

Evolution, Structure Interne et Atmosphères

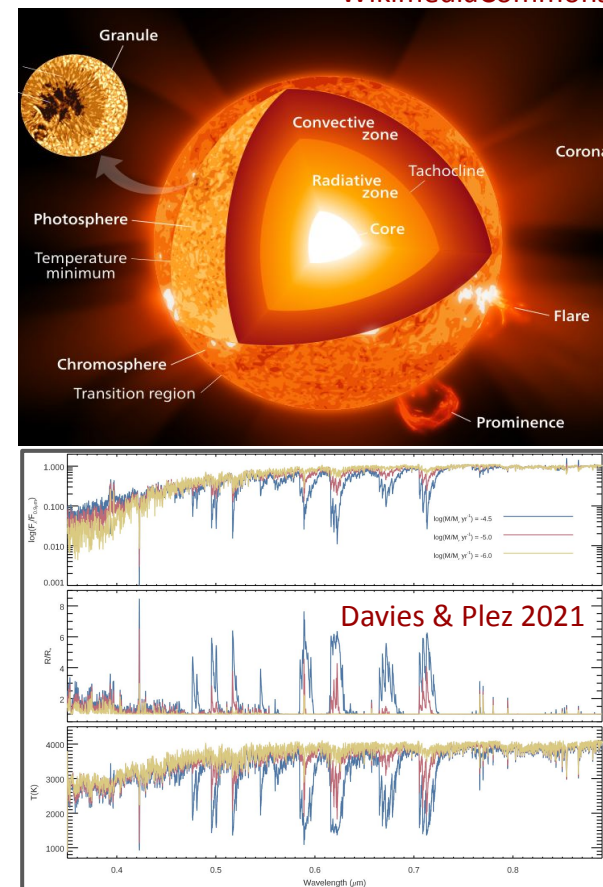
K. Belkacem, J.C. Bouret, O.L. Creevey, S. Deheuvels,
J.P. Marques, N. Meunier,
avec contributions de M. Langlois, N. Nardetto, C. Reyle,
et le CS courant et précédent



EIA: les contours du thematique

WikimediaCommons

- Evolution, Structure Interne et Atmosphères → **Structure Interne et Atmosphères**
 - Evolution → thématique unique *Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes*
 - Mots clés: transport, oscillations, **paramètres fondamentaux**, multiplicité, abondances chimiques en surface, la rotation, la perte de masse ainsi que les conditions aux limites à la photosphère
 - Projets Phares Gaia, Plato, mais également E-ELT
- Interfaces fortes en dehors du PNPS
 - le PNCG autour de la structure et de la dynamique galactique et des populations stellaires.
 - le PNP est identifiée à travers les démarches de caractérisation d'étoiles hôtes d'exoplanètes
 - l'ASHRA pour son apport essentiel de la haute résolution angulaire pour la détermination de certains paramètres stellaires tels que le rayon angulaire, teff, ...



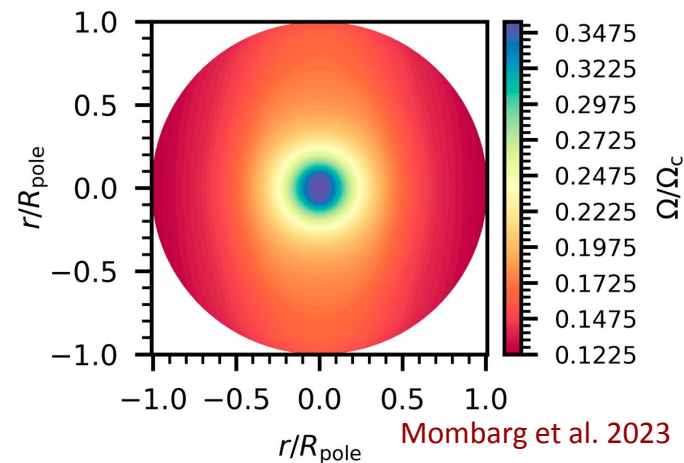
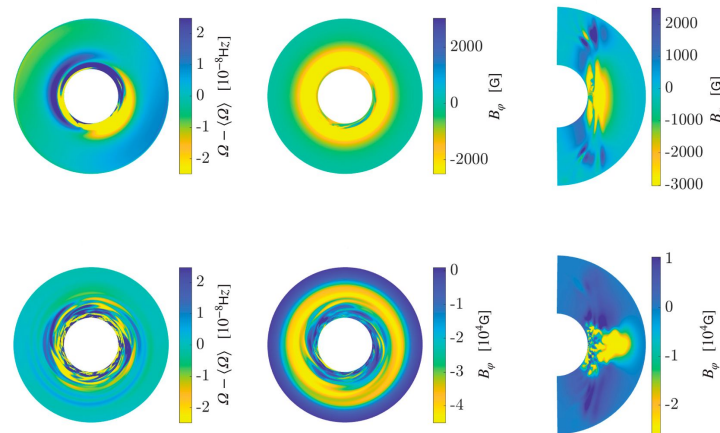
Grands questions 2019 – 2023

- Quel est l'impact de la stratification chimique sur le profil de l'opacité et quelles sont les conséquences sur les propriétés sismiques des étoiles dans le diagramme HR?
- Quels sont les effets de la rotation et du champ magnétique sur les intérieurs stellaires et leurs évolution? – particulièrement importante pour le traitement des interfaces entre régions convectives et radiatives.
- Dans quelle(s) direction(s) améliorer les traitements de processus complexes (convection, mélange, rotation, transport de moment angulaire, champ magnétique etc. . .) tels qu'utilisés dans les codes 1D d'évolution stellaire? Comment y intégrer les contraintes apportées par les modèles multidimensionnels?

