

# Session "Atmosphères, vents, perte de masse"

8:30-8:50: Bilan et perspectives (F. Martins)

8:50-9:10: Etoiles évoluées (E. Josselin) - *revue*

9:10-9:25: Etoiles pauvres en métaux et riches en carbone: les témoins des premières étoiles (T. Masseron)

9:25-9:45: Etoiles de petites masses et naines brunes (C. Reylé) - *revue*

9:45-10:00: Etude spectroscopique détaillée des étoiles A0-A1 à faible vsini (F. Royer)

10:00-10:30: Pause café

10:30-10:45: The X-shooter Spectral Library Project (A. Lançon)

10:45-11:00: Propriétés des étoiles massives à faible métallicité (J.C. Bouret)

11:00-11:15: Modélisation des étoiles chaudes massives et exploitation des mesures hautes résolution angulaire des instruments VLT/AMBER, VLT/MIDI et CHARA/VEGA (P. Stee)

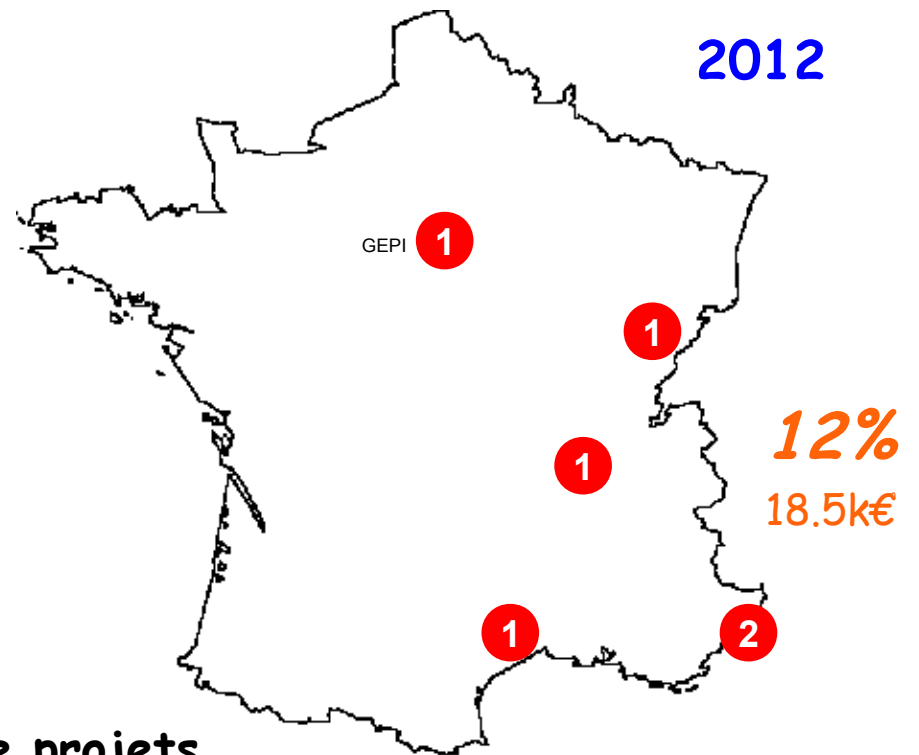
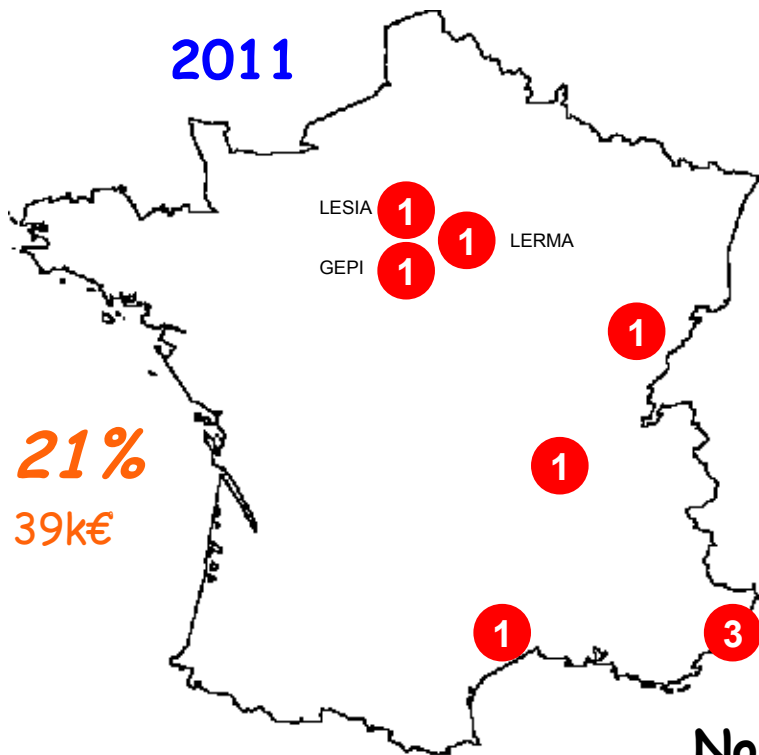
11:15-11:45: discussion (F. Martins et al.)

