pascal Petit	Dynamo des jumeaux solaires : comparaison entre observations et simulations	IRAP (Toulouse)
Sylvaine Turck-Chièze	Magnétisme, enveloppes stellaires et opacités	CEA IRFU (Paris)
Rolf Walder	Simulations numériques multi-dimensionnelles de processus de physique stellaire	CRAL (Lyon)
Christophe Winisdoeffer	Thermodynamique des plasmas denses	CRAL (Lyon)
Georges Alecian	Impact de la diffusion des éléments et des opacités amendées sur l'évolution des étoiles	LUTH (Paris)
Anne Dutrey	Physico-Chimie des Disques Protoplanétaires	LAB (Bordeaux)
Philippe Stee	Modélisation des étoiles chaudes massives et exploitation des mesures à haute résolution angulaire des instruments VLT/AMBER, VLT/MIDI et CHARA/VEGA	CASSIOPEE (Nice)
Eric Josselin	Molécules et dynamique des étoiles supergéantes rouges	LUPM (Montpellier)
François Lignières	Magnétisme des étoiles de masse intermédiaire	IRAP (Toulouse)

AO 2013 : 19 / 42 projets

Responsable du projet	Titre du projet	Laboratoire
Piercarlo Bonifacio	Nature et impact des premières étoiles galactiques	GEPI (Paris)
Emmanuel Di Folco	Disques de poussières et Formation Planétaire	LAB (Bordeaux)
France Allard	Naines Brunes et Etoiles de Faible Masse : atmosphère et évolution	CRAL (Lyon)
Jean-François Gonzalez	Croissance et fragmentation des grains de poussière dans les disques protoplanétaires	CRAL (Lyon)
Ana Palacios	Comprendre les étoiles géantes et leur rôle dans l'évolution des galaxies	LUPM (Montpellier)
Myriam Benisty	Etudes multi-échelles du processus accrétion-éjection dans les étoiles jeunes	IPAG (Grenoble)
Claire Michaut	Hydrodynamique radiative dans les processus d'accrétion/éjection	LUTH (Paris)
Sylvaine Turck-Chièze	Magnétisme, enveloppes stellaires et opacités	CEA IRFU (Paris)
Rolf Walder	Simulations numériques multi-dimensionnelles de processus de physique stellaire	CRAL (Lyon)
Stéphane Charpinet	Astérosismologie des étoiles compactes évoluées	IRAP (Toulouse)
Christophe Winisdoeffer	Thermodynamique des plasmas denses	CRAL (Lyon)
Georges Alecian	Impact de la diffusion des éléments et des opacités amendées sur l'évolution des étoiles	LUTH (Paris)
Anne Dutrey	Physico-Chimie des Disques Protoplanétaires	LAB (Bordeaux)
Philippe Stee	Modélisation des étoiles chaudes massives et exploitation des mesures à haute résolution angulaire des instruments VLT/AMBER, VLT/MIDI et CHARA/VEGA	CASSIOPEE (Nice)
François Lignières	Magnétisme des étoiles de masse intermédiaire	IRAP (Toulouse)
Lionel Bigot	Détermination interférométrique des diamètres stellaires par VEGA pour l'astérosismologie	CASSIOPEE (Nice)
Pierre Kervella	Vers une vision globale et cohérente de la perte de masse de Bételgeuse	LESIA (Paris)
Mathias Schultheis	Spectres à haute résolution des géantes M et naines M : Confrontation avec les modèles d'atmosphère	UTINAM (Besançon)
Lydia Tchang-Brillet	Physique atomique et moléculaire en physique stellaire : spectroscopie, opacités, collisions, magnétisme	LERMA (Paris)

AO 2014 : 17 / 34 projets

Responsable du projet	Titre du projet	Laboratoire
Piercarlo Bonifacio	Modélisation des atmosphères stellaires	GEPI (Paris)
France Allard	Naines Brunes et Etoiles de Faible Masse : atmosphère et évolution	CRAL (Lyon)
Jean-François Gonzalez	Croissance et fragmentation des grains de poussière dans les disques protoplanétaires	CRAL (Lyon)
Ludovic Petitdemange	Modélisation des dynamos stellaires en rotation	LERMA (Paris)
Claire Michaut	Hydrodynamique radiative dans les processus d'accrétion/éjection	LUTH (Paris)
Sylvaine Turck-Chièze	Magnétisme, enveloppes stellaires et opacités	CEA IRFU (Paris)
Christophe Winisdoeffer	Thermodynamique des plasmas denses	CRAL (Lyon)
Georges Alecian	Processus atomiques dans les étoiles : vers un renouveau du modèle standard	LUTH (Paris)
Philippe Stee	Modélisation des étoiles chaudes massives et exploitation des mesures à haute résolution angulaire des instruments VLT/AMBER, VLT/MIDI et CHARA/VEGA	CASSIOPEE (Nice)
Lydia Tchang-Brillet	Physique atomique et moléculaire en physique stellaire : spectroscopie, opacités, collisions, magnétisme	IRAP (Toulouse)
Chantal Stehlé	Etude expérimentale de chocs radiatifs dans différents régimes	LERMA (Paris)
Kevin Belkacem	Masses, rayons, et âges sismiques de la pré-séquence principale aux géantes rouges	LESIA (Paris)
Stéphane Blondin	Constraining the Progenitors and Explosion Mechanisms of Type Ia Supernovae through Radiative Transfer Simulations	LAM (Marseille)
Christophe Sauty	Accrétion-éjection au cœur des étoiles jeunes	LUTH (Paris)
Jean-Claude Bouret	Evolution and Atmosphere Models of Massive Stars, from the Main-Sequence to Core Collapse	LAM (Marseille)
Stéphane Charpinet	Astérosismologie des étoiles compactes évoluées	IRAP (Toulouse)
Ariane Lançon	Spectres stellaires et galactiques : cohérence UV+V+IR proche	Obs Strasbourg (Strasbourg)



Exemples de développements numériques soutenus sur 2011-2014

- Montpellier : MoRaD (hors ETL 1D)
- Lyon/Exeter : code implicite+AMR
- Paris : PARODY (solveur anélastique), HADES (hydro radiative 2D)
- Toulouse : Pencil Code (solveur implicite), Peanuts (sol. non-linéaires périodiques en temps) et ESTER (évolution à 2D)
- Tendances de fond au niveau algorithmique :
 - Implicite : Lyon, Paris, Toulouse [$T^{n+1}=f(T^n+T^{n+1})$]
 - Anélastique : Paris
 - Transfert radiatif : Montpellier, Toulouse, Paris
 - Massivement parallèle : tout le monde !