Intérieurs stellaires: Modélisation

- Développements récents dans des codes 1D
 - **Opacité** : opacités auto-consistantes et nouvelles opacités du Ni (Hui-Bon-Hoa 21, Hui-Bon-Hoa+ 22)
 - **Abondance de He** par astérosismologie (Houdayer+ 21, 22)
 - **MLT calibré en entropie** (Manchon+ 23)
- Simulations MHD pour étalonner prescriptions dans des codes 1D
 - **Dynamo de Tayler-Spruit** (Petitdemange+ 23)
 - Transport de moment cinétique dans des zones radiatives (Gouthier+ 22)
- Evolution stellaire 2D
 - **Evolution en 2D** avec le code ESTER (Mombarg+ 23)

Petitdemange et al. 2023



Mombarg et al. 2023

Intérieurs stellaires: Transport du moment cinétique

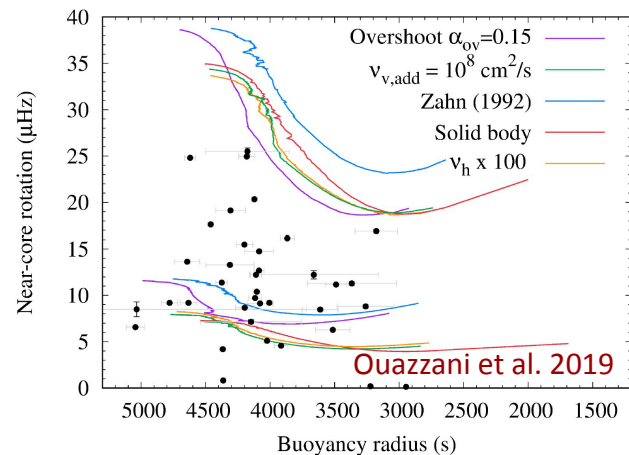
Origine et efficacité du transport de moment cinétique dans les étoiles

- Mesures photométriques de rotation (CoRoT, Kepler, TESS)
 - **Rotation de surface** pour > **55,000** étoiles *Kepler* de séquence principale ([Santos +19,+21](#), [Breton+21](#))
 - **Rotation interne** par l'astérosismologie

Intérieurs stellaires: Transport du moment cinétique

Origine et efficacité du transport de moment cinétique dans les étoiles

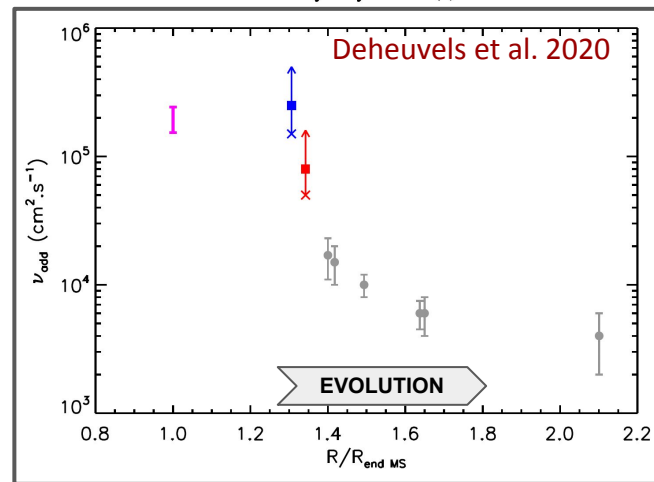
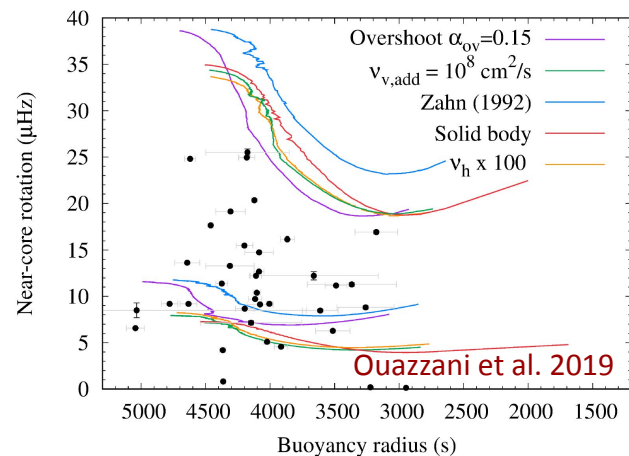
- Mesures photométriques de rotation (CoRoT, Kepler, TESS)
 - **Rotation de surface** pour > **20,000** étoiles *Kepler* de séquence principale ([Santos +19](#), [Breton+21](#))
 - **Rotation interne** par l'astérosismologie
- Étoiles γ Doradus (1.3-1.9 Msun en SP)
 - Rotations internes mesurées **plus lentes** que prédites par mécanismes de transport purement hydro ([Ouazzani+19](#))
 - Détection de modes d'oscillation couplés avec des **modes inertiels piégés dans le coeur convectif** ([Ouazzani+20](#))



Intérieurs stellaires: Transport du moment cinétique

Origine et efficacité du transport de moment cinétique dans les étoiles

- Mesures photométriques de rotation (CoRoT, Kepler, TESS)
 - **Rotation de surface** pour > **20,000** étoiles *Kepler* de séquence principale (Santos +19, Breton+21)
 - **Rotation interne** par l'astérosismologie
- Étoiles γ Doradus (1.3-1.9 Msun en SP)
 - Rotations internes mesurées **plus lentes** que prédites par mécanismes de transport purement hydro (Ouazzani+19)
 - Détection de modes d'oscillation couplés avec des **modes inertiels piégés dans le coeur convectif** (Ouazzani+20)
- Étoiles sous-géantes et géantes rouges
 - **Rotation quasi-solide** dans deux jeunes sous-géantes (Deheuvels+20) => efficacité du transport de moment cinétique décroît au cours de l'évolution (Eggenberger+19)
 - **Détection sismique de champ magnétique** dans le coeur de 24 étoiles géantes rouges (cf Thème "Champ magnétique")



Intérieurs stellaires: Transport des éléments chimiques

Processus de mélange non-standard dans les intérieurs stellaires

- Interaction entre **diffusion atomique** et **mélange rotationnel**
 - Diffusion atomique nécessaire pour le Soleil, mais mène à des abondances de surface irréalistes pour $M > 1.2 M_{\text{sun}}$
 - Mélange rotationnel peut s'opposer à la diffusion atomique, mais insuffisant si rotation \sim uniforme en SP ([Deal+20](#))