# Atmosphères, vent, perte de masse, environnements stellaires

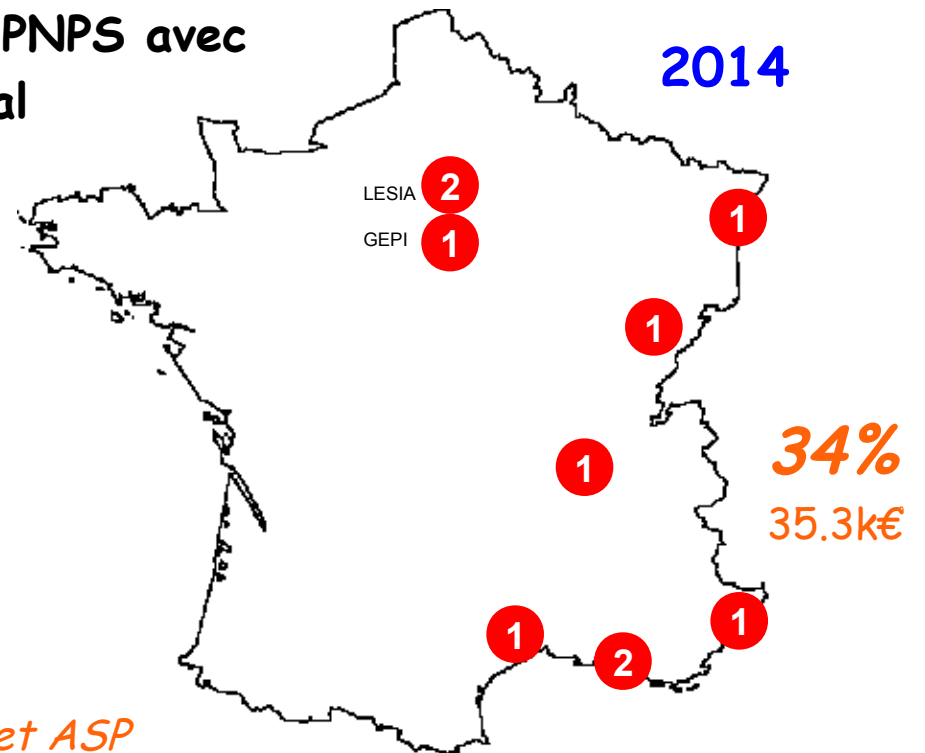
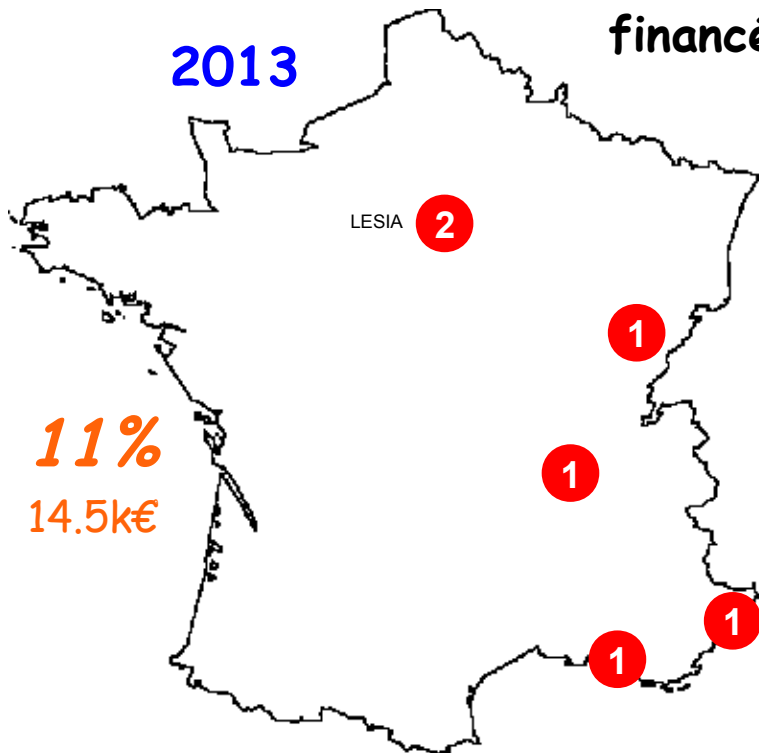
Bilan administratif, highlights, pistes de prospective