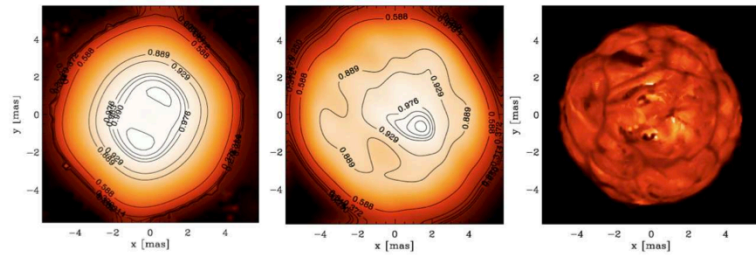


Fig. 1. Reconstructed image from VLTI-AMBER observations of VX Sgr (left panel) compared to the best visibility- and phase-matching 3D image from a CO⁵BOLD simulation (right panel), and the same synthetic image convolved with the PSF of the instrument (central panel). From Chiavassa et al. (2010b)

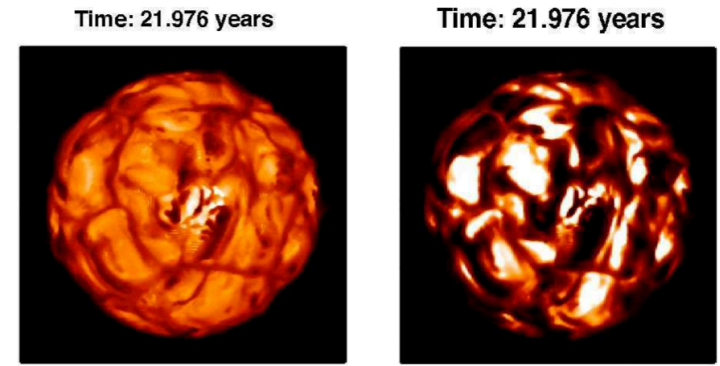


Fig. 2. Images computed with Optim3D from the same snapshot of an RSG CO⁵BOLD simulation; Left panel is in the K band with mostly contribution from the continuum (Chiavassa et al. 2009), and right panel is in the optical dominated by strong TiO absorption (Chiavassa et al. 2011b).

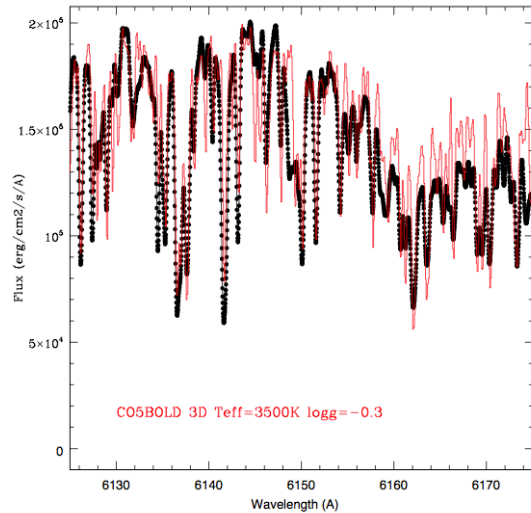
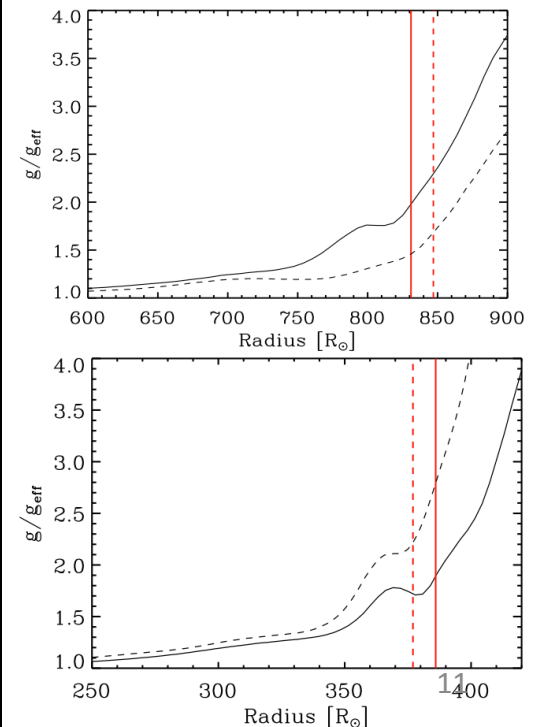


Fig. 4. The same Betelgeuse spectrum with an Optim3D synthetic spectrum from a snapshot of a grey CO⁵BOLD simulation with $T_{\text{eff}}=3500\text{K}$ (red line). Despite the lower T_{eff} , the TiO band head around 6160Å appears too shallow.

Chiavassa, Freytag et al. (2010-)
CO⁵BOLD+OPTIM3D pour les
super-géantes rouges

Prospective PNPS Besançon



Synthetic observations

3D radiative transfer

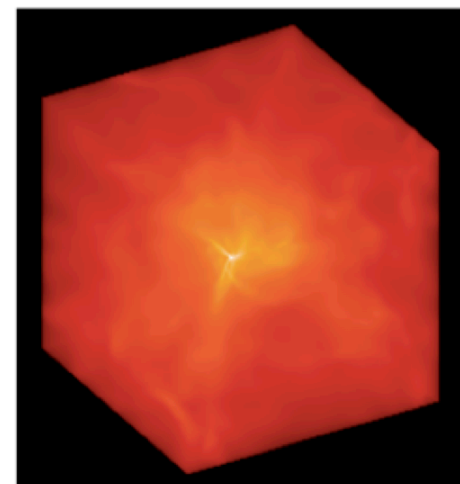
interface with the 3D radiative transfer code **RADMC-3D** (Dullemond, ITA-Heidelberg, Germany) to postprocess the RAMSES calculations.

★ RADMC-3D features:

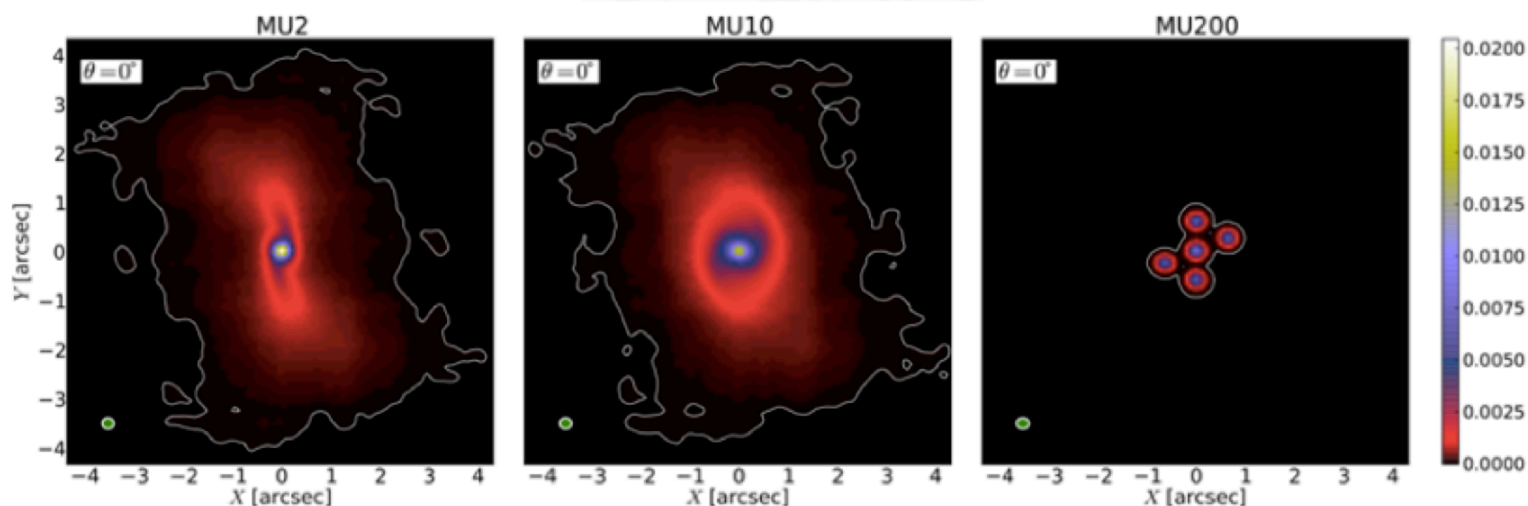
- dust continuum emission
- line emission