Intérieurs stellaires: Transport des éléments chimiques

Processus de mélange non-standard dans les intérieurs stellaires

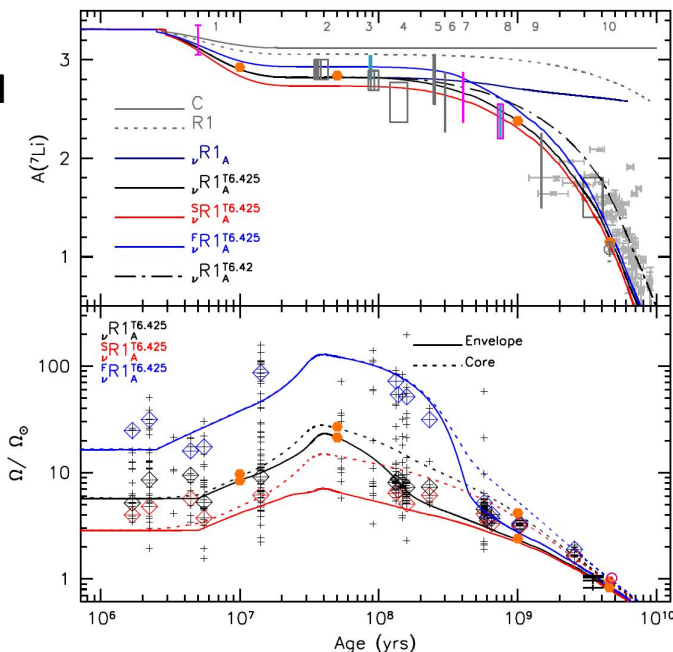
- Interaction entre **diffusion atomique** et **mélange rotationnel**
 - Diffusion atomique nécessaire pour le Soleil, mais mène à des abondances de surface irréalistes pour $M > 1.2 M_{\text{sun}}$
 - Mélange rotationnel peut s'opposer à la diffusion atomique, mais insuffisant si rotation \sim uniforme en SP ([Deal+20](#))
- **Mélange thermohaline** dans les étoiles **géantes rouges**
 - Abondances de Li + parallaxes Gaia pour 800 géantes rouges en bon accord avec prédictions de modèles incluant mélange rotationnel + mélange thermohaline ([Charbonnel+20](#))

Intérieurs stellaires: Transport des éléments chimiques

Processus de mélange non-standard dans les intérieurs stellaires

- Interaction entre **diffusion atomique** et **mélange rotationnel**
 - Diffusion atomique nécessaire pour le Soleil, mais mène à des abondances de surface irréalistes pour $M > 1.2 \text{ Msun}$
 - Mélange rotationnel peut s'opposer à la diffusion atomique, mais insuffisant si rotation \sim uniforme en SP ([Deal+20](#))
- **Mélange thermohaline** dans les étoiles **géantes rouges**
 - Abondances de Li + parallaxes Gaia pour 800 géantes rouges en bon accord avec prédictions de modèles incluant mélange rotationnel + mélange thermohaline ([Charbonnel+20](#))
- Comparaisons entre efficacité du **transport** du **moment cinétique** et des **éléments chimiques**
 - Nécessité d'invoquer deux processus paramétriques de mélange turbulent distincts pour reproduire rotation + abondances de Li des étoiles F, G, K ([Dumont+21a,21b](#))

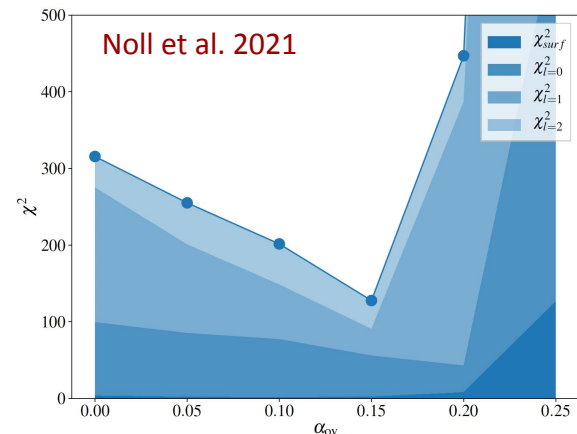
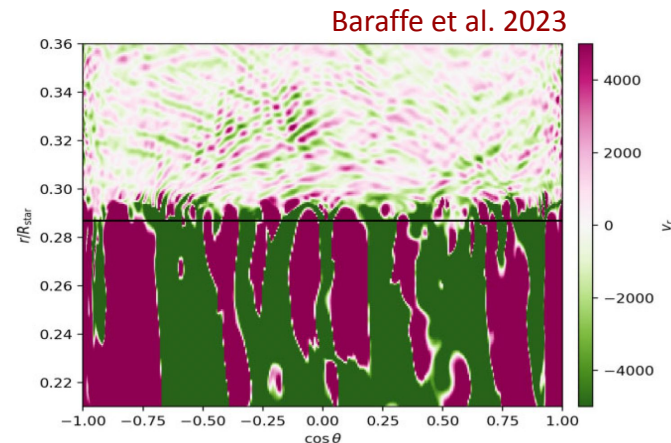
Dumont et al. 2021a



Intérieurs stellaires: Interfaces zones radiatives / convectives

*Extension des zones convectives (**overshooting**) : question cruciale pour les mesures d'âges stellaires*