Fabrice Martins  
Céline Reylé, Eric Josselin  
Philippe Stee, Pierre Kervella

*Contributions de G. Alecian, I. Baraffe, L. Bigot, J.C. Bouret, P.  
Delorme, N. Feautrier, F. Thévenin*



Nombre de projets  
financés par le PNPS avec  
PI local



% du budget ASP

## Thématiques abordées ces 4 dernières années

### Etoiles chaudes/massives:

- rotation (Royer)
- abondances de surface (Alecian; Bouret; Martins - ANR)
- supernovae "core collapse" (Dessart - ANR)
- géométrie/disques - rotation Keplerienne (Meilland, Millour, Stee, Chesneau...)
- perte de masse (Bouret/Martins, Chesneau/Stee)

### Etoiles froides et/ou évoluées:

- hors-ETL (Merle/Thévenin, Caffau/Bonifacio, Feautrier, Lambert/Josselin)
- 3D (Caffau/Freytag, Bigot/Chiavassa/Creevey...)
- perte de masse (Mauron/Josselin, Lagadec, Montargès/Kervella)
- environnements proches (Montargès/Kervella/Perrin)
- propriétés de surface (Montargès/Kervella/Chiavassa)
- Gaia ESO survey (de Laverny/Recio-Blanco - ANR)

### Etoiles de petite masse/naines brunes:

- naines M: métallicité (Rajpurohit/Reylé/Neves/Bonfils/Delfosse), échelle de Teff (Rajpurohit/Reylé/Allard/Schultheis)
- naines brunes: nuages (Allard; Baraffe - ERC), détection et caractérisations (Delorme, Delfosse, Forveille, Reylé, Allard)

### "Environnement":

- céphéides (Nardetto/Mourard, Kervella)
- binarité (Kervella/Perrin, Halbwachs, Martins/Bouret, Millour/Chesneau/Stee)

+ ~6 thèses

~150 articles dont ~50 en 1er auteur

Physique fondamentale (Tchang-Brillet/Feautrier...)

**2011-2014**

**Quelques** highlights scientifiques basés sur les contributions reçues de la communauté

**Non exhaustif**

Complété par les autres présentations de la session

# Physique atomique et moléculaire en physique stellaire (L. Tchang-Brillet, N. Allard, N. Feautrier, S. Sahal-Bréchet, A. Spielfiedel, C. Blaess, N. Champion, et collaborateurs)

## Outils:

**Expériences:** spectromètre VUV de 10m sous vide (Meudon)

**Théorie:** spectroscopie, physique et chimie quantique, collisions, élargissement Stark, opacités quasi-moléculaires

## 1. Spectroscopie VUV à haute résolution (longueur d'onde, forces d'oscillateur, énergies des niveaux, facteur de Landé)