★ RADMC-3D outputs:

- dust emission maps
- spectral energy distribution
- line emission maps/profiles



ALMA PREDICTIONS



Fin de vie : spectres synthétiques par Blondin, Dessart et al. (2013) avec CMFGEN

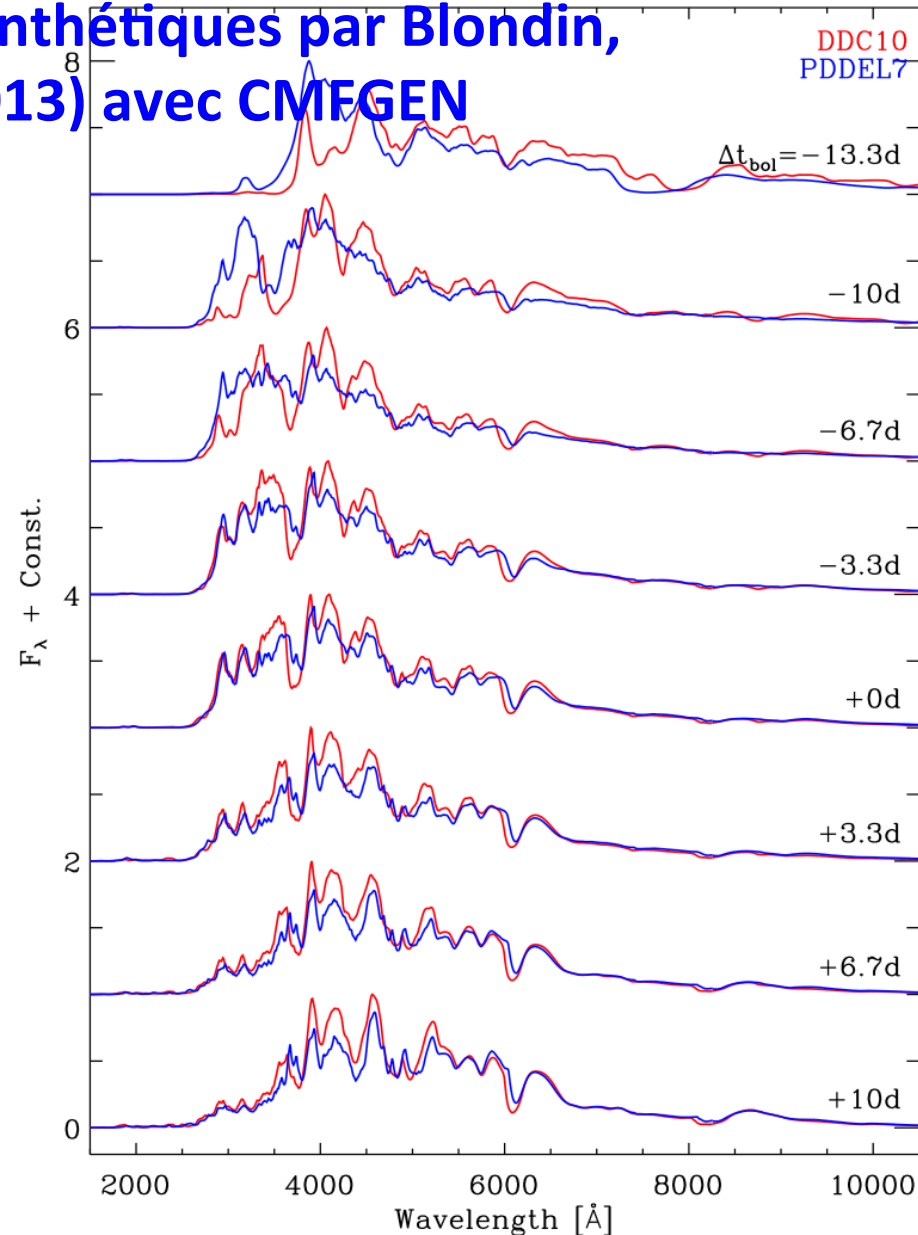
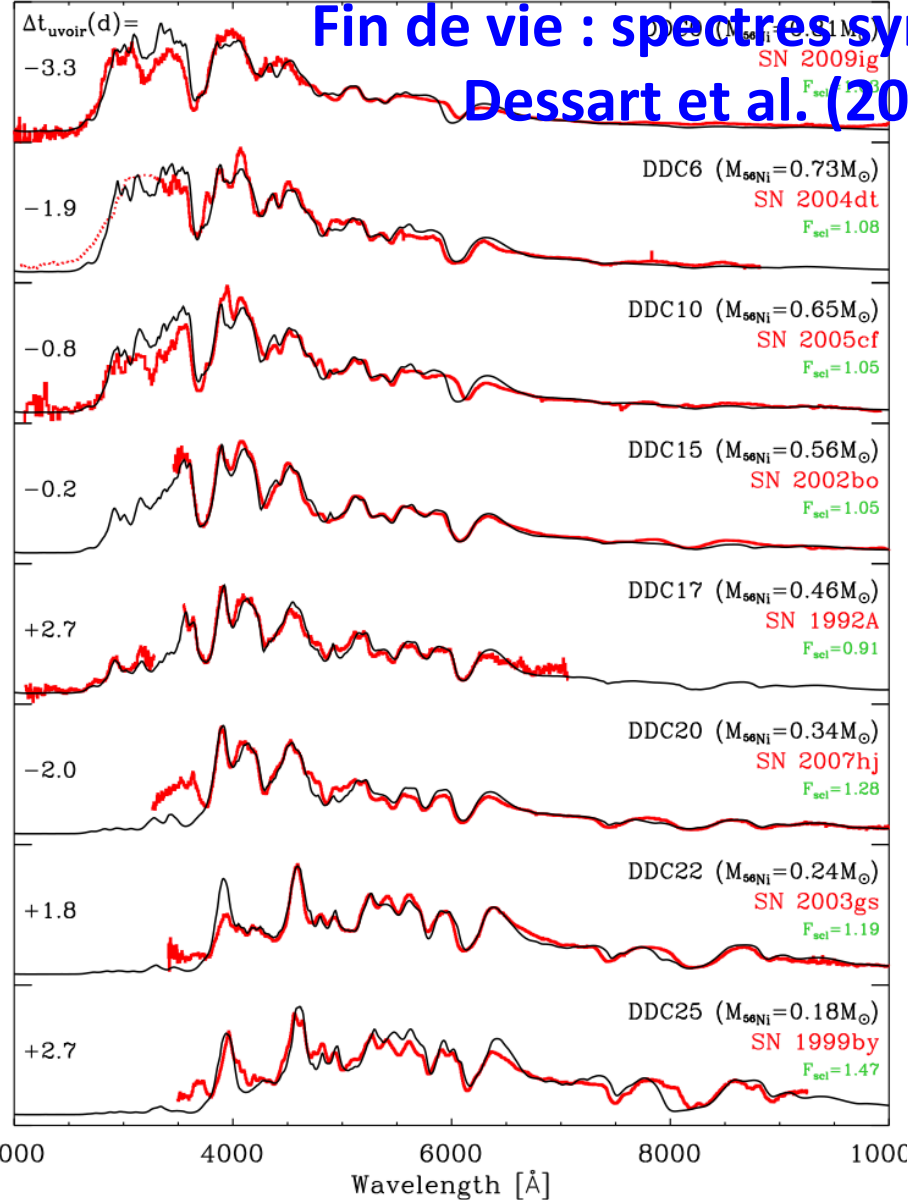