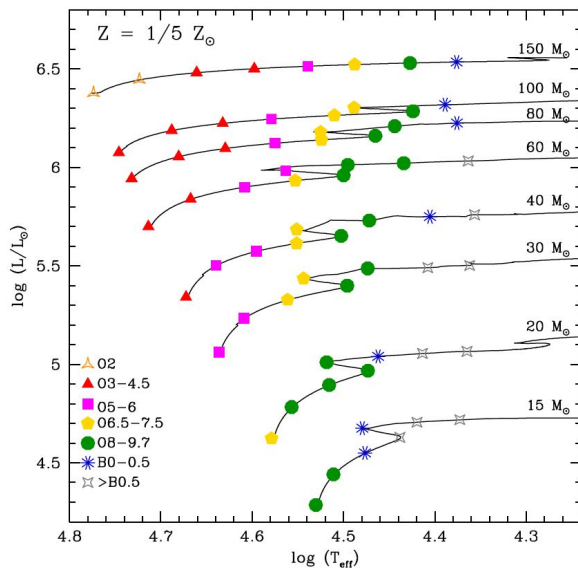
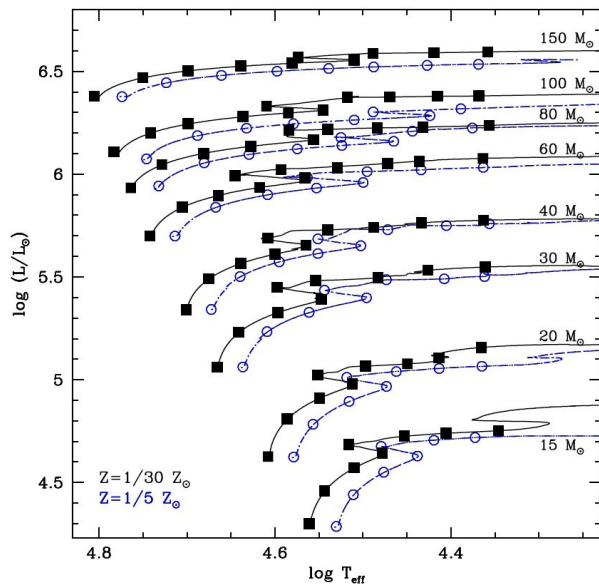
- Progrès dans la modélisation du mélange aux frontières des zones convectives
 - [Augustson & Mathis 2019](#) : modèle de convection couplé aux équations de [Zahn 1991](#) => la distance d'overshoot décroît quand la rotation augmente
 - Simulations numériques 2D de coeurs convectifs : d_{ov} augmente avec la masse du coeur ([Baraffe+23](#))
- Mesures sismiques des extensions des zones convectives mélangées
 - Extension d'enveloppes convectives sur 1 à 2 Hp pour étoiles F ([Deal+23](#))
 - Extension du coeur convectif sur une distance ~ 0.15 Hp mise en évidence par les modes mixtes d'une sous-géante *Kepler* ([Noll+21](#))



Atmosphères: étoiles massives a faible métallicité

- Evolution spectroscopique des étoiles massives à faibles métallicités
 - Calcul de **trajets évolutifs** avec code STAREVOL + spectres avec code CMFGEN, 1D NLTE massif, photosphère + vent

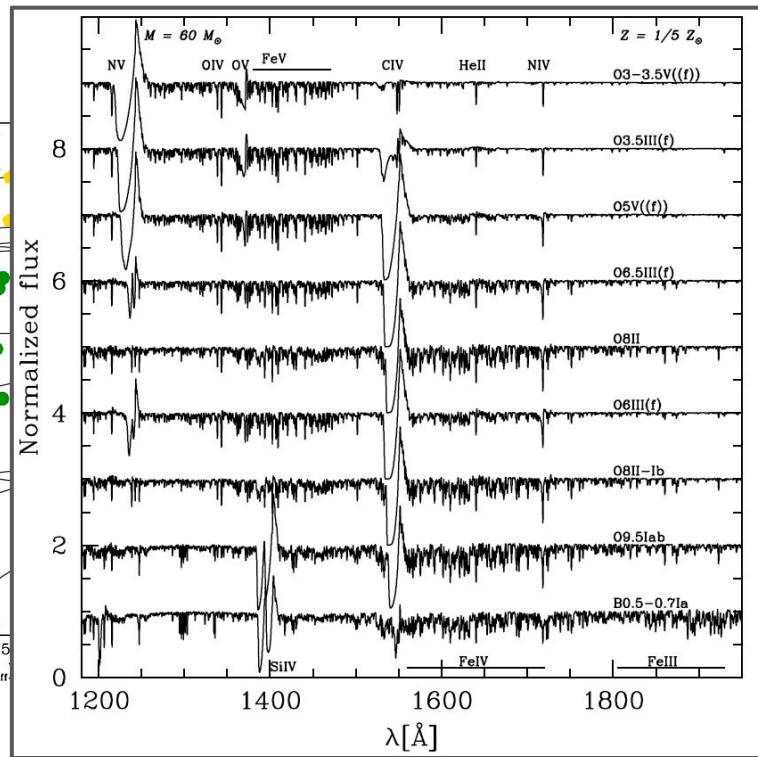
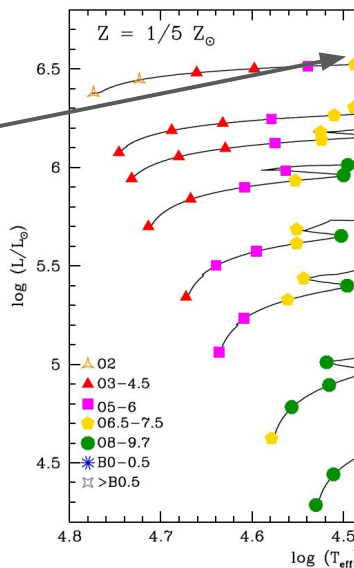
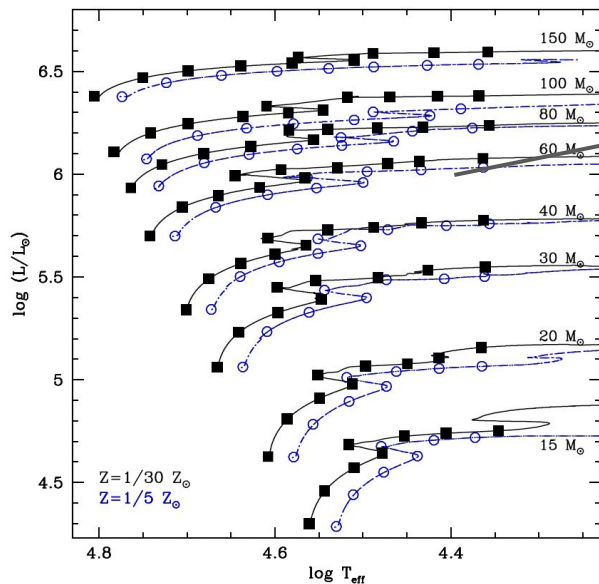
Martins & Palacios 2021



