

# L'ARCHÉOLOGIE GALACTIQUE À L'ÈRE DES GRANDS RELEVÉS

Céline Reylé, Nadège Lagarde,  
Annie Robin, Guillaume Nasello

- Institut UTINAM -  
OSU THETA Franche-Comté Bourgogne

*Montpellier PNPS 2018*



# ARCHÉOLOGIE GALACTIQUE

Étude des **populations stellaires** dans la **Voie Lactée** (galaxie de référence) pour comprendre comment les galaxies se sont assemblées en général.



*Composantes :*

- *disque*
- *disque épais*
- *bulbe*
- *halo (stellaire, sombre)*

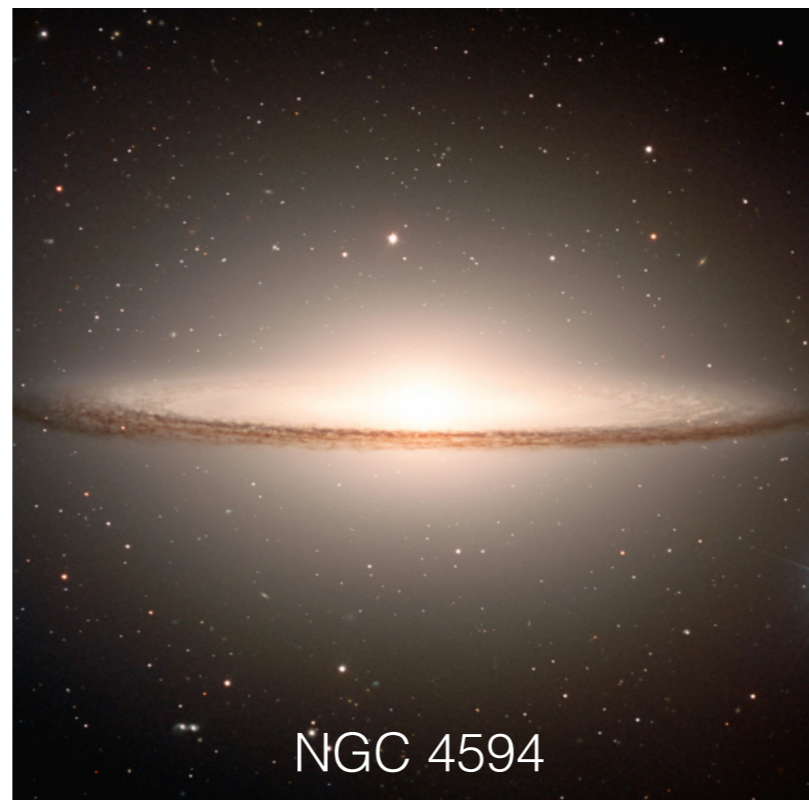
L'archéologie galactique suppose que l'histoire de notre Galaxie est encodée dans les **abondances chimiques** des étoiles et dans la **cinématique**. Un des piliers de cette discipline est l'utilisation des **rapports d'abondances stellaires** comme indicateur de l'âge.

# Archéologie galactique — le bulbe



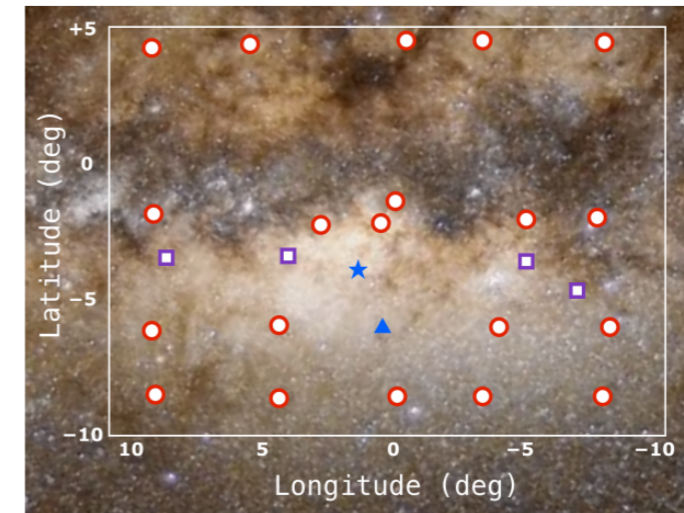
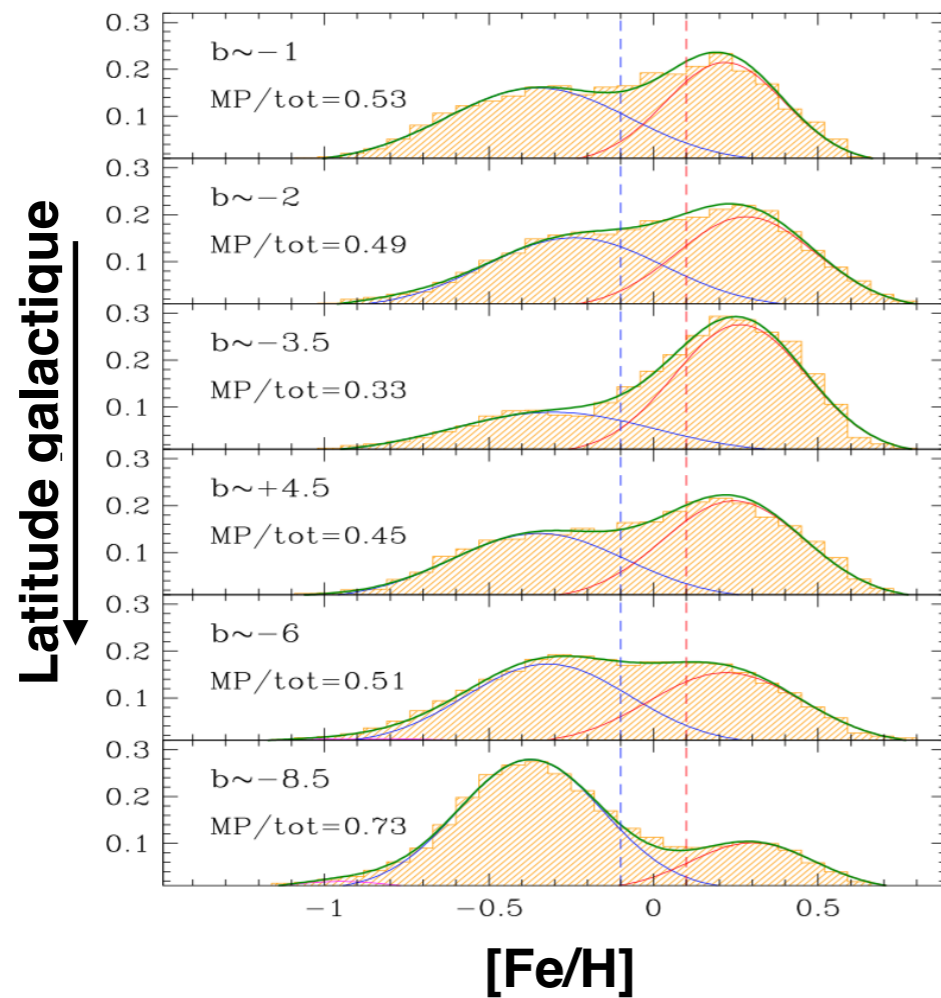
Certaines galaxies ont des bulbes sphéroïdaux, boxy, ou pas de bulbe (pas rare, Kormendy et al 2010)

→ les bulbes ne sont pas essentiels dans les processus de formation des disques



# Archéologie galactique — le bulbe

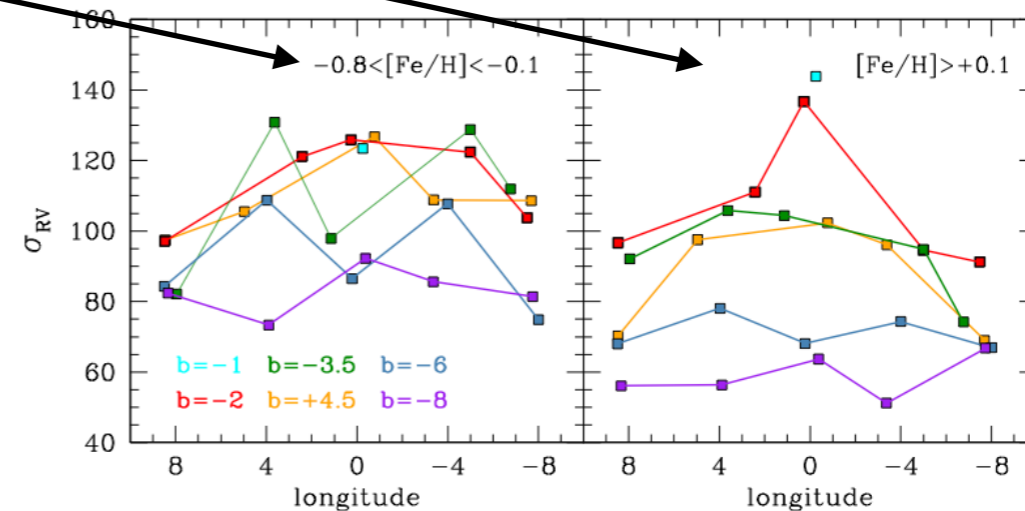
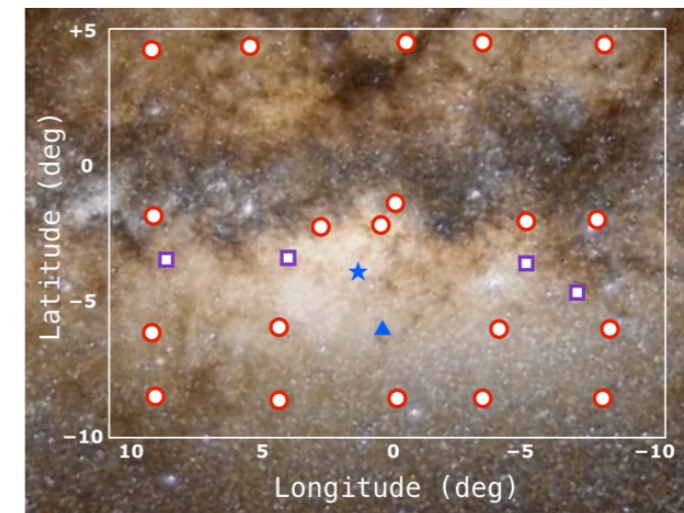
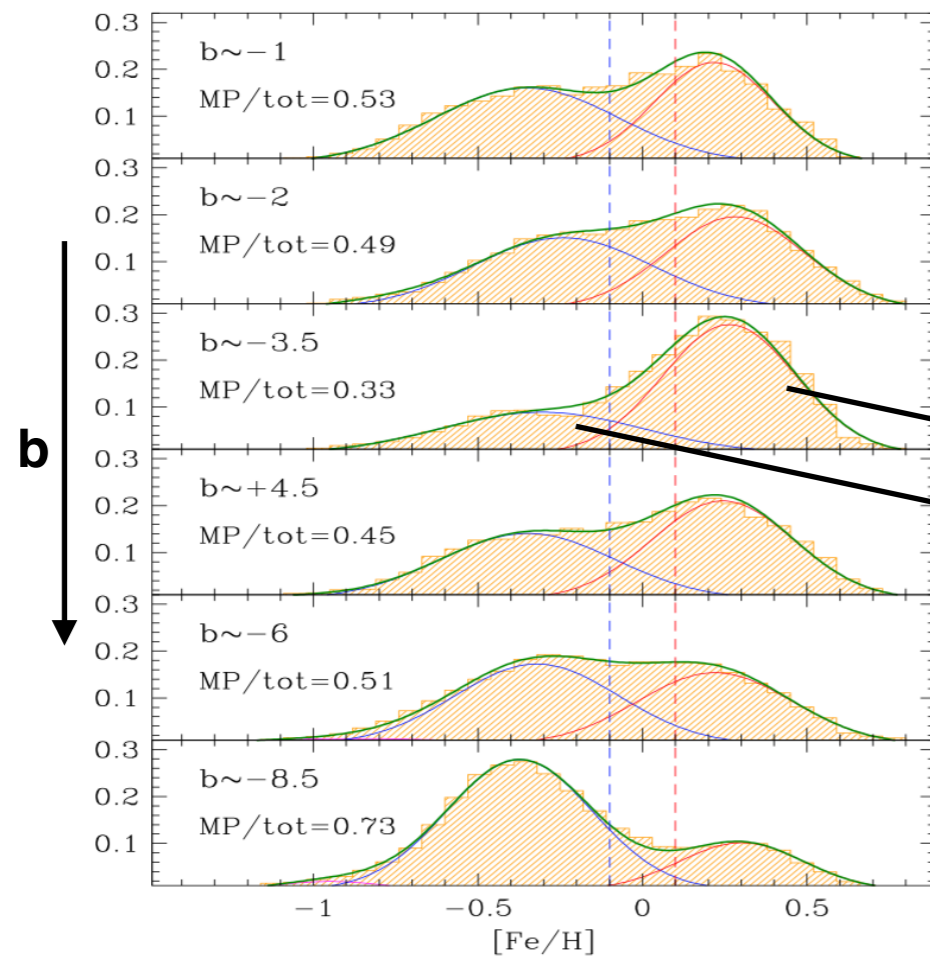
Superposition de deux populations dans la région du bulbe, confirmées (Rojas Arriagada et al. 2014, GES; Zoccali et al. 2016, GIBS)