Figure 1 : Comparison of synthetic spectra of delayed-detonation models (black) to observed SNe Ia near maximum light (red). The tickmarks on the ordinate give the zero-flux level. The time label corresponds to days from pseudo-bolometric (UVOIR) maximum. The observed spectra have been redshifted, de-reddened, and scaled to match the absolute *V*-band magnitude inferred from the corresponding SN Ia photometry. An additional scaling (F_{scl} ; green label) has been applied to the observed spectra to reproduce the mean synthetic flux in the range 4000-6000 Å. For SN 2004dt we add the low-resolution *HST* ACS grism spectrum (dotted line) published by Wang et al. (2012). (From Blondin et al., 2013)

Figure 2 : Spectral evolution between -13 and $+10$ days from bolometric maximum for a standard delayed-detonation model (DDC10, red) and one where the detonation was preceded by a strong pulsation in the progenitor WD star (PDDEL7, blue). Both models have $\sim 0.6 M_{\odot}$ of ^{56}Ni , and hence similar peak bolometric luminosities, yet the early-time spectra are radically different in both cases, begin much bluer (hotter) for model PDDEL7. Accurate radiative transfer with CMFGEN can thus enable us to distinguish between different explosion mechanisms. (From Dessart et al., in preparation).

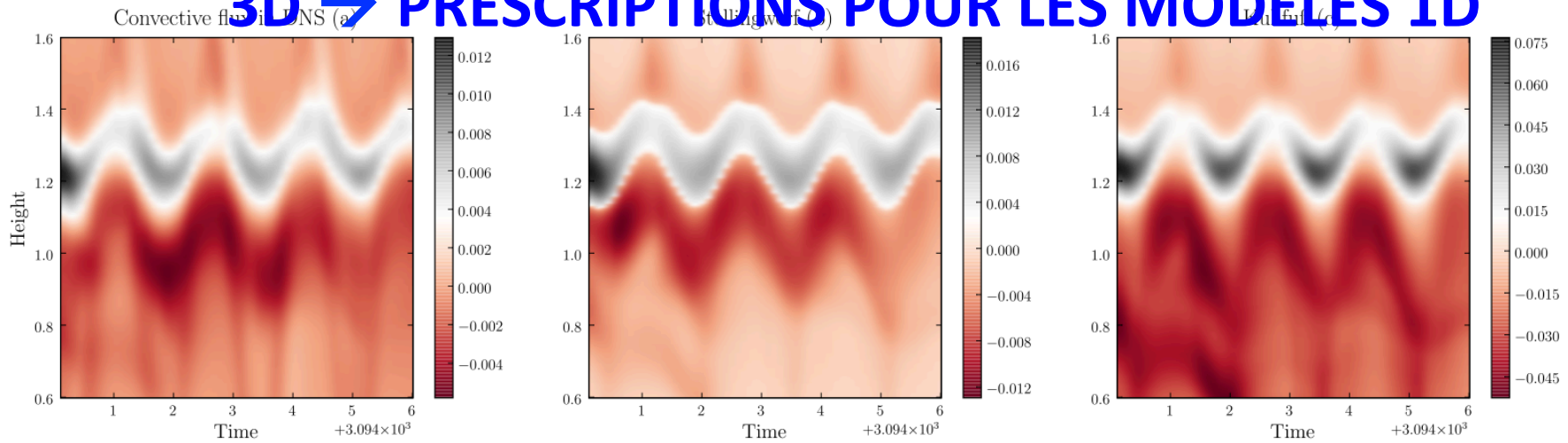


Fig. 2. Evolution of the convective flux in a (t, z) plane: **(a)** in the DNS malism $\mathcal{F}_{\text{Ku}}$ (for $\alpha_{\text{St}} = \alpha_{\text{Ku}} = 1$). The vertical extent is centred on b These snapshots were computed after 1800 periods of oscillations, i.e

Convection dépendante du temps : Gastine & Dintrans (2011)

$$\begin{cases} \mathcal{F}_{\text{St}}(z, t) = \alpha_{\text{St}} \frac{A}{B} \mathcal{E}_t \text{sign}(\nabla - \nabla_{\text{ad}}) \sqrt{|\nabla - \nabla_{\text{ad}}|}, \\ \mathcal{F}_{\text{Ku}}(z, t) = \alpha_{\text{Ku}} A \sqrt{\mathcal{E}_t} (\nabla - \nabla_{\text{ad}}), \end{cases} \quad (1)$$

where $\nabla = d \ln T / d \ln p$, $\nabla_{\text{ad}} = 1 - c_v / c_p$ and

$$\mathcal{E}_t(z, t) = \left\langle \frac{u_z'^2}{2} \right\rangle, \quad A = c_p \langle \rho \rangle \langle T \rangle \quad \text{and} \quad B = \sqrt{c_p \langle T \rangle \nabla_{\text{ad}}}, \quad (2)$$

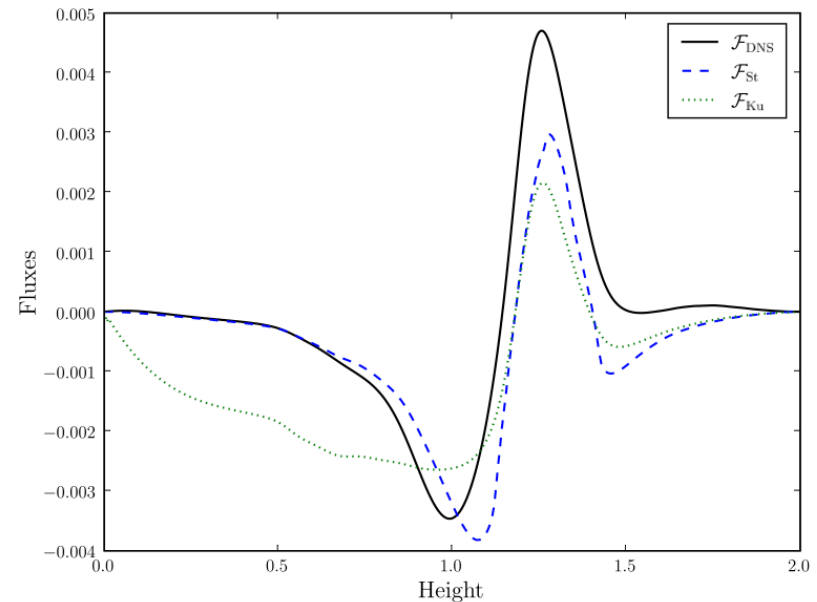


Fig. 4. Mean convective flux in the DNS (solid black line), compared with the best TDC predictions based on the optimal α values that came out of the χ^2 -test in §3.3 (Stellingwerf's model is a dashed blue line and Kuhfuß's a dotted green line). 14