→ ions lourds multichargés / H<sub>2</sub> et ses isotopologues

**Projets:** lanthanides, Mn, Fe, Ni moyennement ionisés, tungstène, HD

## 2. Collisions atomiques avec H, écarts à l'ETL, préparation observations GAIA

→ excitation collisionnelle de MgI, CaI, CaII, OI

**Projets:** développement de méthodes approchées pour atomes complexes (Fe) *voir talk E. Josselin*

## 3. Profils de raies: Elargissement Stark des raies des atomes et des ions / Opacités atomiques et moléculaires

→ Profils synthétiques de raies atomiques perturbées par collision, applications aux naines blanches

**Projets:** largeurs Stark des raies de CI, OI, OII / profils des raies de résonance de Ca<sup>+</sup> et Mg<sup>+</sup> (collisions avec He)

## 4. Bases de données

→ développement de la base STARK-B

# Diffusion des métaux dans les atmosphères magnétiques (G. Alecian et al.)

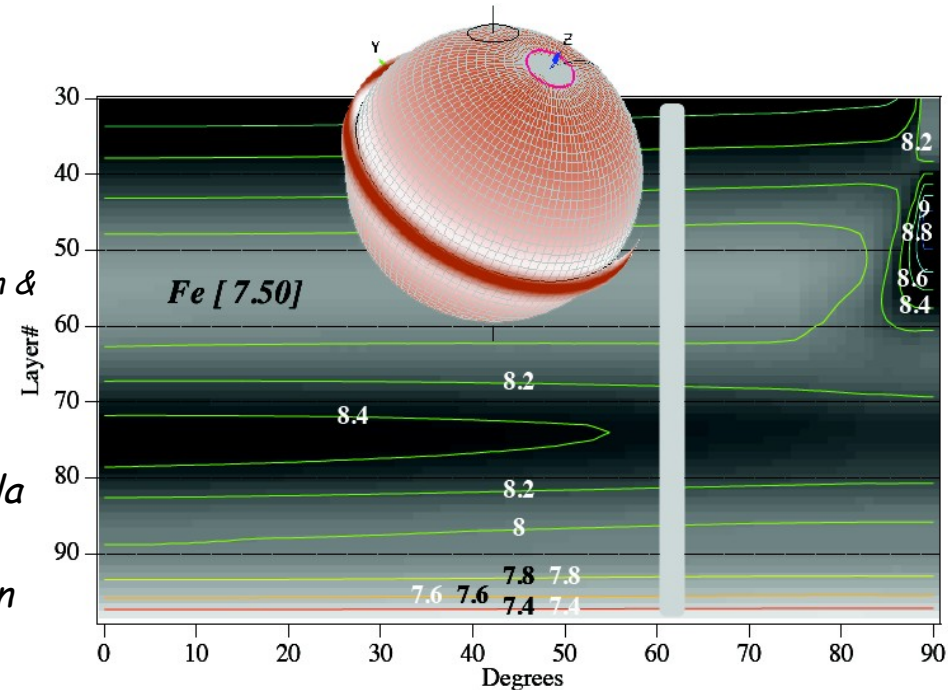
## Processus physiques/méthodes

- *diffusion microscopique*
- *accélération* radiatives
- transfert de rayonnement *polarisé* avec effet Zeeman (Alecian & Stift 2010)

## Modélisation numérique

Code CaratStrat: *seul code actuellement capable de modéliser* la distribution des *métaux* à la surface des Ap magnétiques.

Structure autocohérente en T et P avec les abondances (Alecian et al., 2011, 2014).



Distribution du Fe dans une atmosphère 12000K, 20kG dipolaire

## Bilan :

- Distribution 3D des abondances (d'équilibre) dans les atmosphères magnétiques.
- Diffusion *dépendante du temps* dans les milieux optiquement minces
- Mise en évidence du comportement *chaotique* de certaines abondances superficielles.