GIBS : GIRAFFE Inner Bulge Survey  
26 champs, Red Clump

# Archéologie galactique — le bulbe

Superposition de deux populations dans la région du bulbe, confirmées (Rojas Arriagada et al. 2014, GES; Zoccali et al. 2016, GIBS)

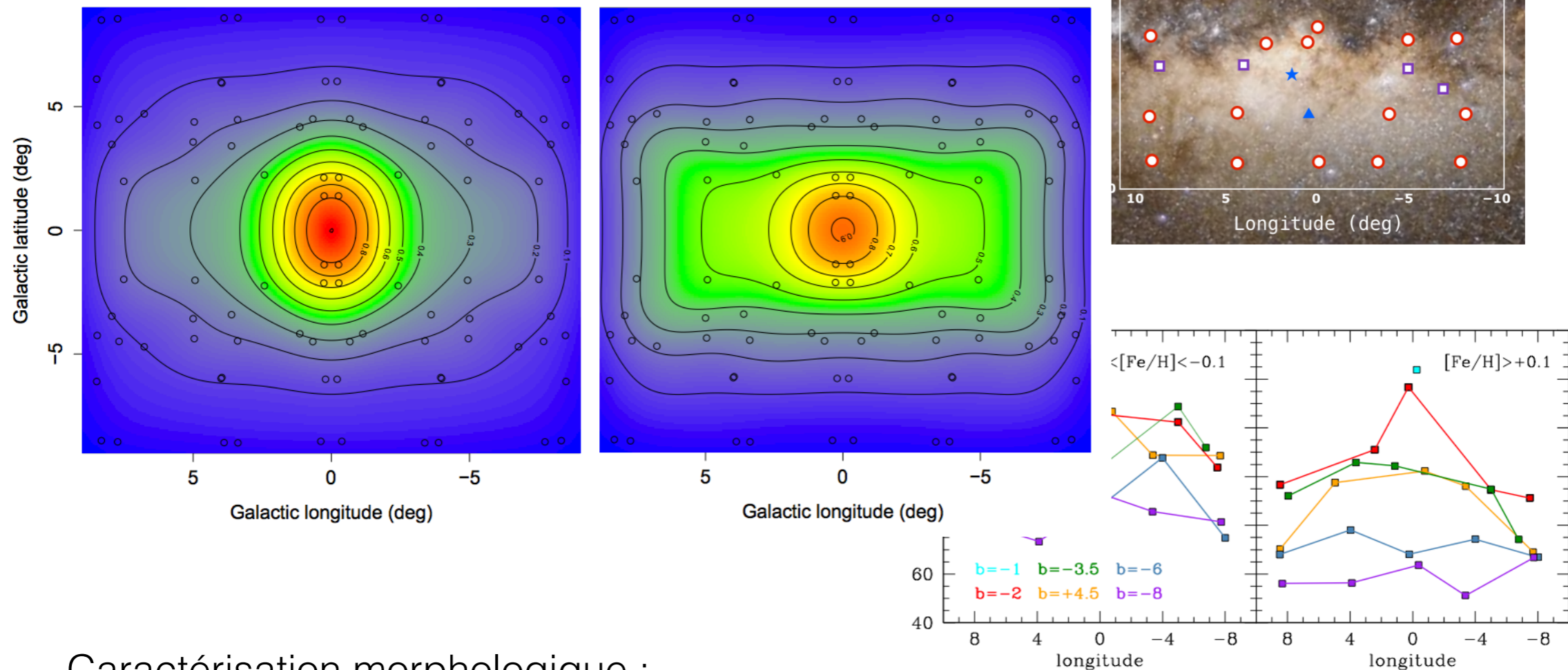


Caractérisation cinématique :

- MP : dispersion en moyenne plus grande (Ness et al 2013a, ARGOS, Ness et al 2016, APOGEE)
- MR :  $\sigma_v$  augmente à basses latitudes, très piquée (Babusiaux et al, 2014, 2016)

# Archéologie galactique — le bulbe

Superposition de deux populations dans la région du bulbe, confirmées (Rojas Arriagada et al. 2014, GES; Zoccali et al. 2016, GIBS)

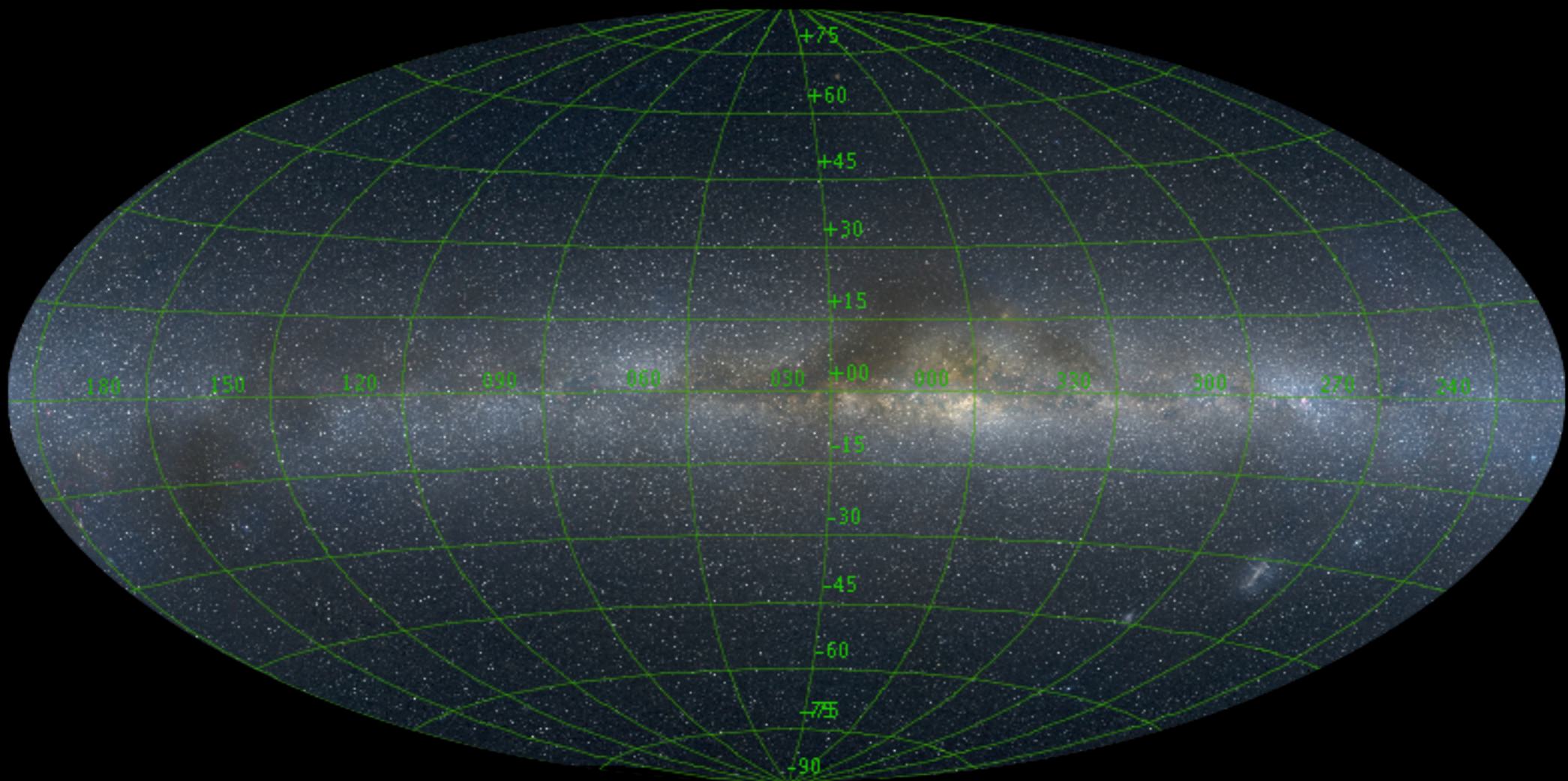


Caractérisation morphologique :

- MP plus concentrée, distribution spatiale plus sphéroïdale (Schultheis et al 2016, APOGEE), peut-être expliquée par la population disque épais (Robin et al 2014)
- MR a une distribution boxy en accord avec une structure de type barre (Ness 2013 ARGOS, Vasquez et al 2013)

# LES GRANDS RELEVÉS

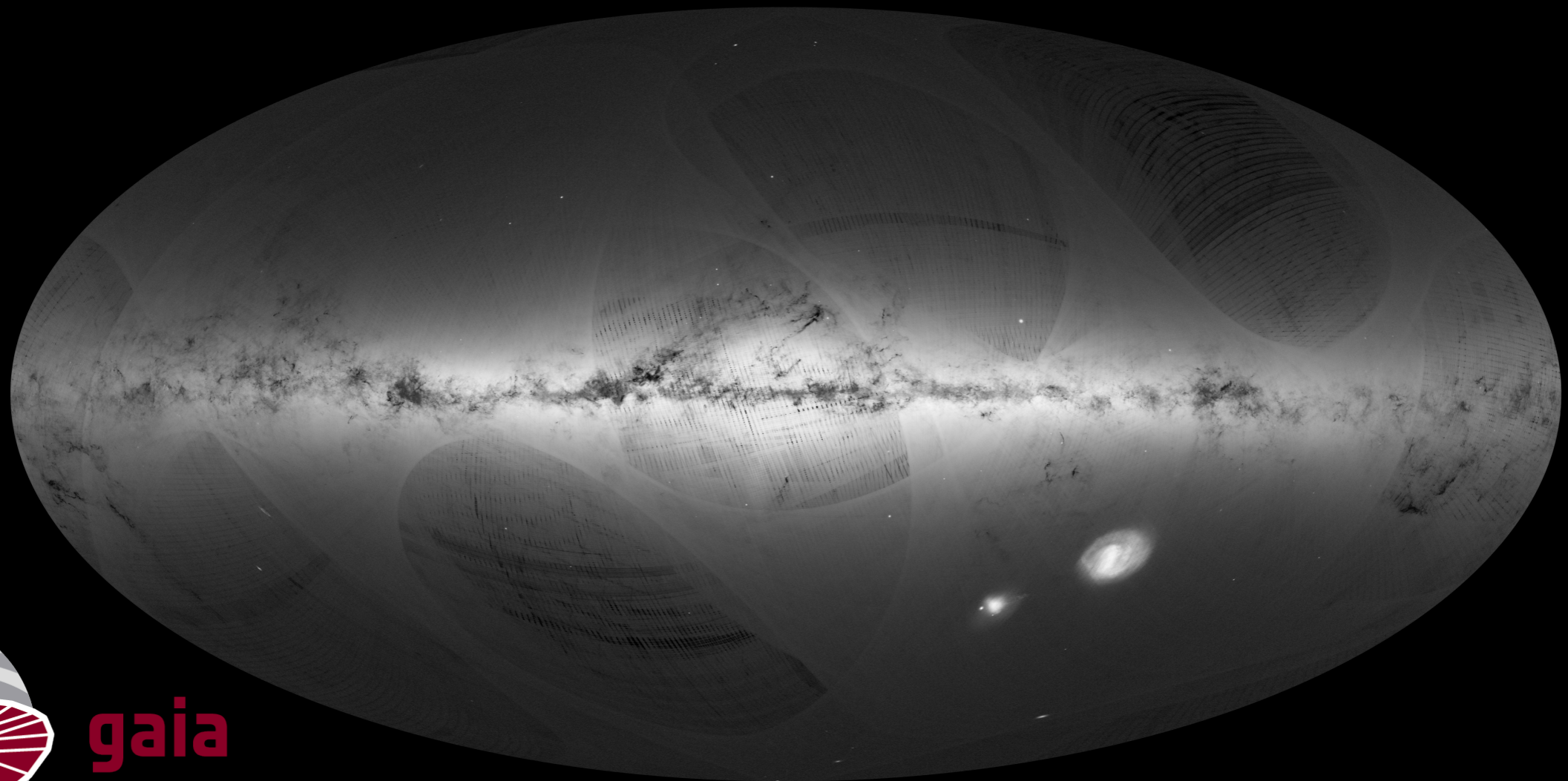
- Photométriques (>500 millions \*)
- Astrométriques (>1 milliard \*)
- Spectroscopiques (plusieurs millions \*, ~500 000 \* géantes)
- Astérosismiques (~20 000 \* géantes)