Atmosphères: étoiles massives a faible métallicité

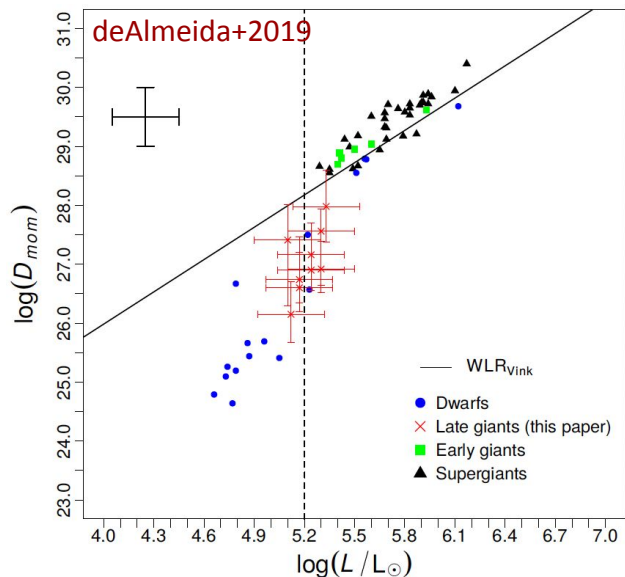
- Evolution spectroscopique des étoiles massives à faibles métallicités
 - Calcul de **trajets évolutifs** avec code STAREVOL + spectres avec code CMFGEN, 1D NLTE massif, photosphère + vent
 - **Prédictions de flux** ionisants (H, HeI, HeII)
 - Prédictions pour les étoiles **très massives** ($M > 100 M_{\odot}$)

Martins & Palacios 2021



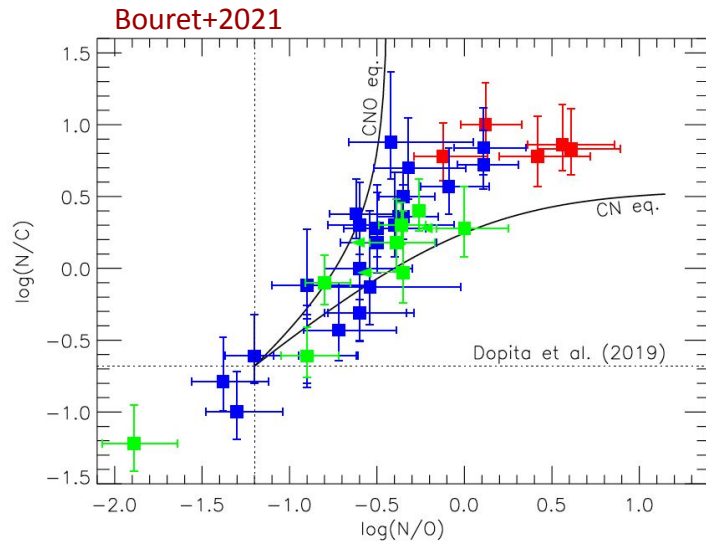
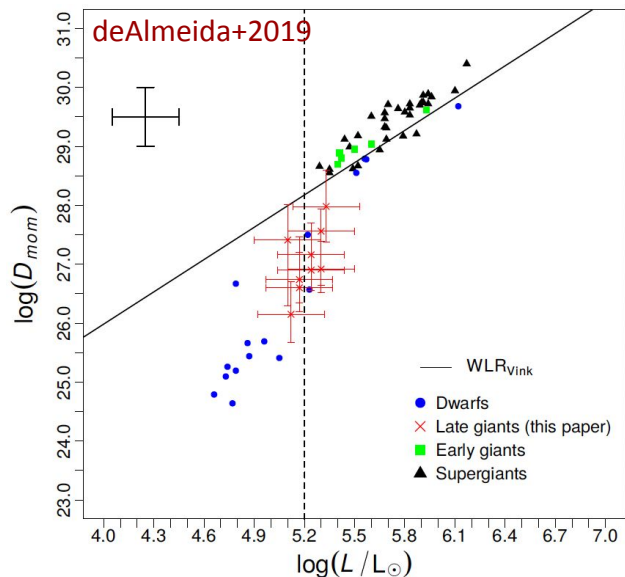
Atmosphères: étoiles massives

- 1D LTE (MARCS): Introduction d'une **perte de masse** dans le calcul des spectres de RSGs ([Davies & Plez 2021](#))
 - extra absorption dans raies de TiO change le type spectral
- 1D NLTE (CMFGEN) : Contraintes sur la **perte de masse** des étoiles géantes massives galactiques ([de Almeida+19](#)) et à faibles métallicités ([Marcolino+22](#))