## Perspectives :

- Modélisation 3D *dépendante du temps*.
- Stabilité des inhomogénéités d'abondance (*météorologie stellaire*).
- Etude des éléments lourds et des terres rares dans des étoiles très anormales (étoile de Przybylski).
- Confrontations observ. ESPADONS, et futur SPIROU

# Paramètres fondamentaux avec VEGA

Calibration de  $T_{\text{eff}}$  des étoiles du halo par interférométrie et simulations hydro 3D

(Creevey, Thévenin, Bigot, Berio, Mourard, Chiavassa, Nardetto)

## Programme «Metal-poor» sur VEGA@CHARA

Combinaison **interférométrie + modèles d'atmosphères 3D** pour  $T_{\text{eff}}$  précises

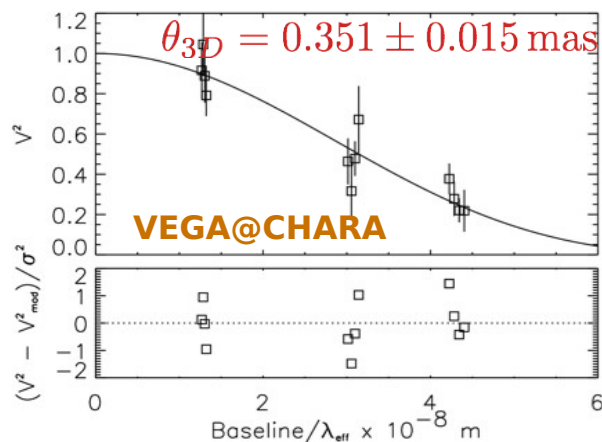
Tester les modèles stellaires pour des étoiles autre que le Soleil → amélioration des isochrones/atmosphères.

Calibration de l'échelle de température à faible métallicité (erreur  $\pm 200\text{K}$ )

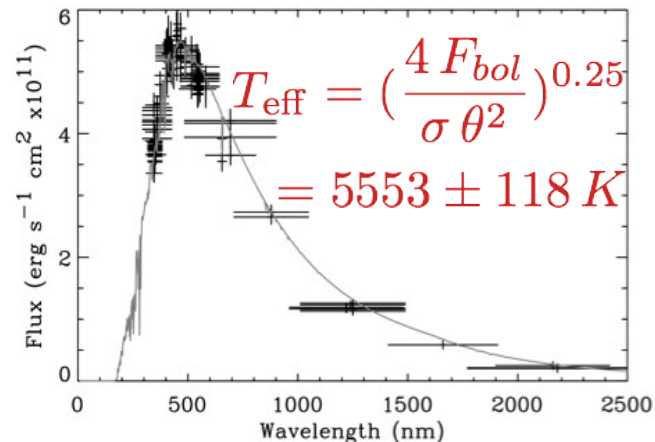
→ Besoin d'une mesure de  $T_{\text{eff}}$  indépendante des modèles

→ VEGA bien adapté pour les étoiles du halo - **résolution angulaire unique** ( $\neq$  interféromètres en bande K)

Angular diameter fit



Bolometric flux fit



**HD 140283**

3D hydro atmosphere  
+ CESAM2k

$M = 0.800 \pm 0.015 M_{\odot}$ ,  
Age =  $12.1 \pm 0.9 \text{ Gyr}$   
Logg =  $3.65 \pm 0.05$ ,  
 $\alpha = 1.0$  ( $\alpha_{\odot} = 2.0$ )

Creevey et al. (2014, in prep)  
Creevey et al. (2012a, 2012b)



# Etude de la dynamique atmosphérique des naines brunes par une approche GCM (Global Circulation Models)

(I. Baraffe - CRAL/Exeter, F. Allard - CRAL, G. Chabrier - CRAL)  
(Financé par une "advanced ERC")

**Global Circulation Model:** outil numérique utilisé en météorologie (prédiction du temps et climat terrestre à court et long terme)

Simulations hydrodynamiques 3D de la circulation atmosphérique à la surface d'une planète (Terre ou autre....)

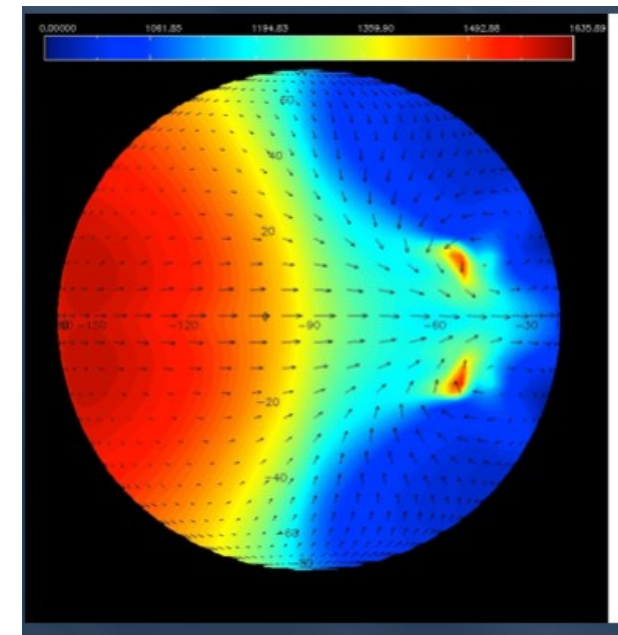
GCMs actuellement appliqués à la **dynamique atmosphérique d'exoplanètes**