# LES GRANDS RELEVÉS

Astrométriques — DR2 25/04/2018 :

- position, parallaxe, mouvement propre (1.3 milliard \*)
- $V_{\text{rad}}$  (7.2 millions \*)



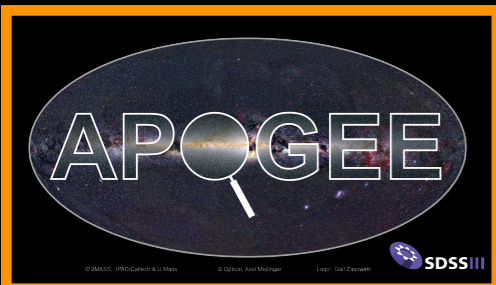
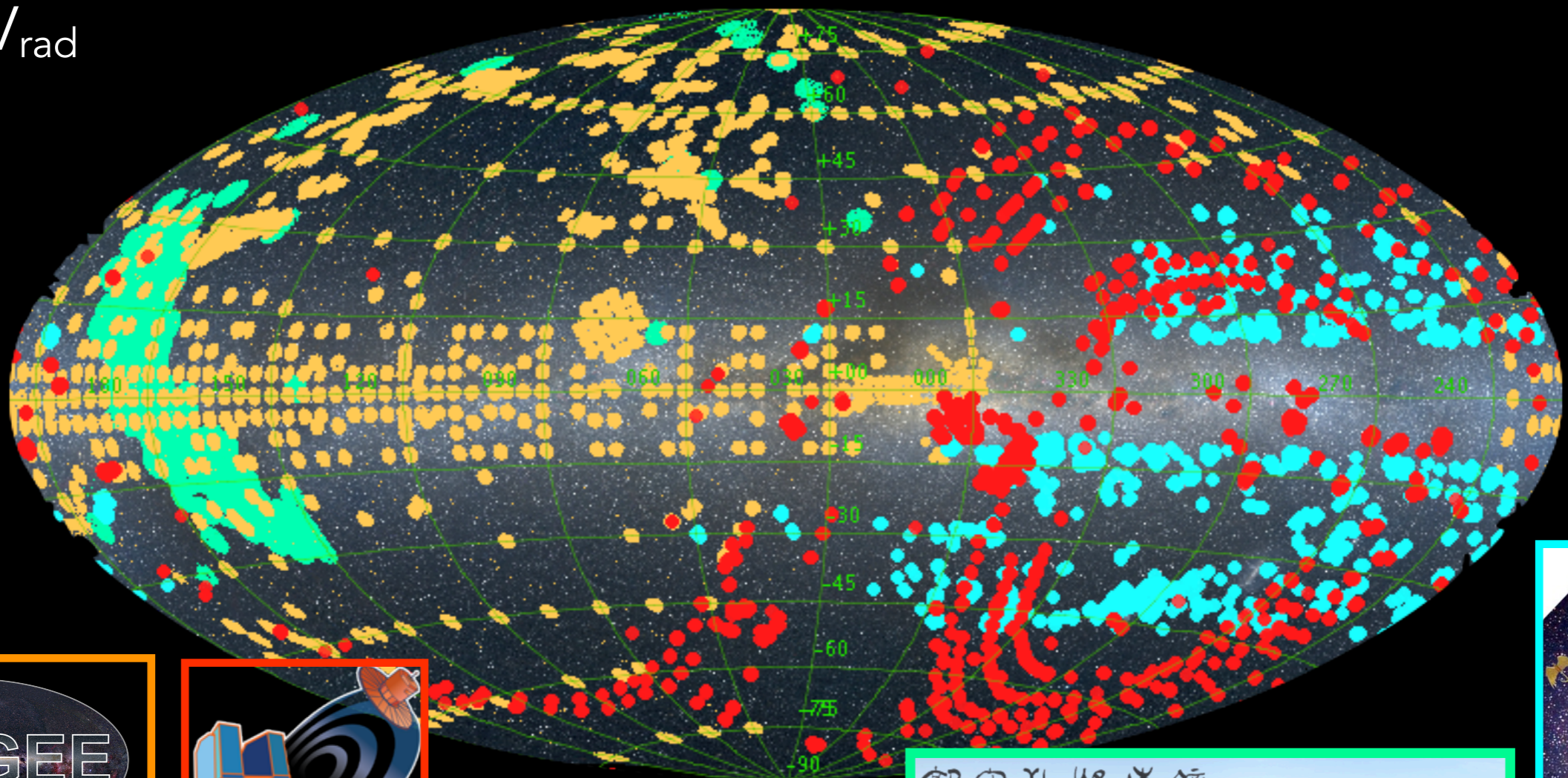
gaia



# LES GRANDS RELEVÉS

Spectroscopiques : propriétés de surface des étoiles

- $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$
- Abondances
- $[\text{Fe}/\text{H}]$
- $V_{\text{rad}}$



郭守敬望遠鏡

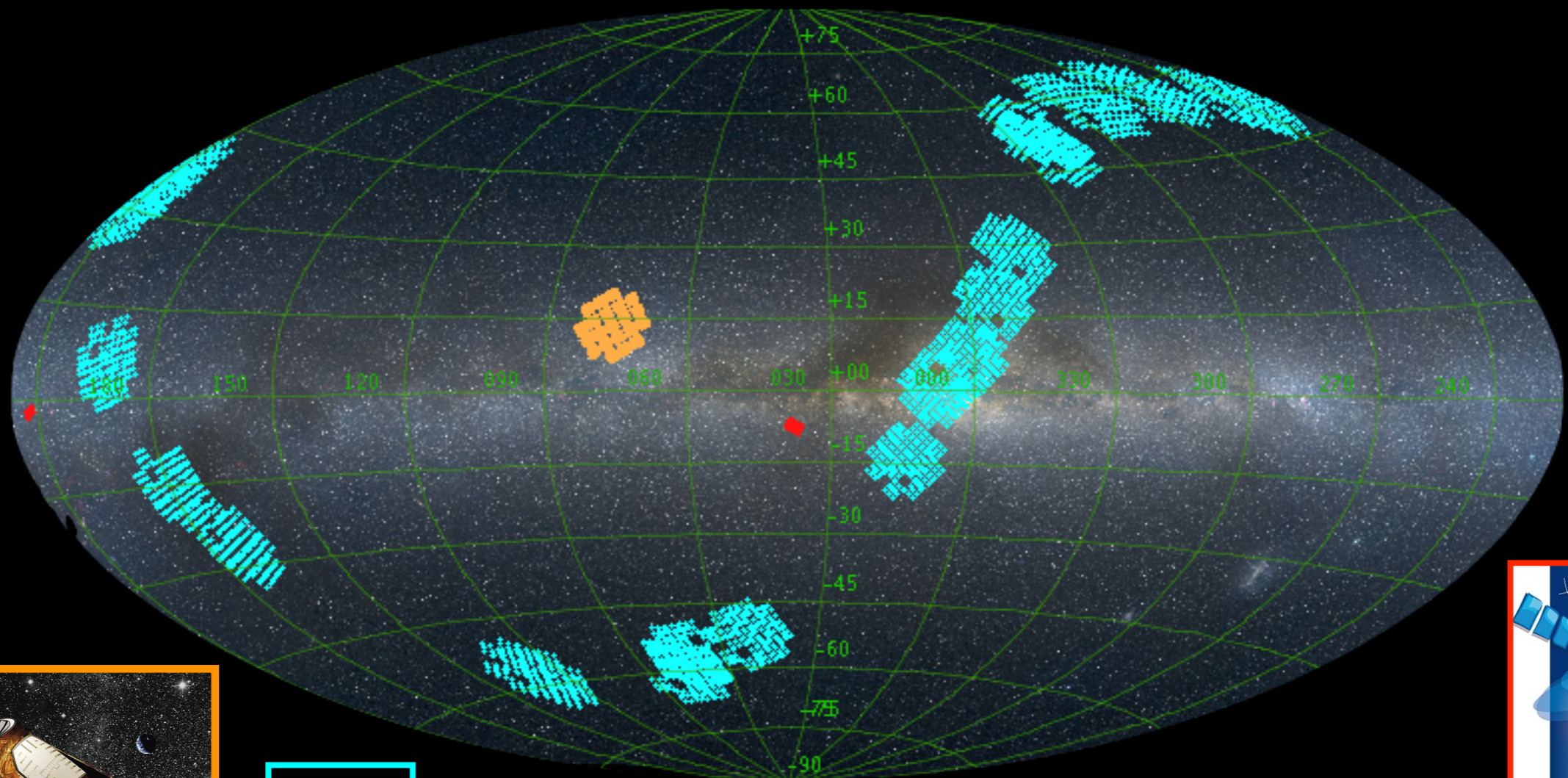
Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST)