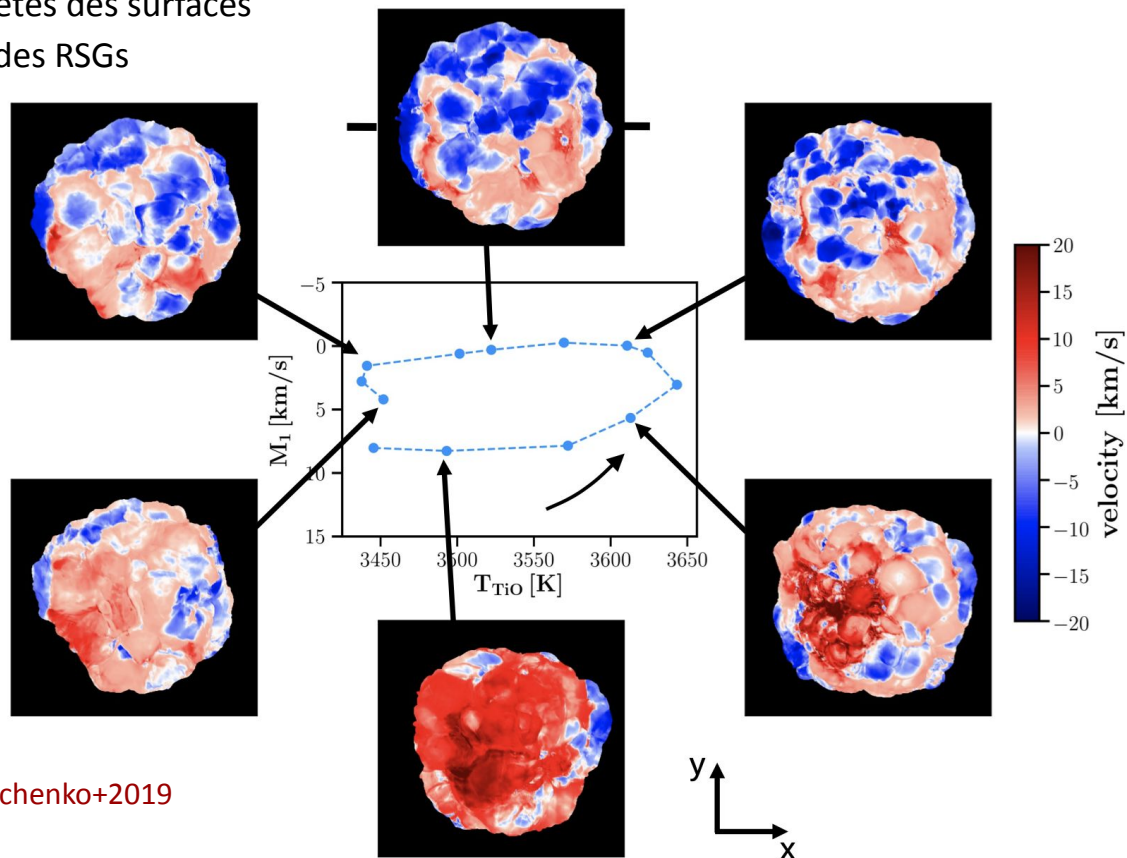
Atmosphères: étoiles massives

- 1D LTE (MARCS): Introduction d'une **perte de masse** dans le calcul des spectres de RSGs (Davies & Plez 2021)
 - extra absorption dans raies de TiO change le type spectral
- 1D NLTE (CMFGEN) : Contraintes sur la **perte de masse** des étoiles géantes massives galactiques (de Almeida+19) et à faibles métallicités (Marcolino+22)
- 1D NLTE (CMFGEN) : Contraintes sur les **abondances de surface** des étoiles massives à faibles métallicités



Atmosphères: vers le 3D

- **3D RHD + LTE post-processing** : propriétés des surfaces (température, champs de vitesses...) des RSGs
- Dynamique des supergéantes (Chiavassa+21)
- Caractérisation des AGB (Béguin+23)



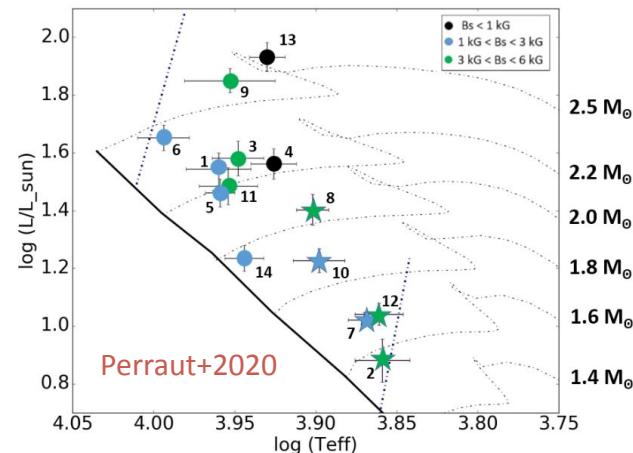
Kravchenko+2019

Paramètres fondamentaux:

- Benchmarking
- Production des outils + catalogues
- Exploitation: Pop stellaires / distance / voisinage solaire

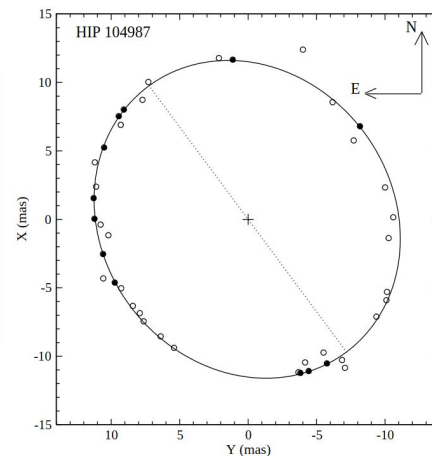
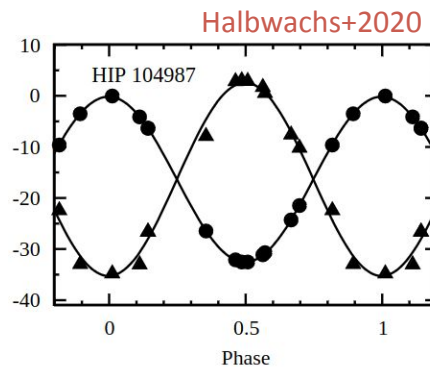
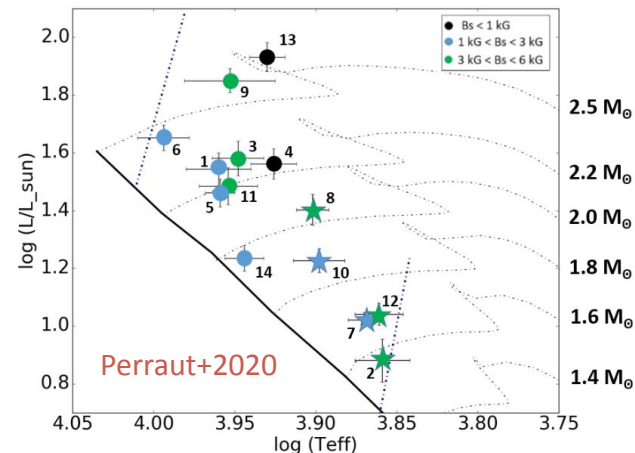
Paramètres fondamentaux: Benchmarking

- Détermination des paramètres fondamentaux ($\log g$, T_{eff}) pour 200 étoiles “FGK benchmark” (Soubiran+2023), en exploitant surtout l’interférométrie et Gaia DR3 (astrométrie, photométrie, spectres).
- Détermination précises des T_{eff} et Lum des étoiles roAp, en exploitant l’interférométrie (Perraut+2020)