3D → PRESCRIPTIONS POUR LES MODÈLES 1D

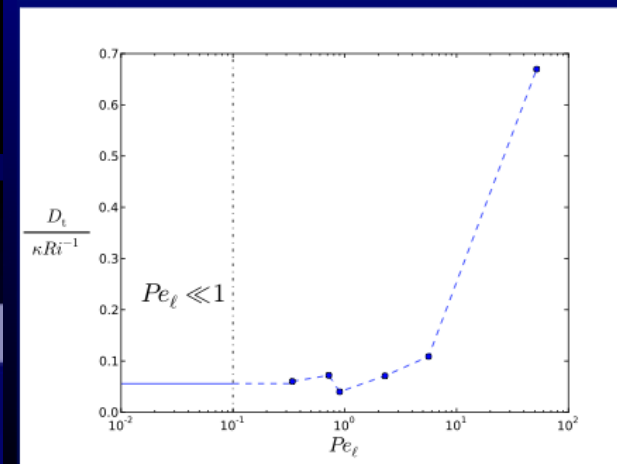
Thèse de Vincent Prat
(IRAP) : transport
turbulent dans une zone
radiative cisillée

$$D_v \simeq \frac{1}{3} \kappa \frac{Ri_c}{N^2} \left(r \sin \theta \frac{d\Omega}{dr} \right)^2 \simeq \frac{\kappa}{3} \frac{Ri_c}{Ri}$$

Recapitulatif des principaux résultats

Petits nombres de Péclet

- accord qualitatif avec la prescription de Zahn (1992)
- estimation quantitative du coefficient de diffusion



Grands nombres de Péclet

- incompatibilité avec le modèle de Maeder (1995)
- accord avec le modèle de Lindborg & Brethouwer (2008)
- nouvelle prescription utilisable dans les codes d'évolution (à confirmer)

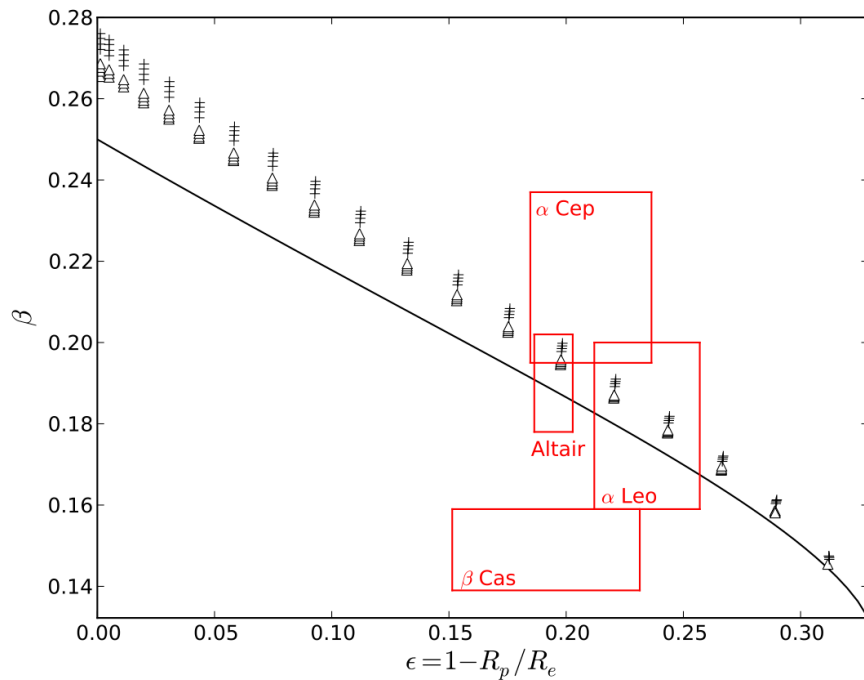
Effet dynamique de la stratification chimique

- accord avec le modèle de Maeder & Meynet (1996)
- incompatibilité avec celui de Maeder (1997)

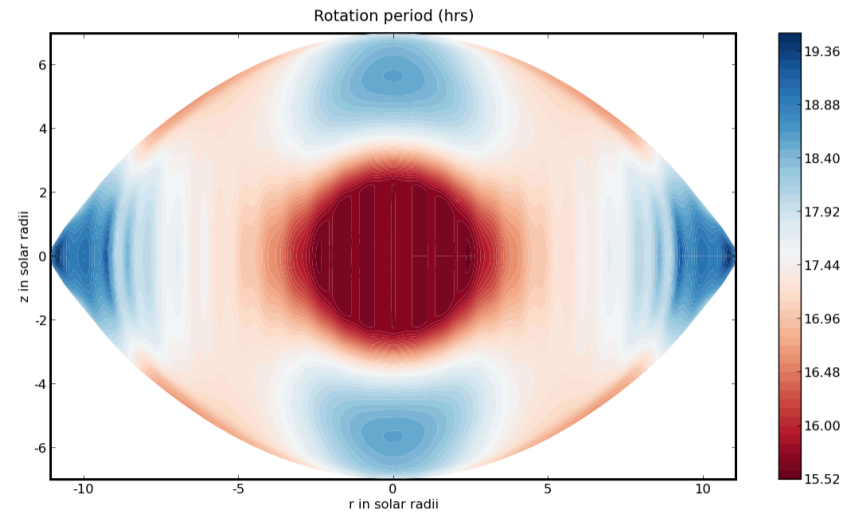
Viscosité turbulente

- relation générale entre diffusivité et viscosité turbulentes

L'évolution stellaire à 2D



Structure 2D d'une étoile en rotation rapide avec ESTER (Espinosa Lara & Rieutord 2011, 2013)

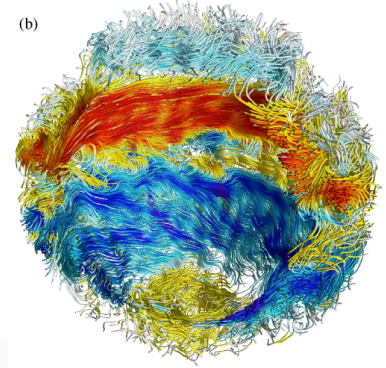


Espinosa Lara & Rieutord (2013)