# LES GRANDS RELEVÉS

Astérosismiques : propriétés de l'intérieur des étoiles

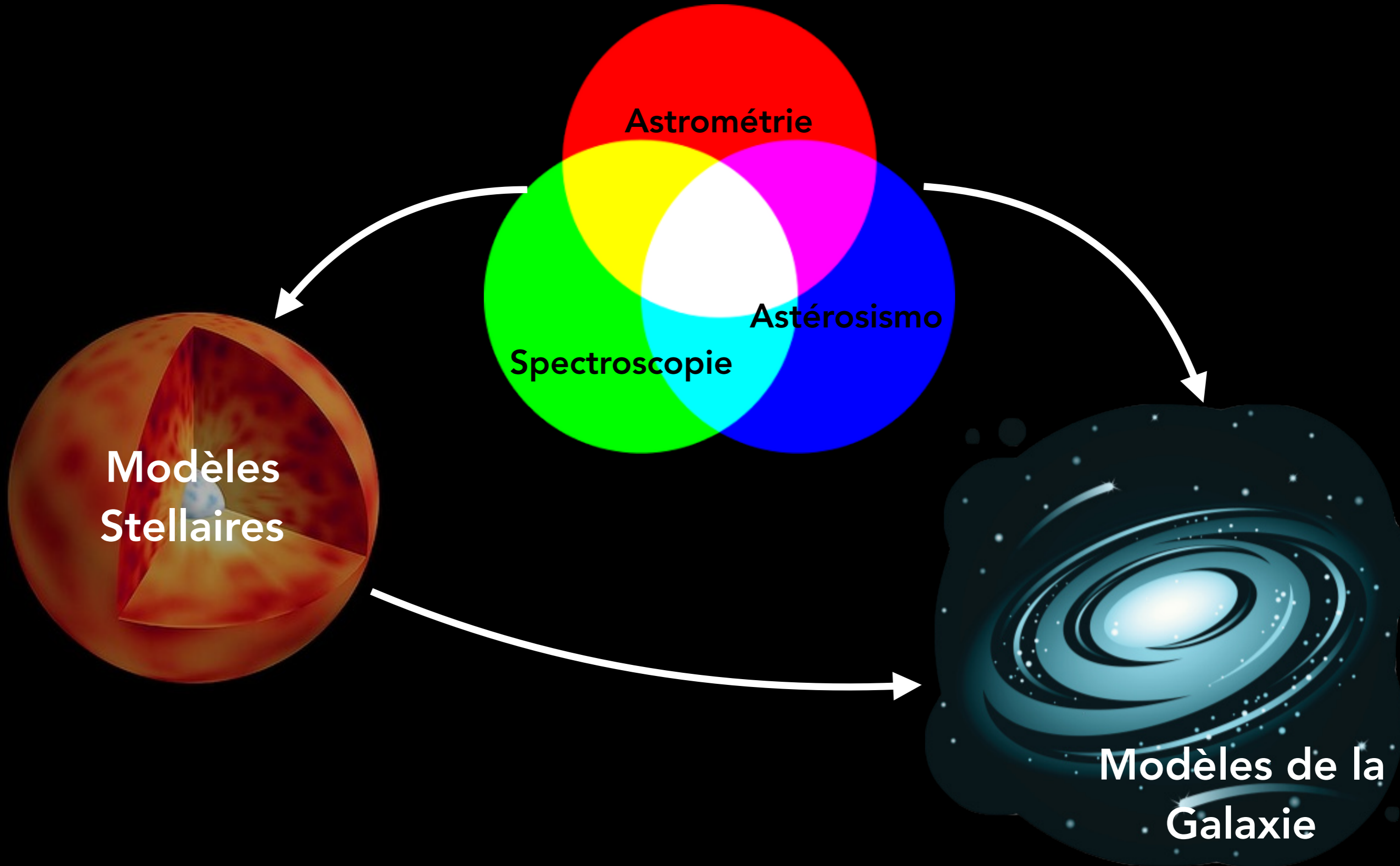
- masse, rayon -> distance, âge,  $\log g$
- stade évolutif (e.g. Mosser et al 2012a, 2014)
- $P_{\text{rot}}$  cœur des géantes (e.g. Deheuvels et al 2015)



+K2



# SYNERGIE



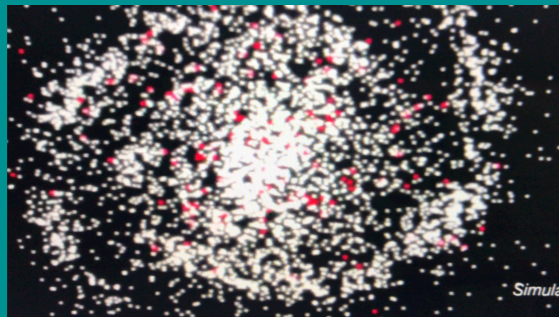
# MODÈLE DE SYNTHÈSE DE POPULATIONS STELLAIRES



# MODÈLE DE SYNTHÈSE DE POPULATIONS STELLAIRES

IN

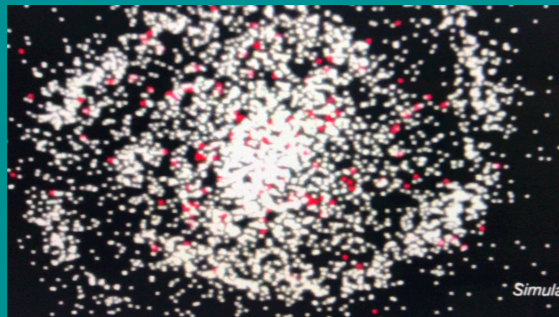
IMF ; SFR ; lois de densité, relation âge-Z ; extinction interstellaire ; **modèles stellaires, ...**



# MODÈLE DE SYNTHÈSE DE POPULATIONS STELLAIRES

IN

IMF ; SFR ; lois de densité, relation âge-Z ; extinction interstellaire ;  
**modèles stellaires, ...**



OUT

**Catalogues de pseudo étoiles** avec leurs propriétés intrinsèques et les observables



# MODÈLE DE SYNTHÈSE DE POPULATIONS STELLAIRES

- Simuler le contenu en étoiles de la Galaxie en prenant en compte des erreurs observationnelles, des biais instrumentaux, de la complétude des relevés, ...
- Comparer avec les observables pour contraindre les hypothèses de départ sur la structure, la formation, ..., théoriques ou empiriques
- Fournit un lien fondamental entre la théorie/les modèles et les observations
- Permet d'analyser un très grand nombre de données du point de vue statistique

# LE MODÈLE DE LA GALAXIE DE BESANÇON (BGM)

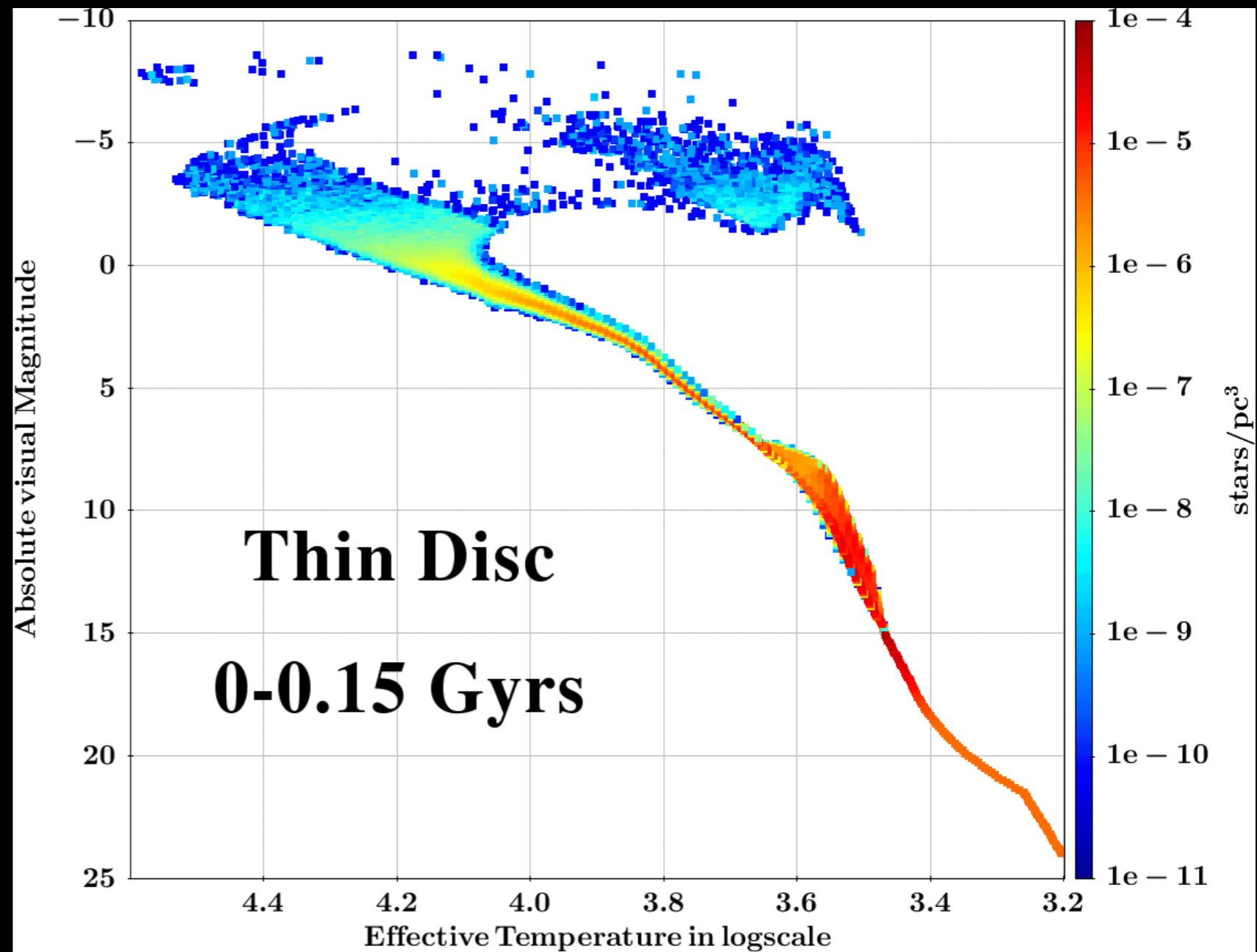
Robin et al, 2003

Czekaj et al, 2014

Robin et al, 2014

Bienaymé et al 2015

Lagarde et al 2017



*Diagramme HR, Mor et al, 2016*



# LE MODÈLE DE LA GALAXIE DE BESANÇON (BGM)

Lagarde et al 2017

What's new?

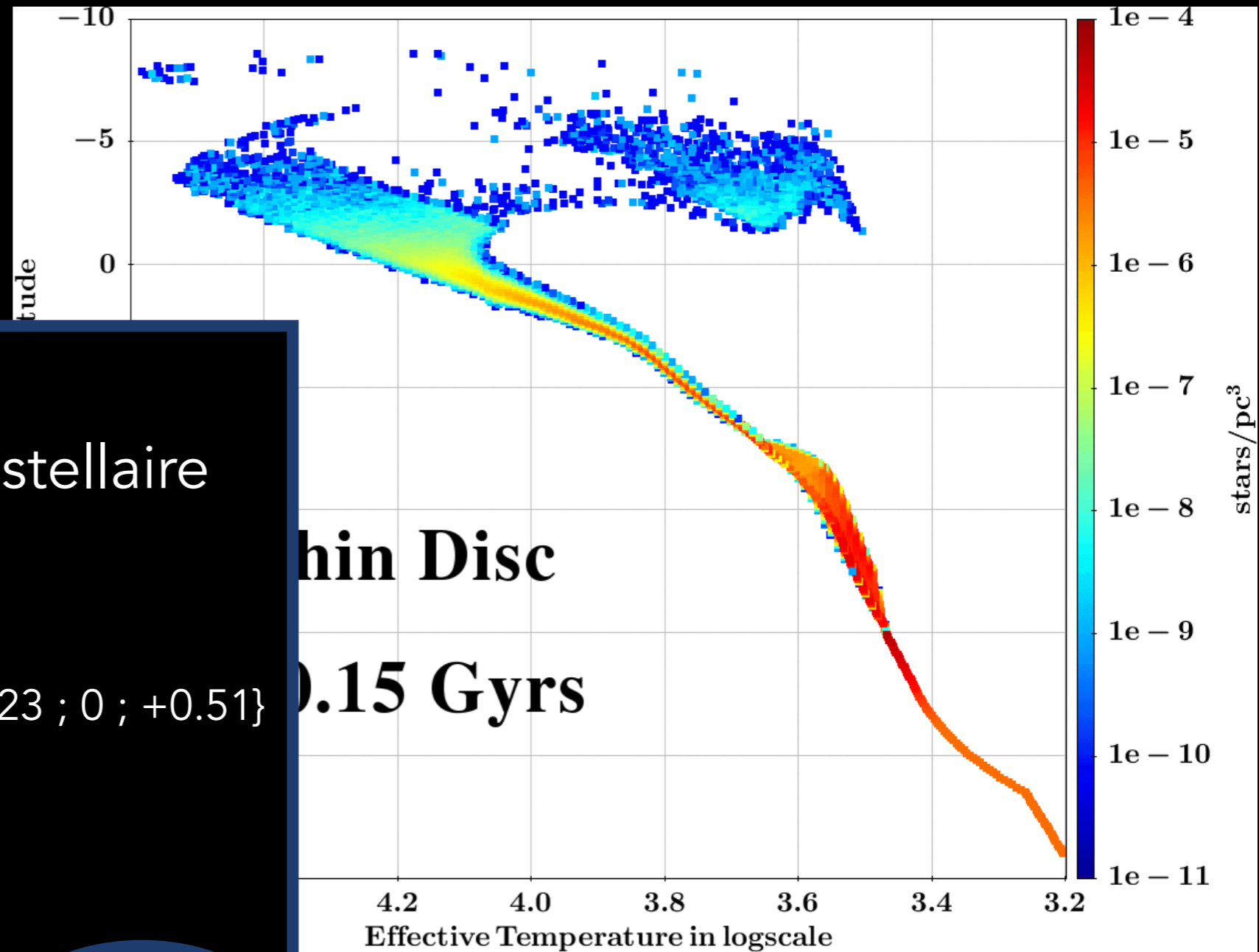
Modèles d'évolution stellaire  
**STAREVOL**