→ développements actifs en France:

- Paris/Bordeaux Forget, Selsis et al.
- CRAL/Exeter, Baraffe et al. (liens avec Bordeaux)

**Projet en cours: Application aux atmosphères nuageuses ("poussiéreuses") des naines brunes**

- ⇒ Etude de la formation/disruption des nuages
- ⇒ **Interprétation des observations actuelles** (cf. Crossfield et al. Nature 2014) et à venir (Doppler imaging)
- ⇒ Meilleure compréhension des atmosphères poussiéreuses (cf Allard et al. ) et **liens directes avec le domaine des exoplanètes** (transit ou imagerie directe).

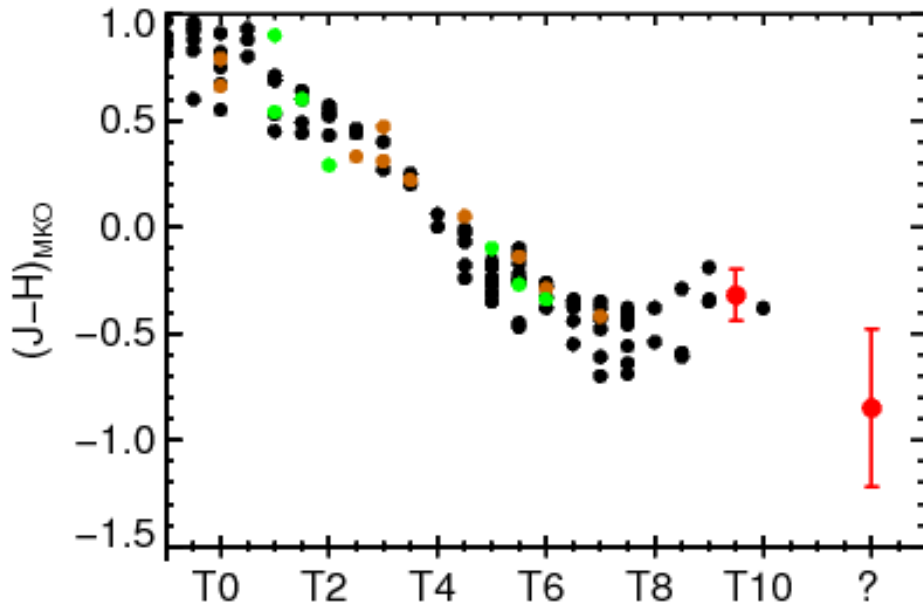


*Vents horizontaux (flèches) et température (code de couleur) à la surface d'un Jupiter chaud (Mayne, Baraffe et al. 2014, A&A, 561)*

Naines brunes de très faible masse: un objet avec une température dans le domaine de l'eau liquide (Delorme et al.)