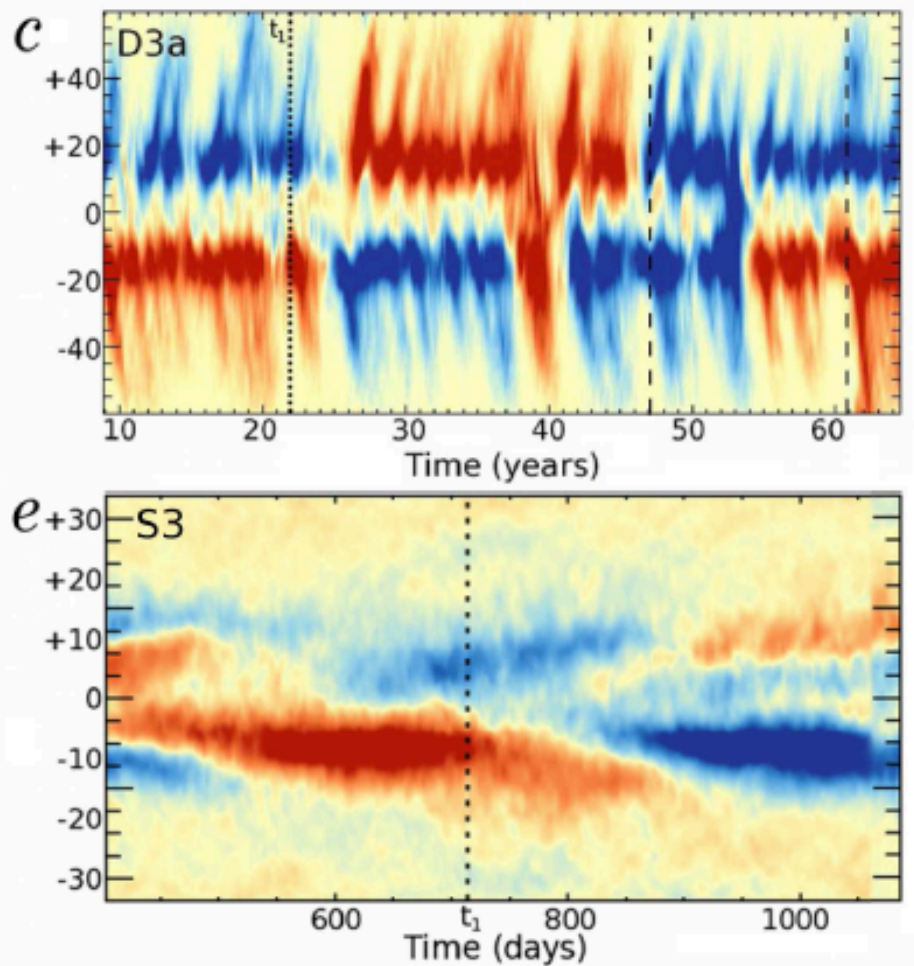
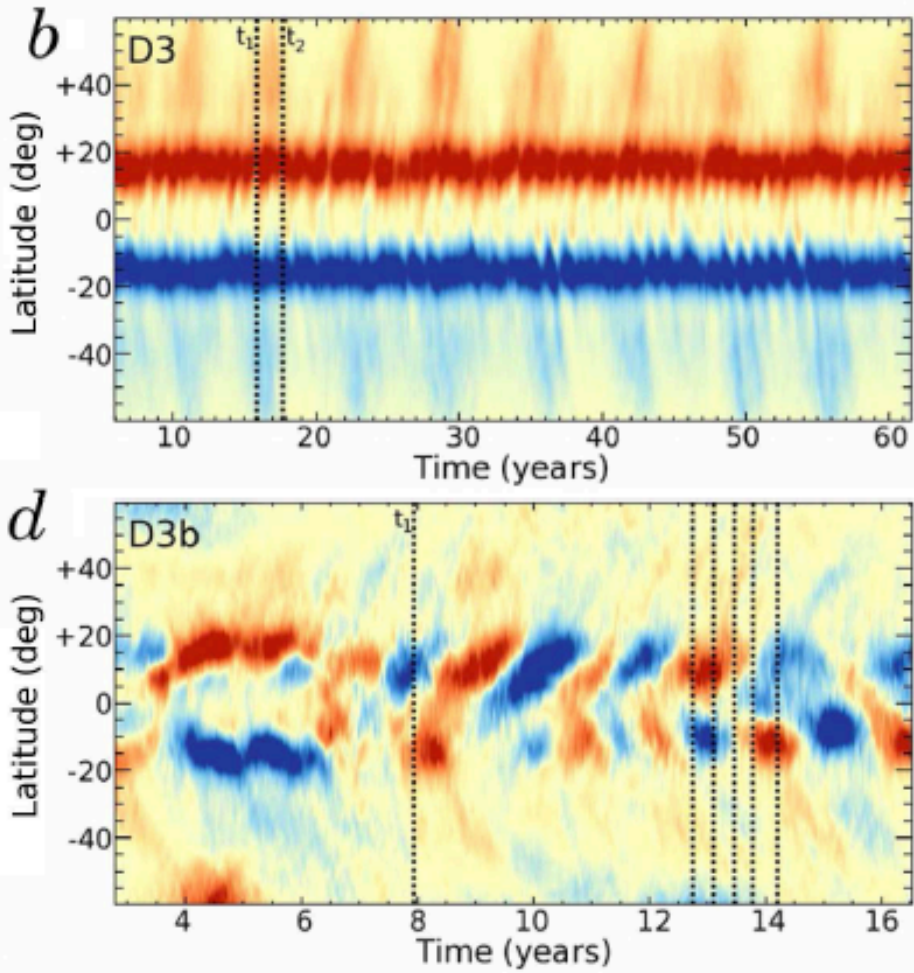
3-D stellar dynamo models:

Decreasing Magnetic Diffusion yields Cyclic Activity

Butterfly diagrams (time-latitude plots of $B_{\phi i}$)



More diffusive case



Applications multiples en physique stellaire:

Convection turbulente, overshooting → calibration des modèles 1D (Geneve, Toulouse, Lyon, etc...)