- $M=[0.6-6.0M_{\odot}]$
- $[Fe/H] = \{-2.15 ; -1.2 ; -0.54 ; -0.23 ; 0 ; +0.51\}$
- PMS à AGB
- $[\alpha/Fe] = \{0 ; 0.15 ; 0.3\}$

Propriétés  
sismiques

Propriétés  
chimiques

Processus  
de transport



Thin Disc

0.15 Gyrs

Diagramme HR, Mor et al, 2016

# PROCESSUS DE TRANSPORT

Instabilité **thermohaline** dans les géantes

*Charbonnel & Zahn 2007, Charbonnel & Lagarde 2010*

# PROCESSUS DE TRANSPORT

Instabilité **thermohaline** dans les géantes

*Charbonnel & Zahn 2007, Charbonnel & Lagarde 2010*

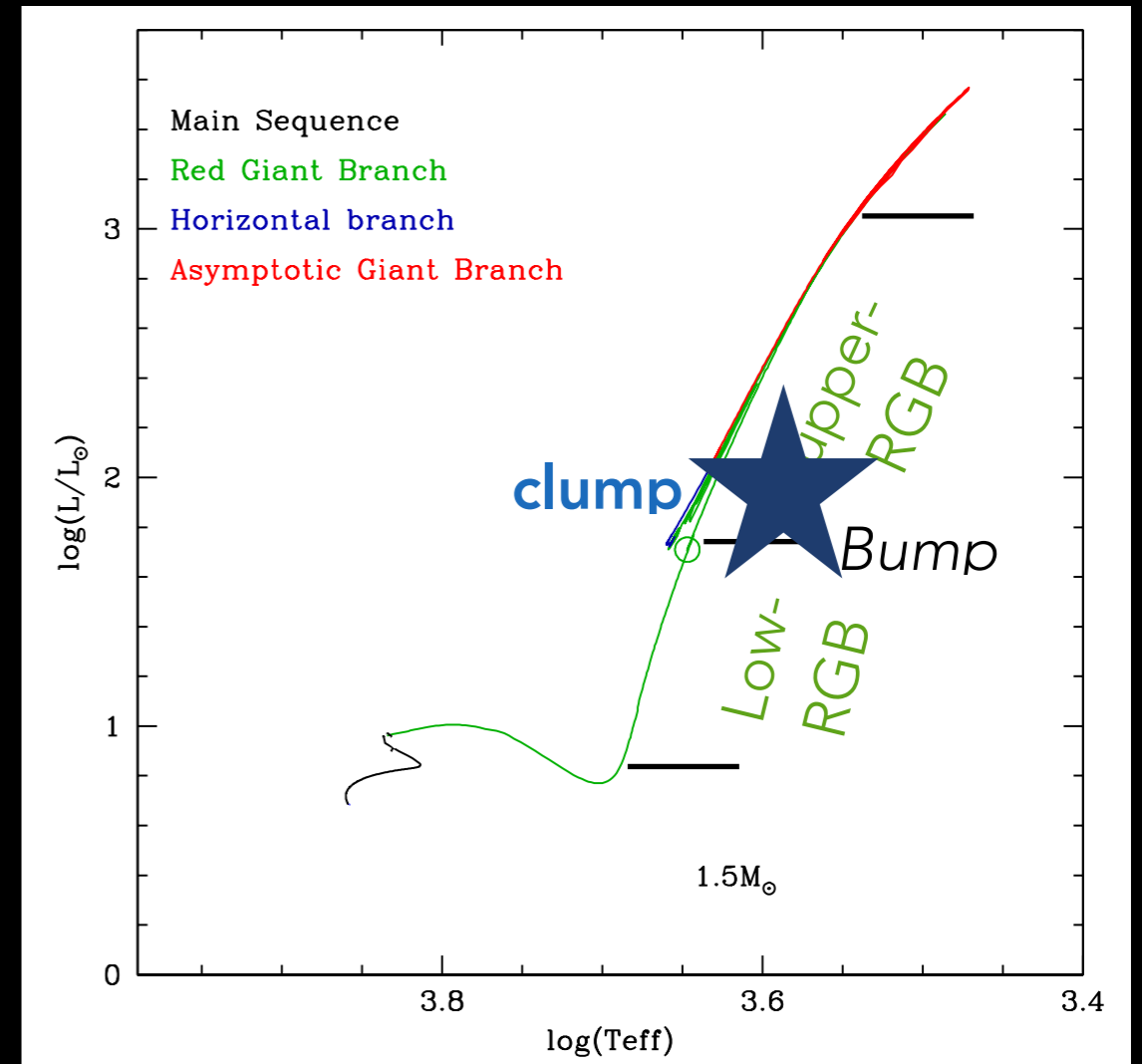
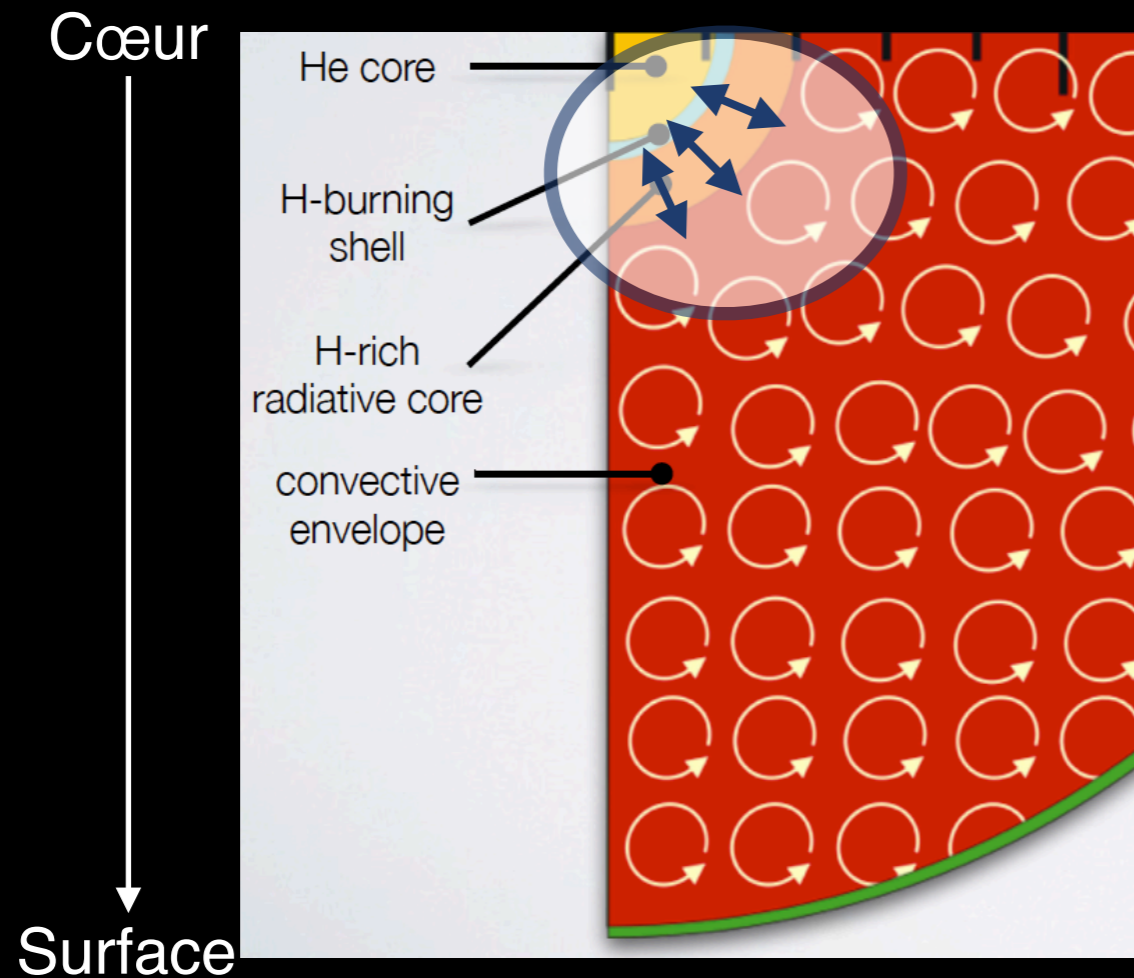
La circulation thermohaline est la circulation océanique grande échelle engendrée par les **différences de masse volumique** de l'eau de mer qui proviennent des écarts de **température** et de **salinité**.

thermo — pour température  
halin — pour salinité



# EFFET DES PROCESSUS DE TRANSPORT

Instabilité thermohaline dans les géantes

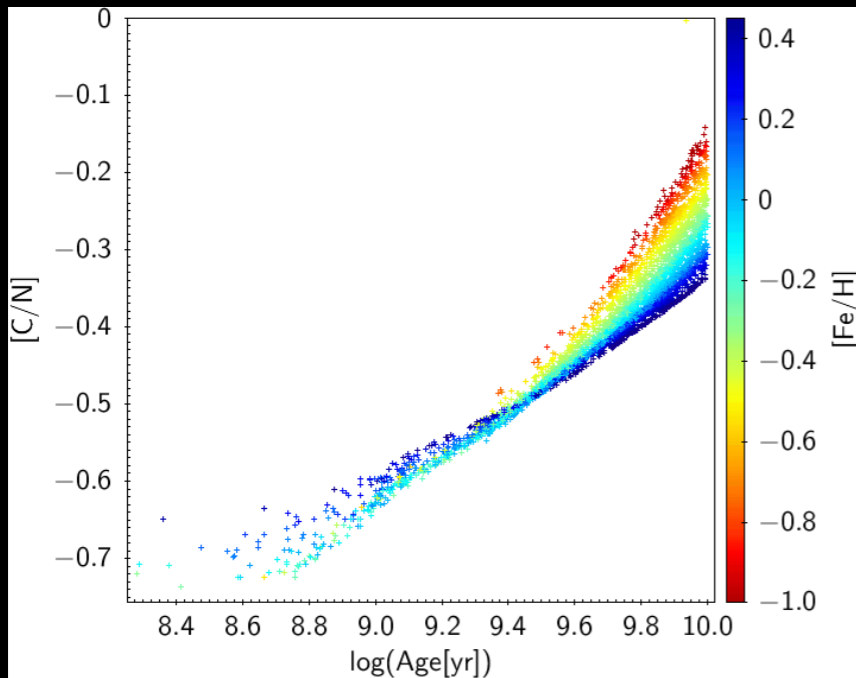


- par une inversion du poids moléculaire moyen :  $3\text{He} + 3\text{He} \rightarrow 4\text{He} + 2\text{p}$
- change les abondances de surface d'éléments (**Li**, **<sup>3</sup>He**, **<sup>12</sup>C**, **<sup>13</sup>C**, **<sup>14</sup>N**)