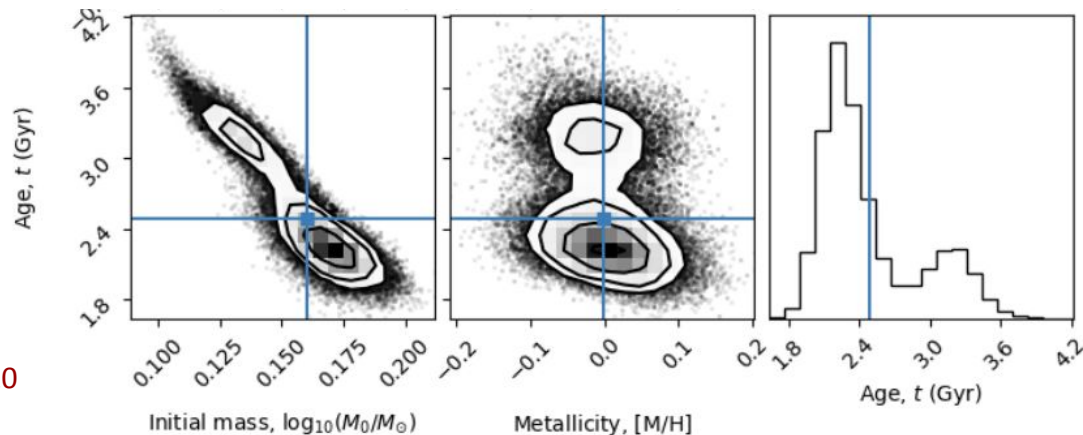
Paramètres fondamentaux: Benchmarking

- Détermination des paramètres fondamentaux ($\log g$, T_{eff}) pour 200 étoiles “FGK benchmark” (Soubiran+2023), en exploitant surtout l’interférométrie et Gaia DR3 (astrométrie, photométrie, spectres).
- Détermination précises des T_{eff} et Lum des étoiles roAp, en exploitant l’interférométrie (Perraut+2020)
- Mesure des vitesses radiales (OHP) et l’utilisation de l’interférométrie pour déterminer les orbites de 5 systèmes binaires SB2 avec une précision des masses jusqu’au 1% (Halbwachs+2020). (Avec objectif secondaire de comparer avec les masses du Gaia DR3)



Paramètres fondamentaux: Production des catalogues et outils

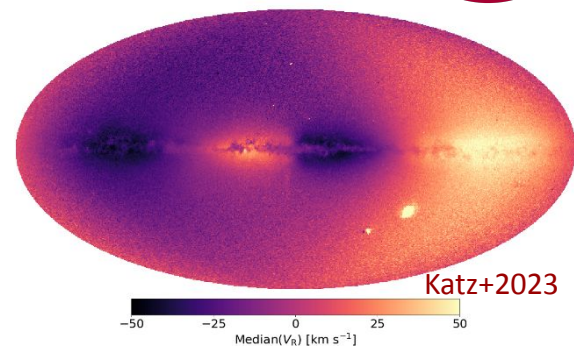
- Optimisation de l'**exploitation MATISSE** par la production des catalogues des calibrateurs et étoiles de référence en band L et N ([Cruzalebes+2019](#), [Robbe-Dubois+2022](#))
- Influence des paramètres fondamentaux stellaires sur la **brillance de surface et les couleurs (relations SBCR)** des étoiles tardives en exploitant les modèles MARCS et l'interferométrie. Effet métallicité et gravité sur SBCR calibration impérative pour détermination échelle de distances ([Salsi+2022](#))
- Développement des **outils flexibles** par ex. SPInS ([Lebreton & Reese 2020](#)) pour déterminer les **masses et âges** à partir des données classiques et sismiques. Classification des étoiles ([Bugnet+2019](#)), périodes de **rotation** ([Breton+2021](#)), simulateur des **courbes de lumière** PLATO ([Samadi+2019](#)), les **pipelines PLATO** ([Gent+2022](#))



Lebreton & Reese 2020

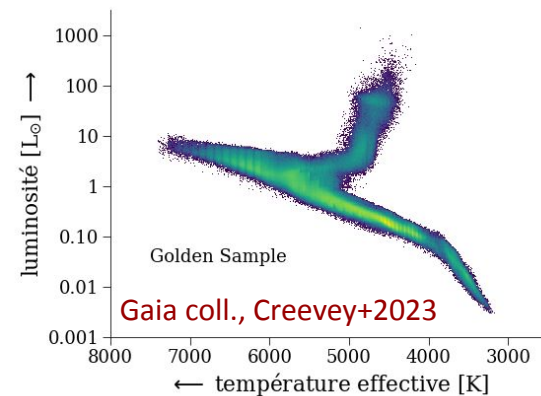
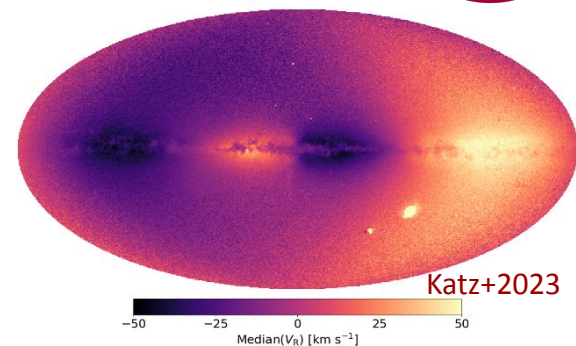
Paramètres fondamentaux: Gaia

- Gaia DR2 (2018, 22m), Gaia EDR3 (2020, 34m), **Gaia DR3** (2022, 34m)
- Forte participation française (physique stellaire) dans la préparation:
 - [Katz+2023](#), traitement des spectres RVS, **validation RV**
 - [Babusiaux+2023](#), validation de GDR3
 - [Creevey+2023](#), traitement des **parametres astrophysiques**
 - [Recio-Blanco+2023](#), analyse RVS pour par. atm. + **chimie**
 - [Halbwachs+2023](#): traitement **astrometriques de binaires**
 - + longue liste co-auteurs francais, e.g. Reyle, Thevenin, Lebreton.