Interaction convection-pulsation → crucial pour l'astérosismologie

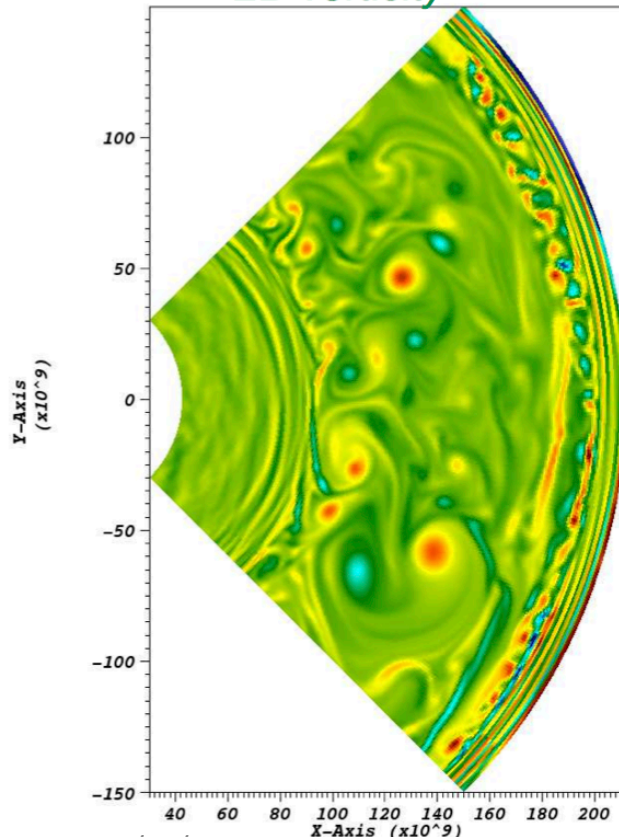
Rotation: transport de moment angulaire, mélange chimique

→ approche complémentaire de ESTER (Toulouse)

➡ Project en cours: effets de l'accrétion sur la structure et l'évolution d'objets très jeunes

Liens avec les activités en Formation Stellaire (cf Estelle Moraux/Jerome Bouvier)

2D vorticity



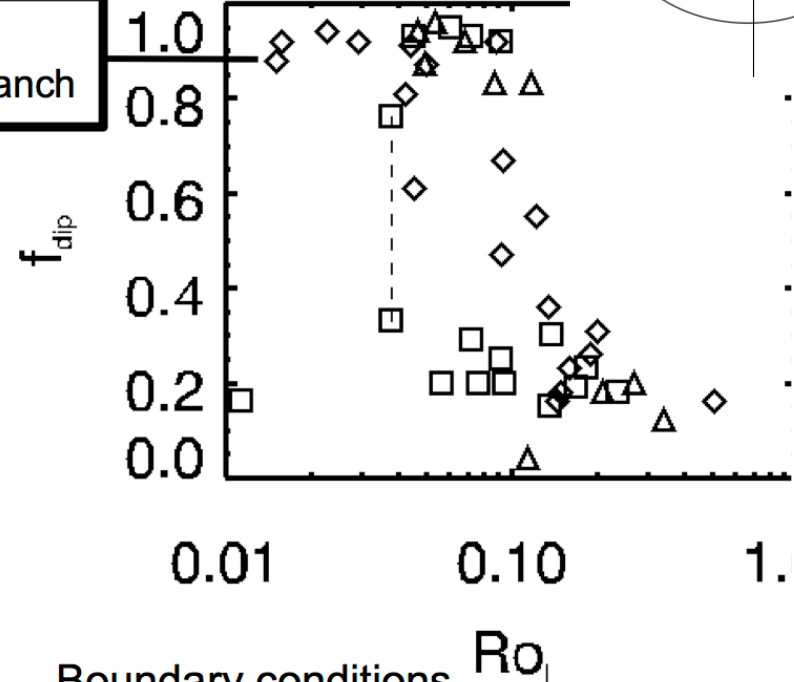
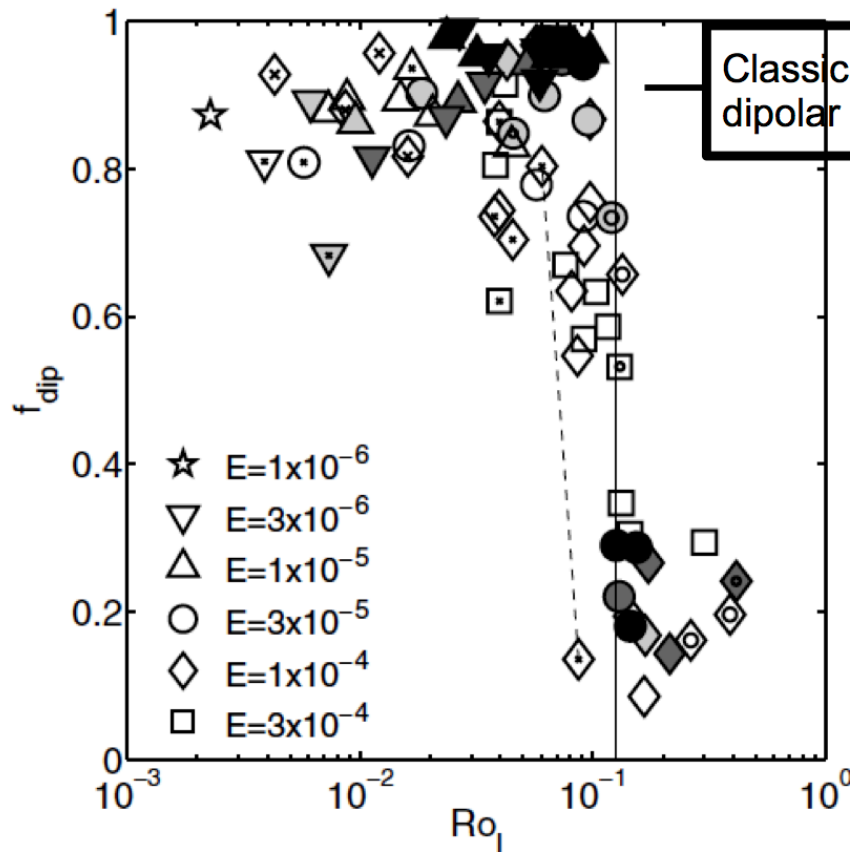
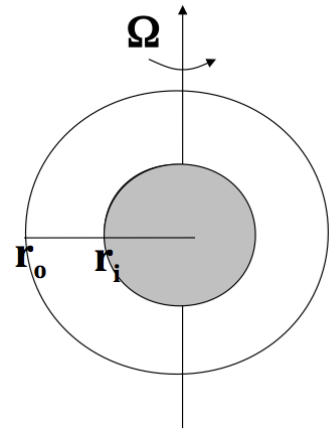
Etude de $1 M_{\odot}$ (~ 1 Myr, 60 % convectif)

Temps convectif $\tau_{\text{conv}} \sim 10 \text{ yr} - 150 \text{ yr}$
~ de l'ordre de la durée d'un burst d'accrétion

Effets de la variation de:

- $\dot{M}$ ($10^{-4} M_{\odot}/\text{yr} - 10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$)
- Entropie de la matière accrétée (accrétion "chaude" ou "froide")