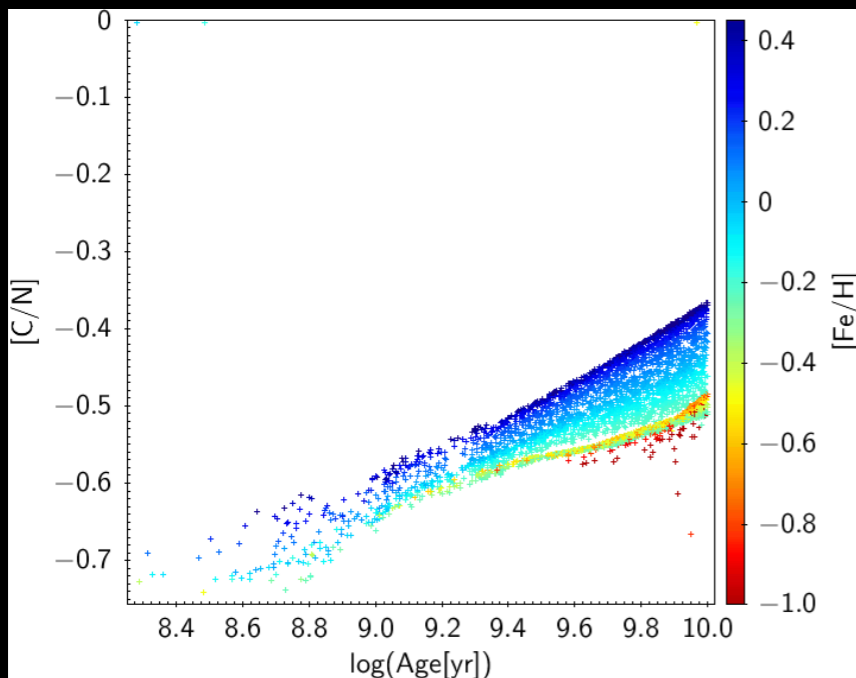
# EFFET DES PROCESSUS DE TRANSPORT

Simulations du champ Kepler avec le BGM : [C/N] vs âge

Standard



+ thermohaline



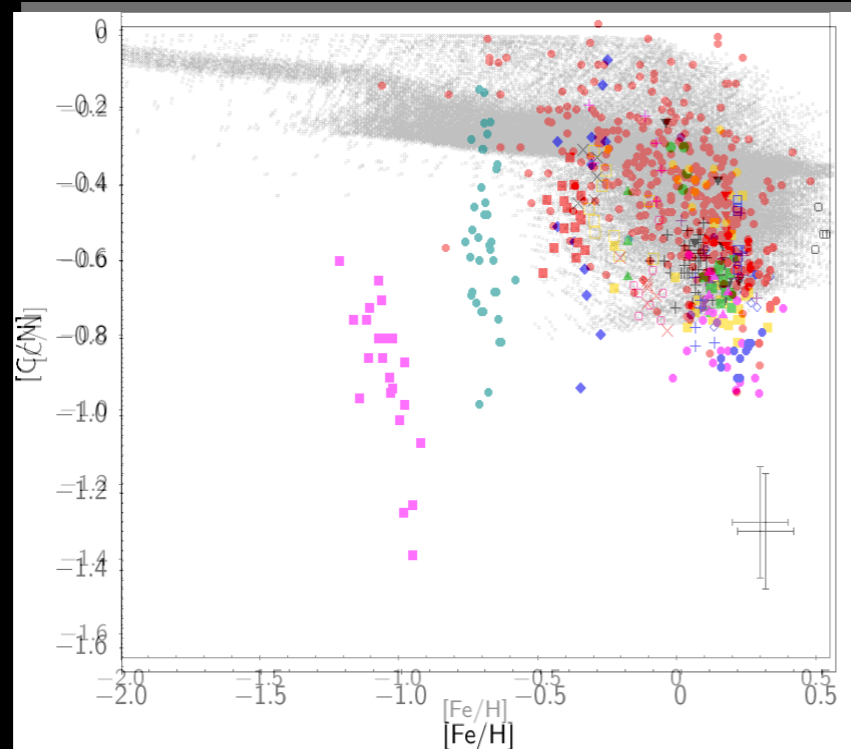
Les hypothèses de physique stellaire ont un **impact très important sur la détermination des âges**, l'un des paramètres piliers pour l'archéologie galactique.

*Lagarde et al 2017*

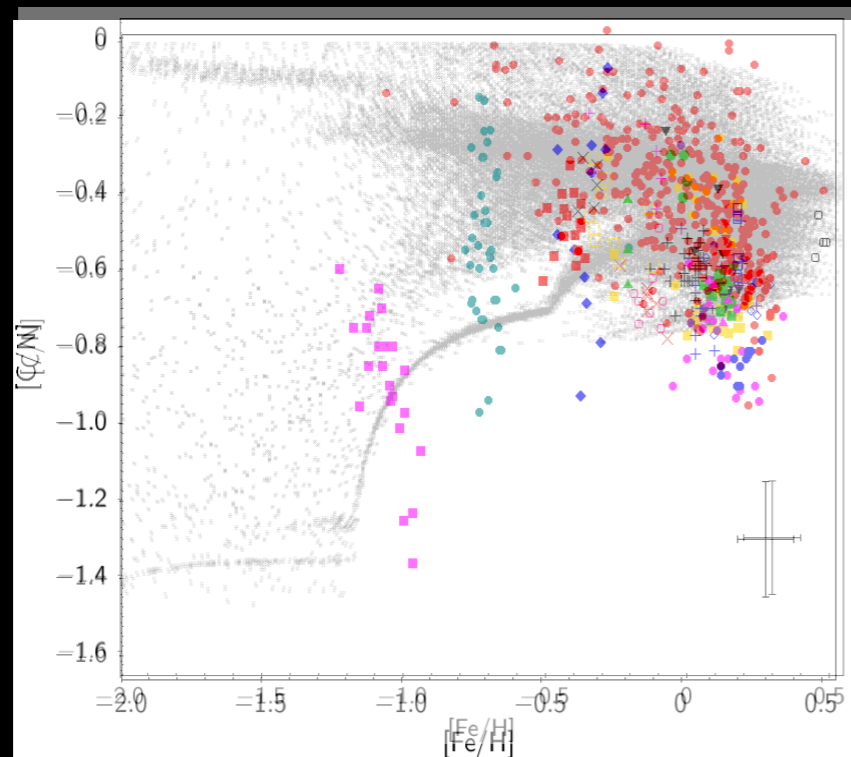
# COMPARAISON AVEC LE GAIA-ESO SURVEY

[C/N] vs [Fe/H]

Standard



+ thermohaline



- 374 géants du champ avec des abondances C et N + amas ouverts et globulaires
- simulation

*Lagarde et al soumis*

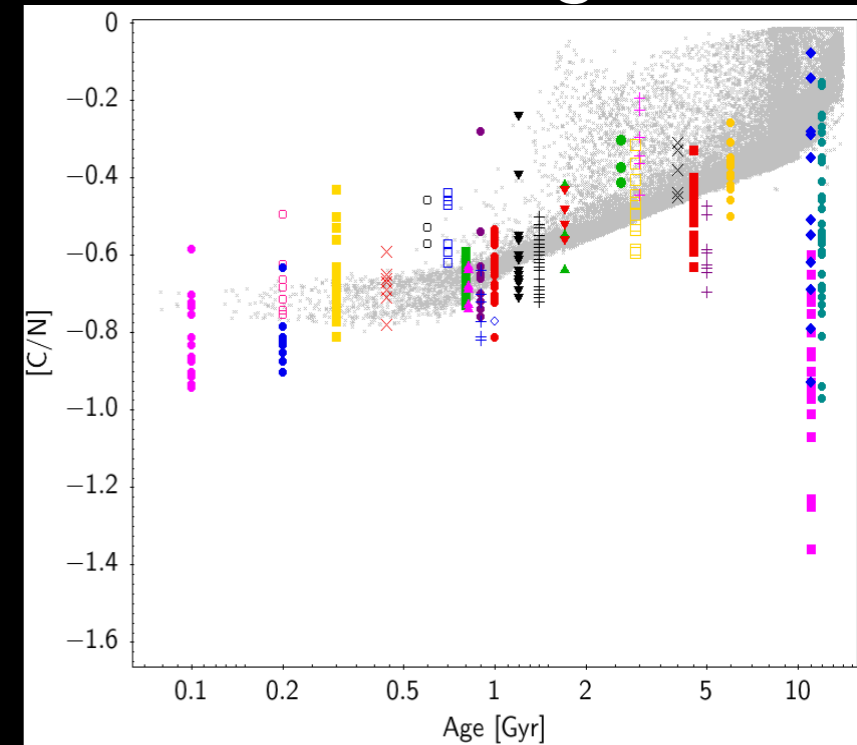
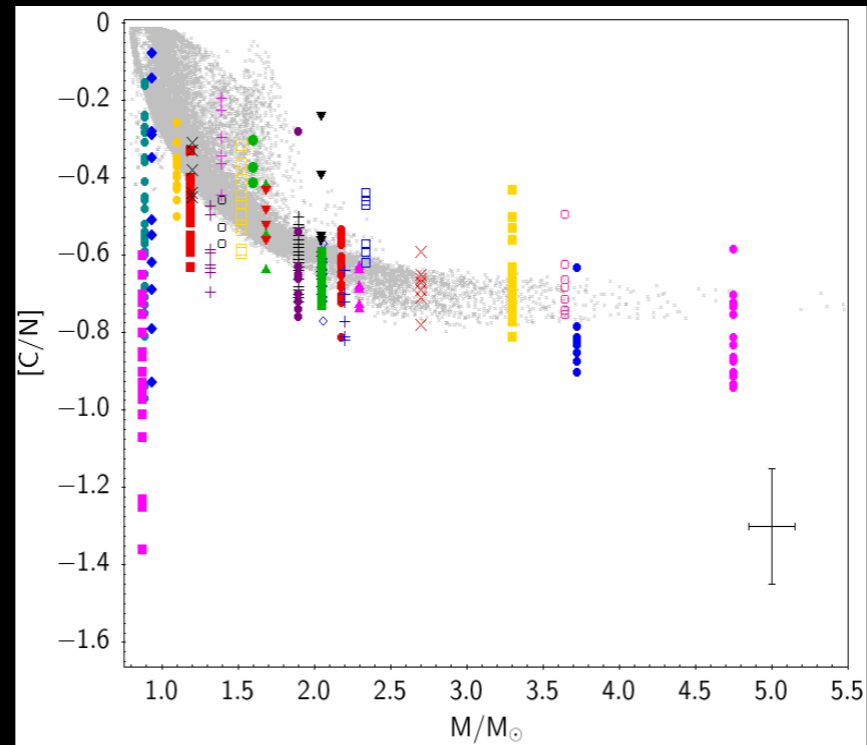
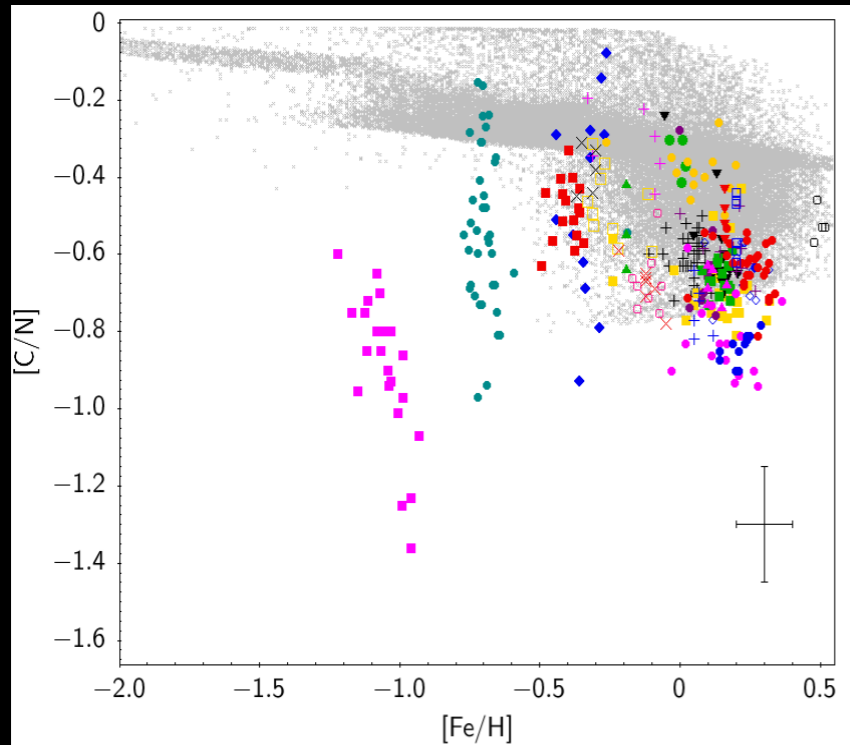
# COMPARAISON AVEC LE GAIA-ESO SURVEY