=> **Teff=370+/-40K**  
*La 1ère naine Y*

*Press release Keck, ESO, CFHT, CNRS, Mars 2011*



*Liu, Delorme et al. 2011*

**Couleurs atypiques**, différentes des prédictions des modèles

*voir talk C. Reylé*

# Points de prospective: thématiques

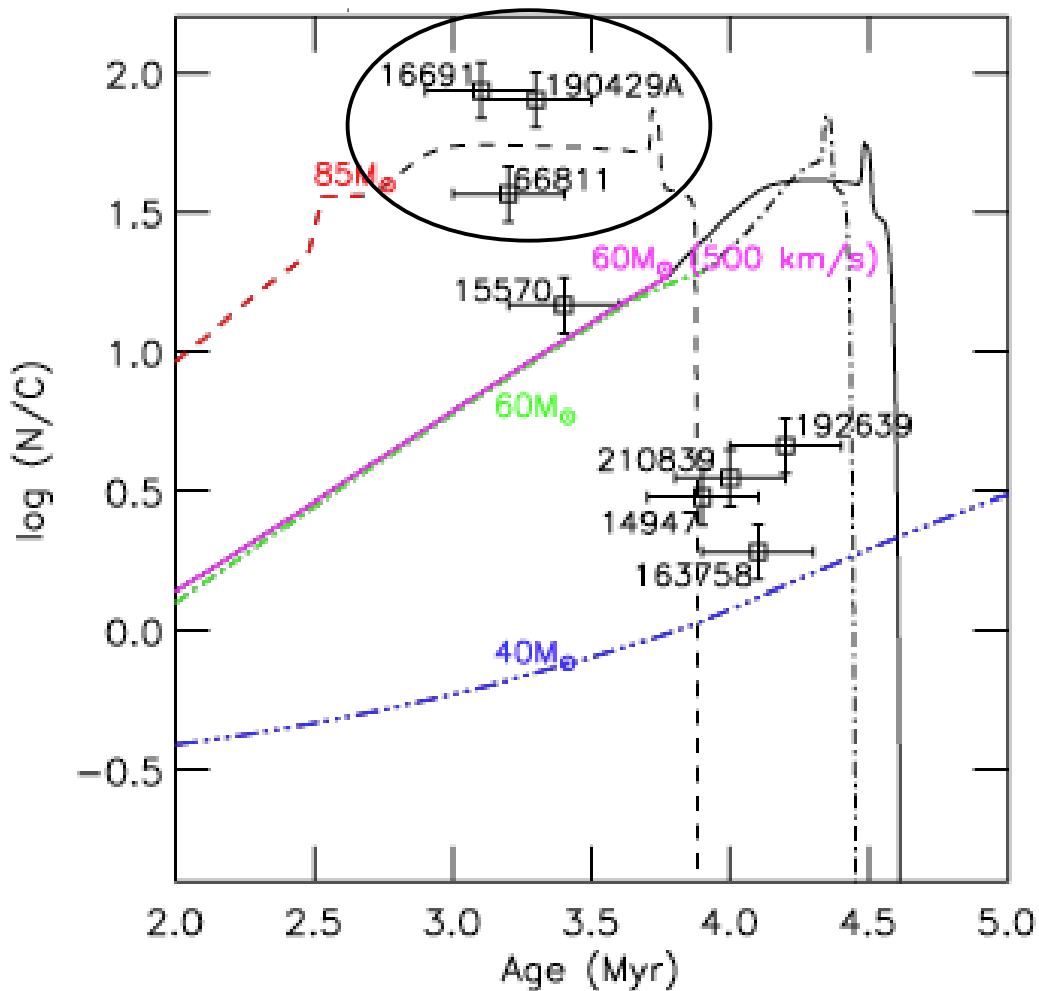
- Vers des **paramètres fondamentaux précis**
  - réduction des incertitudes ( $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ , rayons  $\Rightarrow M$  et âge)
  - abondances de surface
- **Résoudre** les surfaces et enveloppes stellaires
  - caractéristiques de la convection de surface
  - assombrissement centre-bord / rayons stellaires
  - structure physique, inhomogénéité et cinématique des enveloppes/vents stellaires
- Propriétés des systèmes **binaires**
  - caractéristiques physiques et orbitales
  - effets de la binarité sur les surfaces stellaires (géométrie, distribution de  $T$ , abondances)
- **Perte de masse** à travers le diagramme HR:
  - processus physiques
  - prescriptions pour les modèles d'évolution
- **Naines brunes** et lien exoplanètes (interface forte avec le PNP)
  - recherche systématiques
  - caractérisation des propriétés physiques
  - météorologie des atmosphères