Using Stress Free boundary conditions Dipolar, multipolar and bistable regimes



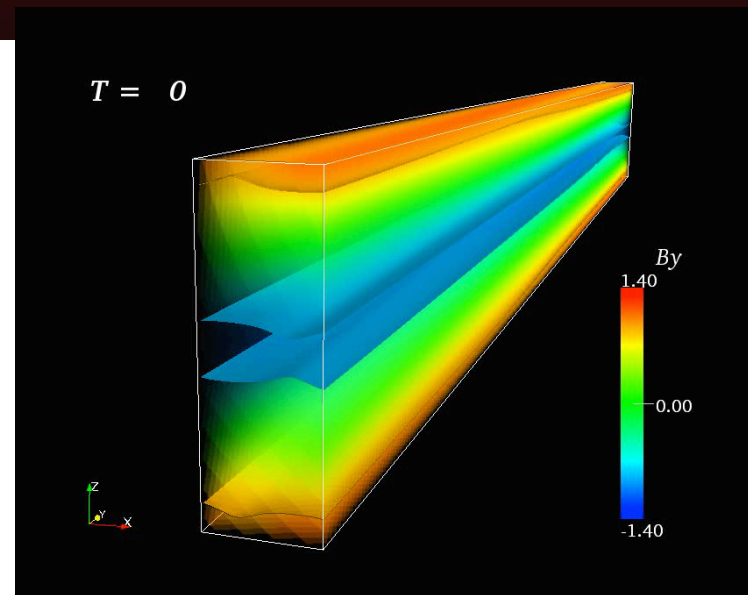
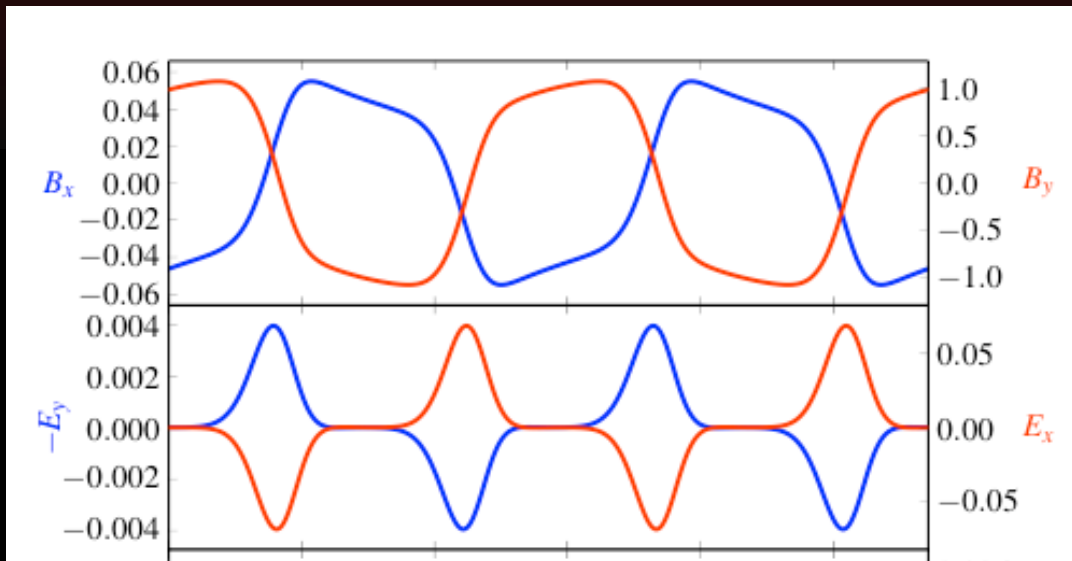
Geodynamos simulations
using different dimensionless parameters
Christensen & Aubert 2006

Boundary conditions
 $\triangle$ Rigid/Stress-Free
 $\square$ Stress-Free/Stress-Free
 $\diamond$ Rigid/Rigid

$Ro_l < 0.1$: bistable regime

Schrinner, Petitdemange, Dormy ApJ 2012

Soutien aussi à des projets plus “amont” : exemple de la saturation de la MRI avec les codes PEANUTS/SNOOPY (Rincon et al.)



ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE SUR LE NUMÉRIQUE

Nécessité d'accompagner le fort développement du numérique :

- Trop peu de fonction support sur le numérique (IR)
 - Pas de reconnaissance du travail de développement (ex : “oui mais bon vous avez fait quoi après tous ces longs développements ?”), penser au label C3I (CPU+GENCI+INRIA)
 - Exemple de SCOA : tâche de service Méso-NH reconnue par le CNAP
 - Besoin de plus de formation initiale : modules en calcul scientifique en LMD et écoles d'ingénieur
-
- Importance des codes libres :
 - une réponse possible à la difficulté d'avoir des ETP dédiés type IR
 - facilite les collaborations nationales/internationales
 - lutte contre les redondances inutiles
 - visibilité accrue du développement numérique
 - certes compliqué à mettre en place mais forte valeur ajoutée
-
- Défis numériques :
 - Implicite, transfert ++ (crucial partout !), physico-chimie (feedback des grains sur le gaz...)
 - Arrivée des architectures hybrides many cores + GPGPU : besoin de revoir l'algorithme de nos codes de simulation, il y aura des gagnants “faciles” (algèbre linéaire) et des gagnants “besogneux” (DNS explicite)
 - Partage d'expériences/bonnes pratiques : se rapprocher des structures mutualisées dans le calcul (centres régionaux/nationaux qui ont de l'expertise à partager, Maisons de la Simulation...)
-
- Le *Big Data* arrive aussi en physique stellaire : **talk de F. Le Petit**
 - données observationnelles : gros instruments/surveys = gros jeux de données à traiter/diffuser (e.g. PolarBase)
 - données numériques multi-D : grosses sorties à traiter, parfois même en parallèle
 - convergence des besoins calcul et data : la nouvelle stratégie calcul du CNRS (pôle RSTCD) [réunion ORAP sur le sujet le 10 Avril avec Jean-Pierre Vilotte pour l'INSU]
 - des OV se mettent en place un peu partout (Paris, Strasbourg, Nice, Marseille, Toulouse, Besançon...) avec ASOV pour coordonner (CDS, Terapix, CDPP, Bass2000, Medoc...) et les PN donnent leur avis sur la labellisation des SO5
-
- Ré-activation de l'ASSNA pour le “lobbying du numérique”, et enquête *moyens de calcul* pour prospective INSU

Prospective INSU - Centres de calcul nationaux

Ce sondage fait partie de l'exercice de prospective de la communauté astronomie et astrophysique de l'INSU. Il s'adresse à l'ensemble des utilisateurs et utilisatrices des moyens de calcul nationaux (GENCI), internationaux (PRACE ou autres), et régionaux. Il a pour objectif de recenser l'utilisation faite par notre communauté de ces moyens, et de comprendre si l'évolution anticipée de ces moyens à 5-10 ans accompagne l'évolution des besoins de notre communauté.

Le questionnaire prend environ une dizaine de minutes à remplir. Peut-être plus si vous souhaitez développer certains commentaires libres (n'hésitez pas!). Les réponses sont anonymes par défaut, mais vous avez la possibilité de laisser vos coordonnées si vous le souhaitez.

Remarque sur la protection de la vie privée

Ce questionnaire est anonyme.

L'enregistrement de vos réponses à ce questionnaire ne contient aucune information permettant de vous identifier, à moins que l'une des questions ne vous le demande explicitement. Si vous avez utilisé un code pour accéder à ce questionnaire, soyez assuré qu'aucune information concernant ce code ne peut être enregistré avec vos réponses. Il est géré sur une base séparée ou il sera uniquement indiqué que vous avez (ou non) finalisé ce questionnaire. Il n'existe pas de moyen pour faire correspondre votre code à vos réponses sur ce questionnaire.

[Charger un questionnaire non terminé](#)[Suivant ►](#)[Sortir et effacer vos réponses](#)