[C/N] vs [Fe/H]

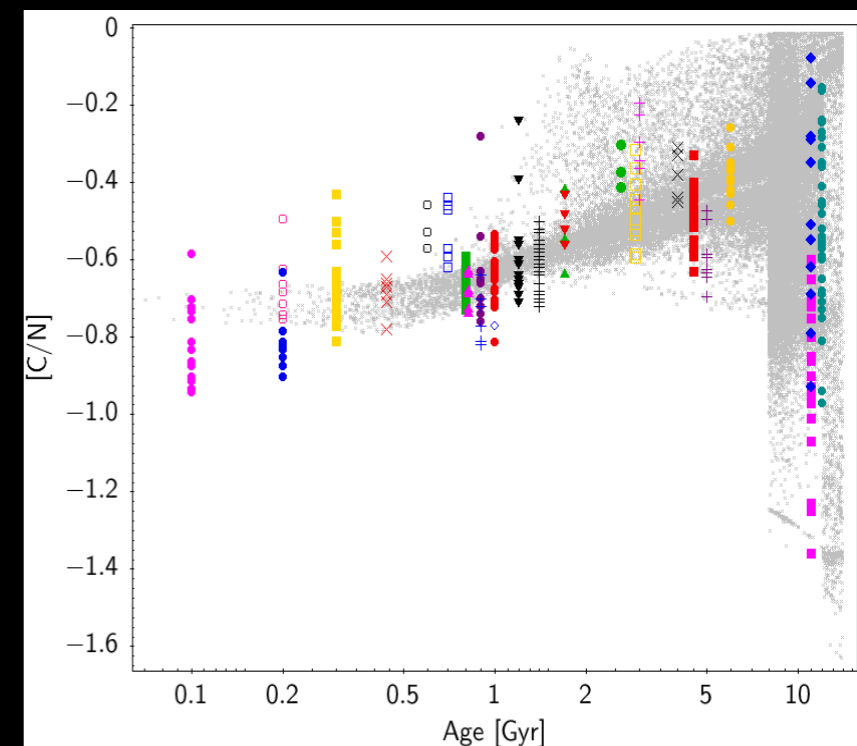
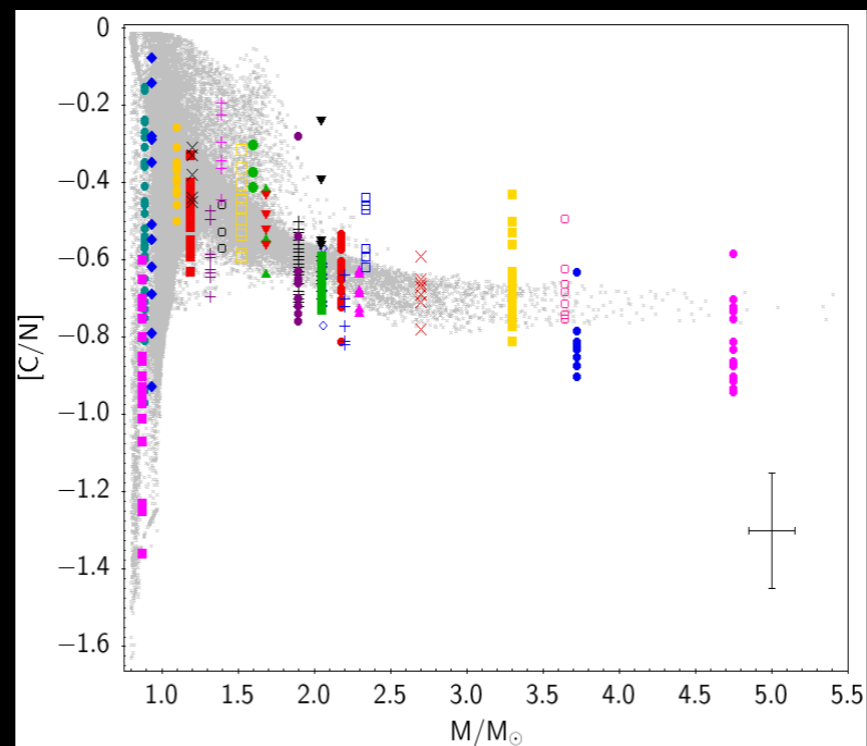
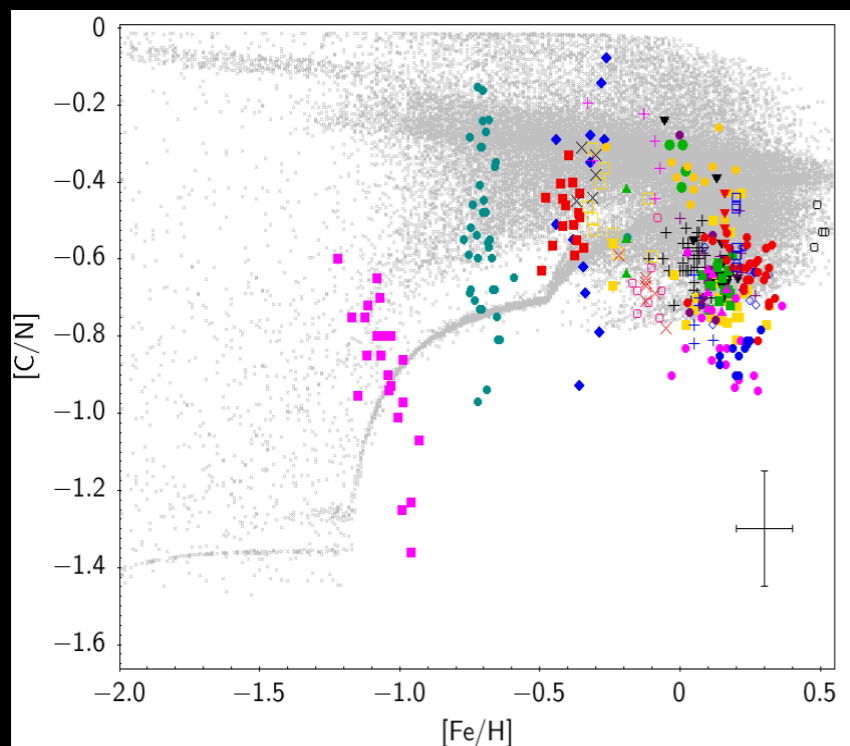
[C/N] vs  $M_{\text{turn-off}}$

[C/N] vs âge

Standard



+ thermohaline

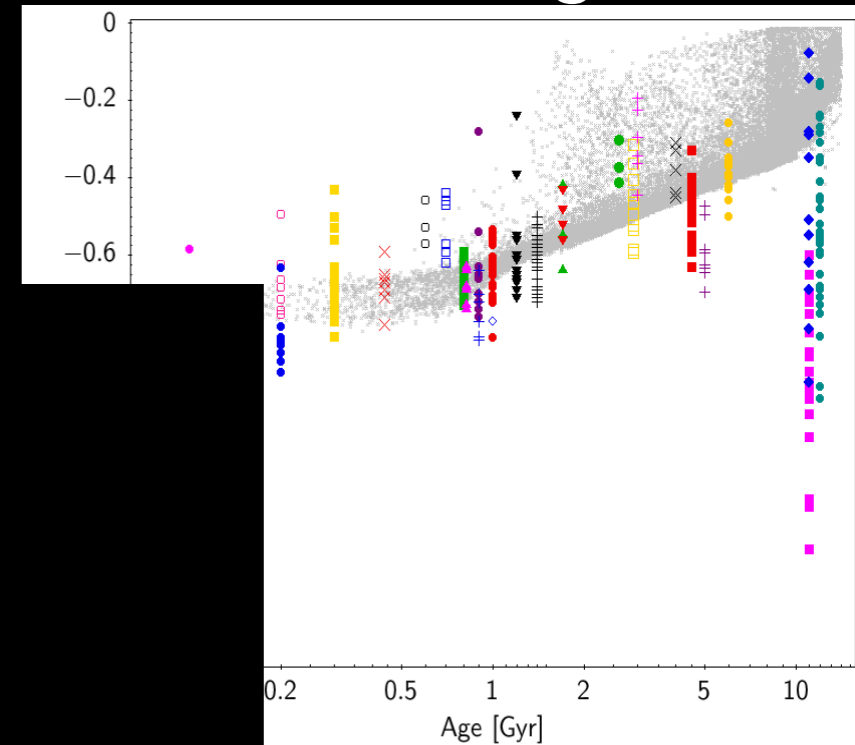
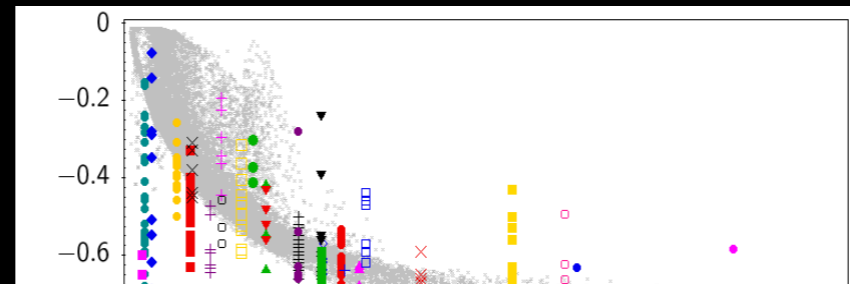
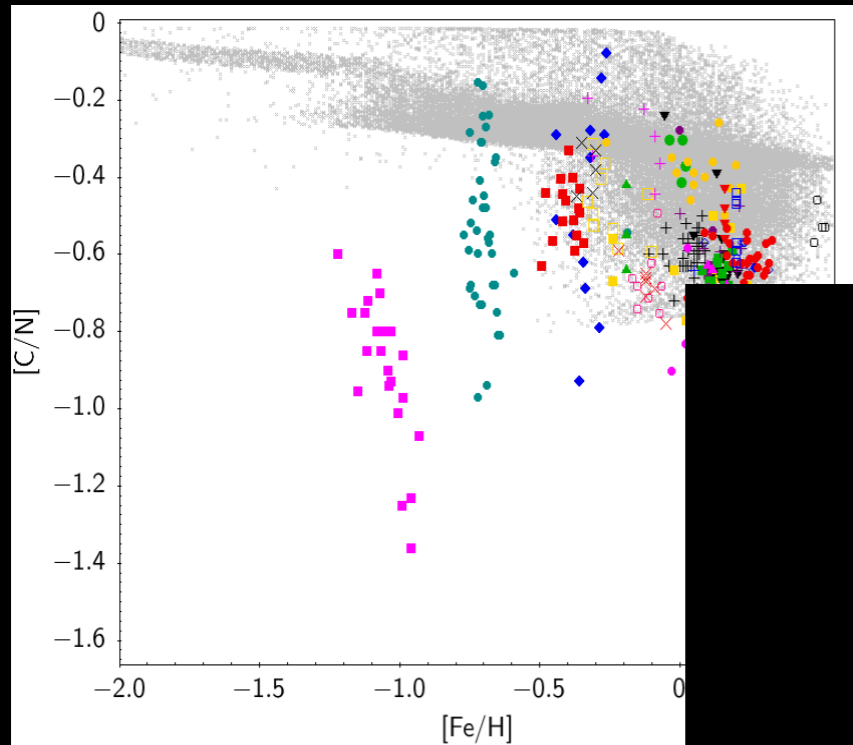