# Points de prospective: moyens

- Simulations **hydrodynamiques 3D** des atmosphères d'étoiles  
Simus hydro et RT
- Calculs **hors-ETL**: collaboration étroite entre physique atomique et physique stellaire  
→ traitement des collisions - écarts à l'ETL - déterminations d'abondances
- **Spectroscopie multi-longueur d'onde**: haute résolution spectrale
  - UV: projet **UVMag**
  - optique: T2M (Neo)-Narval, SOPHIE
  - IR: **Spirou/SPIP** - instrumentation E-ELT
- L'**E-ELT**: focus "haute résolution spatiale" pour le stellaire
  - surface / environnement des étoiles proches
  - physique stellaire dans l'Univers local (populations, effets de métallicité - 1/50 à 2  $Z_{\odot}$ )
- **Haute résolution angulaire**:  
**Pionier/ VEGA / FLUOR / MIRC / First / Gravity / MATISSE / ALMA / NOEMA - SPHERE**  
→ besoin de haute résolution spectrale (structure cinématique des enveloppes)
- **Gaia** et le diagramme HR: paramètres fondamentaux / déterminations automatiques
- **Librairies spectrales** (**NARVAL/PolarBase - SOPHIE - X-Shooter - ESO/Gaia - POLLUX...**)
  - interaction et extension
  - détermination automatique de paramètres stellaires (e.g. AMBRE - **Gaia**, préparation **PLATO**)

Backup / work slides

# Evolution des étoiles massives: abondances et rotation (Bouret et al.)



## Etoiles O supergéantes Galactiques:

- enrichissements en azote
- rapports N/C compatibles avec les prédictions des modèles avec rotation (Meynet & Maeder 2005) sauf pour les étoiles les plus massives (type O4)

*Voir aussi talk JC Bouret*

## Conclusions

- Rôle du vent dans l'évolution des propriétés de surface (perte de masse incertaine) ?
- Extension aux géantes/supergéantes du SMC

# Modèles d'atmosphères d'étoiles géantes (de Laverny et al. Puis palacios et al.)

« Anomalies d'abondances chimiques, rotation, magnétisme et ondes internes dans les étoiles évoluées »  
(2008-2011) - PI P. de Laverny

« Comprendre les étoiles géantes rouges et leur impact sur l'évolution des galaxies »  
(2012-2013) – PI A. Palacios

## Synthèse spectrale

- projet AMBRE (de Laverny et al. 2012)
- comparaisons d'outils de synthèse spectrale pour les géantes froides (Lebzelter et al. 2012)

## Transfert radiatif

- code MORAD (J. Lambert 2012)
- abondance de Fe hors-ETL pour géantes rouges Kepler (Ezzeddine et al. 2013)

- Simulations hydrodynamiques **3D** des atmosphères d'étoiles
- Calculs **hors-ETL**: collaboration étroite entre physique atomique et physique stellaire
  - traitement des collisions - écarts à l'ETL - déterminations d'abondances
- **Haute résolution angulaire**: Pionier/ VEGA / FLUOR / MIRC / PAVO / CLASSIC / First / Gravity / MATISSE / ALMA / NOEMA
  - sonder les systèmes multiples de toute masse, les environnements proches des étoiles, les enveloppes stellaires
  - besoin de haute résolution spectrale (structure cinématique des enveloppes)
- Préparation à l'exploitation de l'**E-ELT**: focus "haute résolution spatiale" pour le stellaire
  - surface / environnement des étoiles proches (supergéantes)
  - physique stellaire dans l'Univers local (populations, effets de métallicité -  $1/50$  à  $2 Z_{\odot}$ )
- **Gaia** et le diagramme HR: paramètres fondamentaux / déterminations automatiques
- **Librairies spectrales** (NARVAL/PolarBase - SOPHIE - X-Shooter - ESO/Gaia - POLLUX...)
  - interaction et extension
  - détermination automatique de paramètres stellaires (e.g. AMBRE - **Gaia**)
- Propriétés des systèmes **binaires** (suivi observationnel - T2M:SOPHIE/SPIP, interférométrie)
- **Perte de masse** à travers le diagramme HR: physique et prescriptions pour les modèles d'évolution (**UVMag**, interférométrie, imagerie IR haute résolution E-ELT, Spirou, ALMA, NOEMA)
- Recherche et caractérisation des **naines brunes** à la limite du domaine planétaire (interface avec le PNP - Spirou/PLATO...)