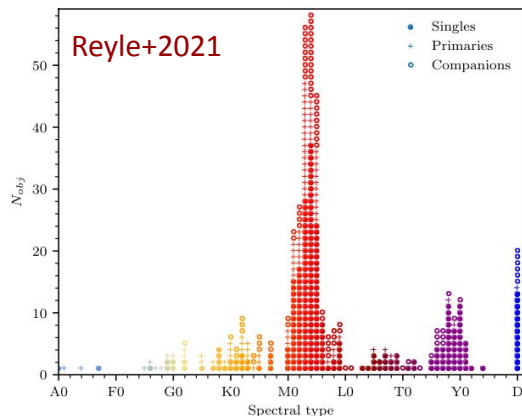
Paramètres fondamentaux: Gaia

- Gaia DR2 (2018, 22m), Gaia EDR3 (2020, 34m), **Gaia DR3** (2022, 34m)
- Forte participation française (physique stellaire) dans la préparation:
 - [Katz+2023](#), traitement des spectres RVS, **validation RV**
 - [Babusiaux+2023](#), validation de GDR3
 - [Creevey+2023](#), traitement des **parametres astrophysiques**
 - [Recio-Blanco+2023](#), analyse RVS pour par. atm. + **chimie**
 - [Halbwachs+2023](#): traitement **astrometriques de binaires**
 - + longue liste co-auteurs francais, e.g. Reyle, Thevenin, Lebreton.
- Exploitation scientifique:
 - [Kervella+2022](#); decouverte des **compagnons (sub) stellaires** en utilisant Hipparcos + Gaia DR2
 - [Gaia. coll. Arenou+2023](#); la **multiplicite** dans Gaia (astrometrie, photometrie, spectroscopie)
 - [Gaia coll. Creevey+2023](#); **échantillons d'or à travers le diagram HR**
 - [Chevalier+2023](#); 43 **systèmes binaires**, relation masse – luminosité



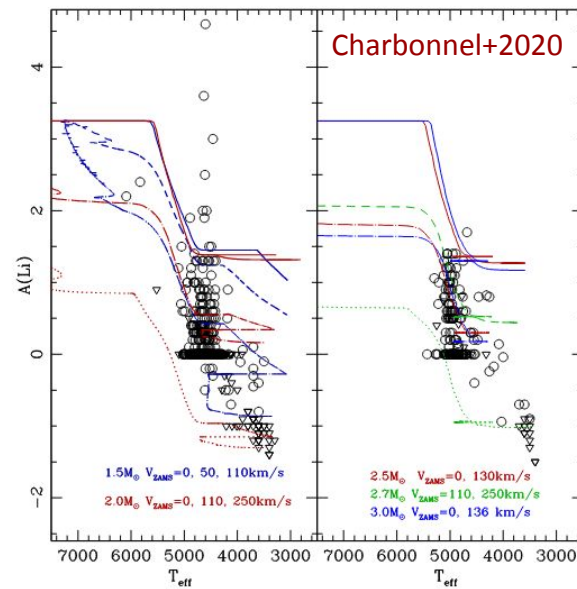
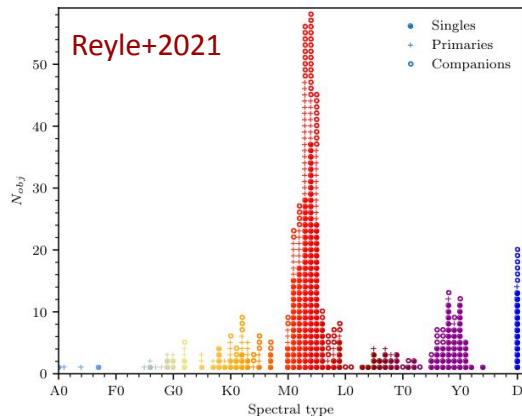
Paramètres fondamentaux: Exploitation des catalogues

- Recensement du **voisinage solaire**, en particulier vers les petites masses, [Reyle+2021](#) conclut que 61% d'étoiles dans les 10 pc autour du Soleil sont des étoiles M; catalogue des naines brunes et exoplanètes est fourni
- Impact de la métallicité ([Breuval+2021](#)) et les enveloppes circumstellaires ([Nardetto+2023](#)) sur l'**échelle distance** à partir de la relation période – luminosité des Cepheïdes.



Paramètres fondamentaux: Exploitation des catalogues

- Recensement du **voisinage solaire**, en particulier vers les petites masses, [Reyle+2021](#) conclut que 61% d'étoiles dans les 10 pc autour du Soleil sont des étoiles M; catalogue des naines brunes et exoplanètes est fourni
- Impact de la métallicité ([Breuval+2021](#)) et les enveloppes circumstellaires ([Nardetto+2023](#)) sur l'**échelle distance** à partir de la relation période – luminosité des Cepheïdes.
- **Populations stellaires** par la combinaison de la sismologie des géantes et la spectro, avec le modèle du Besançon ([Lagarde+2021](#)). Le comportement de Li dans les étoiles géantes ([Magrini+2020](#); [Charbonnel+2020](#)), et **Archéologie galactique**: ex. datation des étoiles à partir des abondances ([Morel+2021](#), [Palla+2022](#))



Conclusions du bilan:

- Conclusion:
 - Les questions pertinentes il y 4 ans sont encore pertinente !
 - Nombreuses etudes fait sur la modelisations (profil de l'opacité / MLT / champ magnetique) et exploitations des donnees photometriques pour mesurer la rotation en surface et l'interieur
 - Etudes 2D et 3D pour “corriger” nos modeles 1D, mais bcp encore a faire. Et certaines questions encore ouvertes sur “comment y integrer” e.x. les etudes N-D magneto-rotationelle
 - Mots cles “perte de masse” mais pas de “grande question”
 - Grands projets Gaia, PLATO, ANDES
- Evolution de la communauté
 - Manque des experts et manpower en atmospheres (petites / grandes masses / 2D / 3D NLTE)
 - Risque de perdre expertise ‘permanente’ en evolution stellaire

Nouvelles questions

- Quels sont les effets de la rotation, du champ magnétique, de la convection, du transport des éléments chimiques et des propriétés atomiques et moléculaires sur la structure interne et l'évolution des étoiles ? l'utilisation du 2D et 3D
- Comment améliorer la précision sur la détermination des âges et des paramètres fondamentaux des étoiles à travers l'ensemble du diagram HR ? (benchmarking, exploitation relevés, interfero-, sismo,)
- Quel est l'impact des propriétés des étoiles sur l'évolution de la galaxie et la cinématique dans les amas ?
- Comment améliorer notre connaissance du contenu de la Voie lactée (diagramme HR) - naines brunes, UCD, étoiles massives à faible métallicité, binaires, impact de la perte de masse des étoiles massives : faible métallicité, VMS - abondances de surface et contraintes