# COMPARAISON AVEC LE GAIA-ESO SURVEY

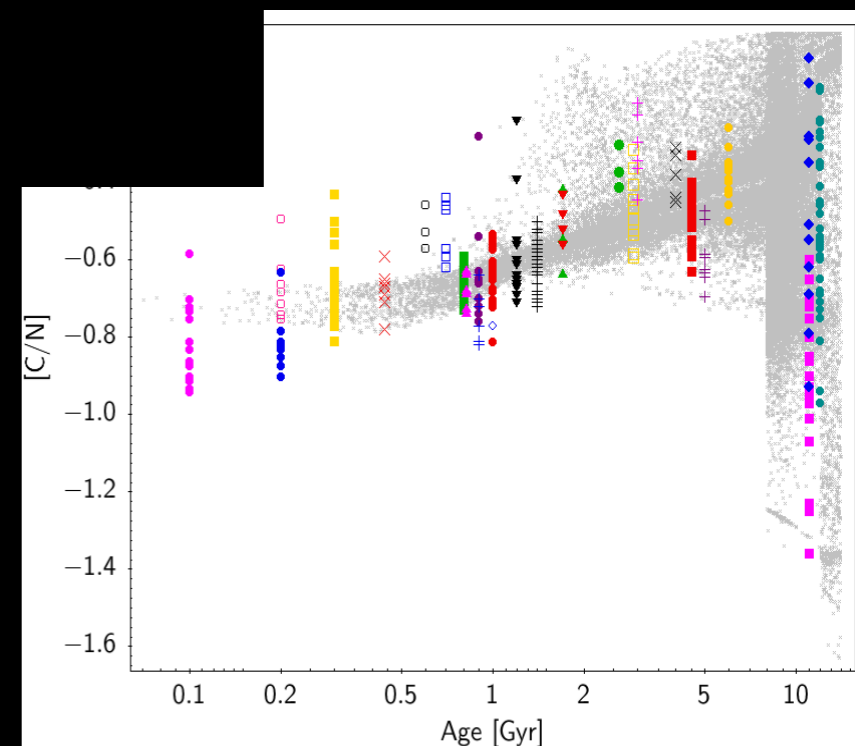
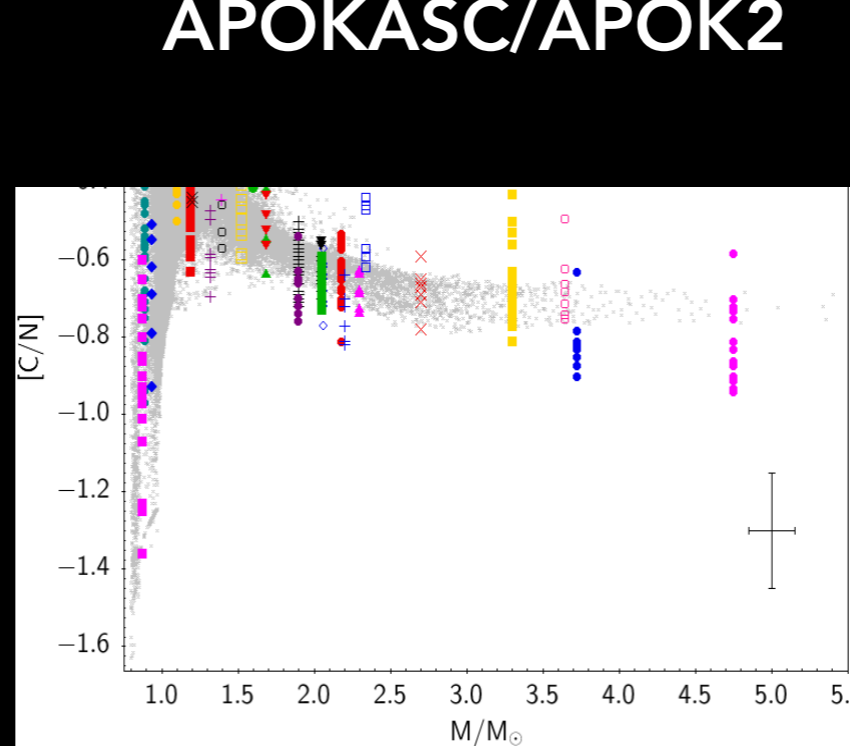
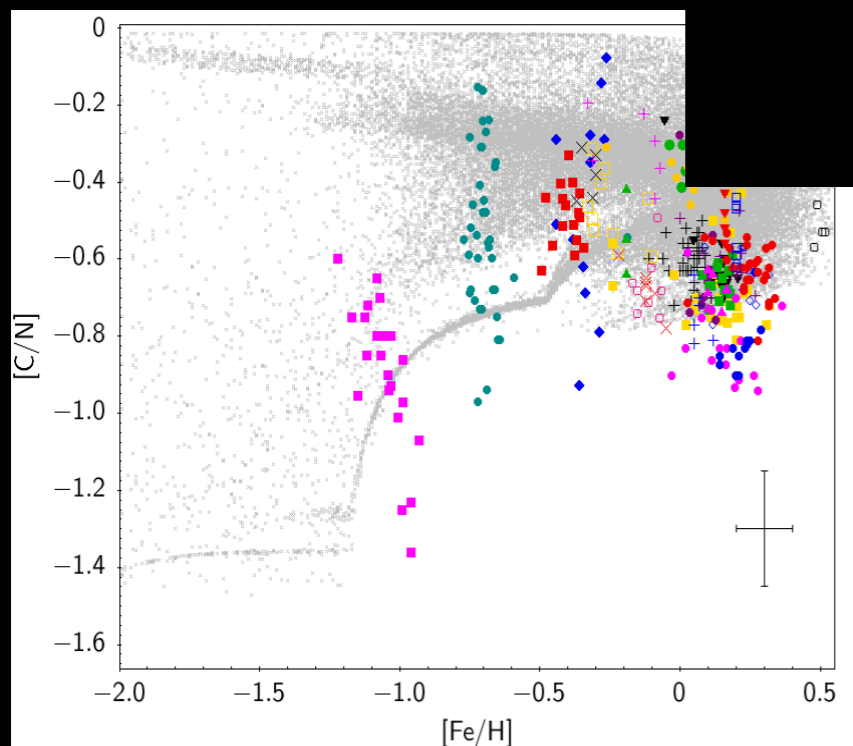
[C/N] vs [Fe/H]

[C/N] vs M<sub>turn-off</sub>

[C/N] vs âge



**Nouvelles contraintes  
observationnelles :  
CoRoGEE/CoRoGES  
APOKASC/APOK2**

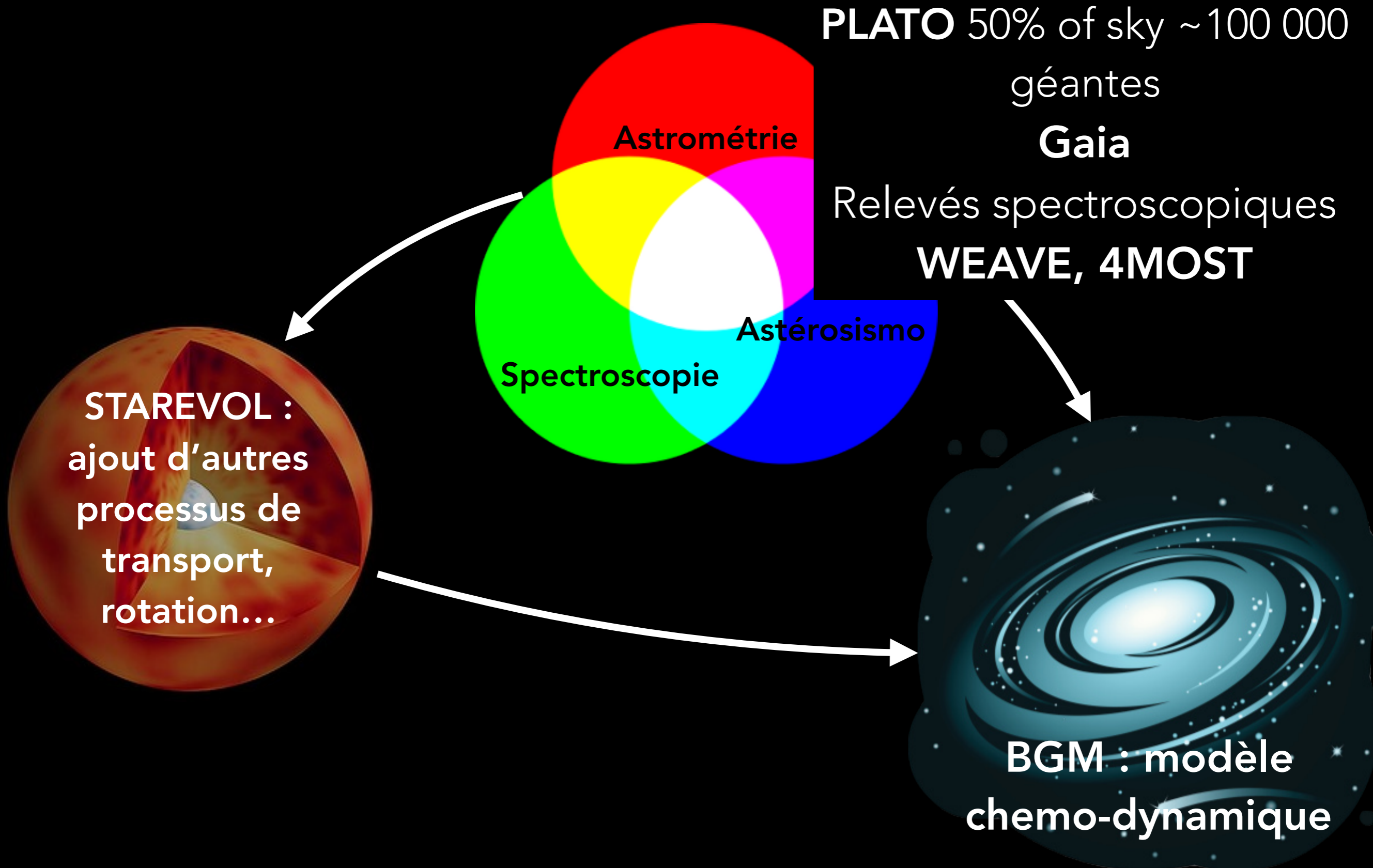


Standard

+ thermohaline



# PERSPECTIVES (BISONTINES)



# Perspectives de la discipline

## **Environnement idéal, très riche, pour l'archéologie galactique**

Suivis au sol spectroscopiques : 4MOST et WEAVE, MOONS, MSE (étoiles pauvres en métaux, formation stellaire à l'époque de la réionization, détection de sous-structures dans le halo, de résidus d'épisodes d'accrétion)

Grands relevés photométriques au sol (cartes de métallicités à grande échelle et extension Gaia avec distances photométriques pour les étoiles MS) : CFIS/Luau, LSST, Euclid

## **Les géantes : de nouvelles horloges cosmiques**

- données spectroscopiques -> paramètres stellaires dans un grand volume
  - astérosismologie (Corot, Kepler, K2, PLATO) -> âge des géantes
- permettent de tracer l'évolution chimique des populations stellaires

# Atelier SF2A 2018

5 juillet

« Synergie des grands surveys pour mieux comprendre les étoiles : piliers de l'archéologie galactique »

