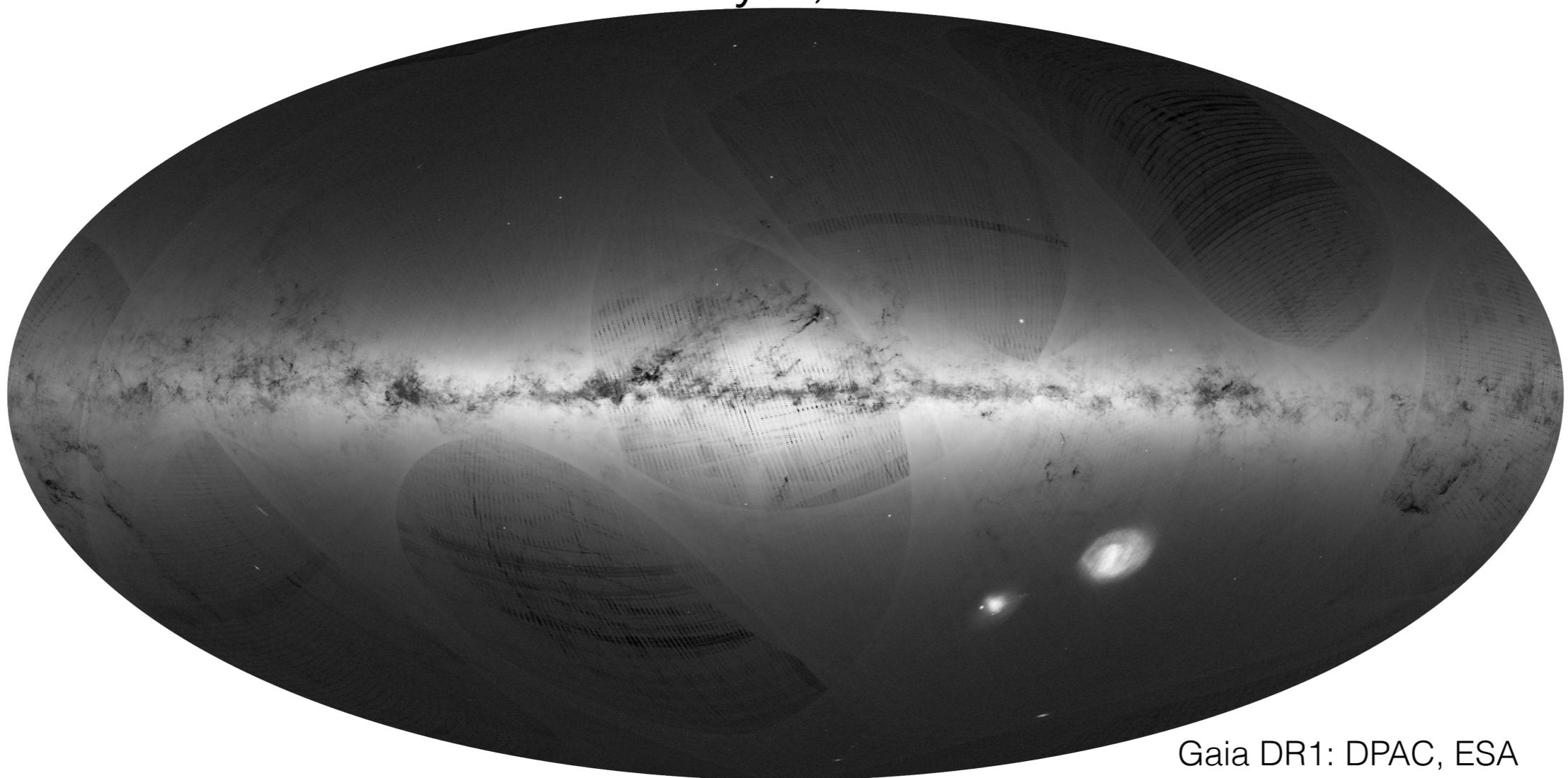


Galaxies résolues en étoiles : archéologie galactique

Bilan et perspectives
C. Reylé, V. Hill

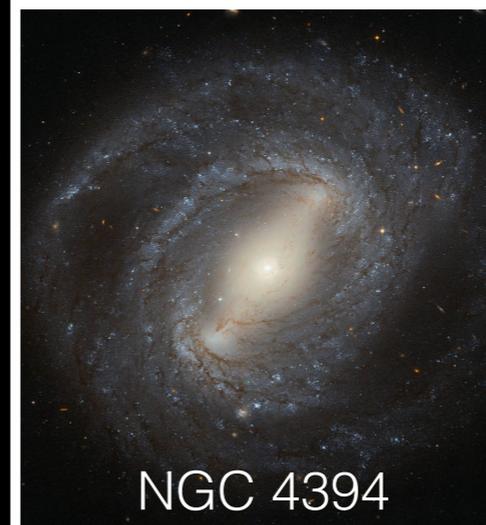
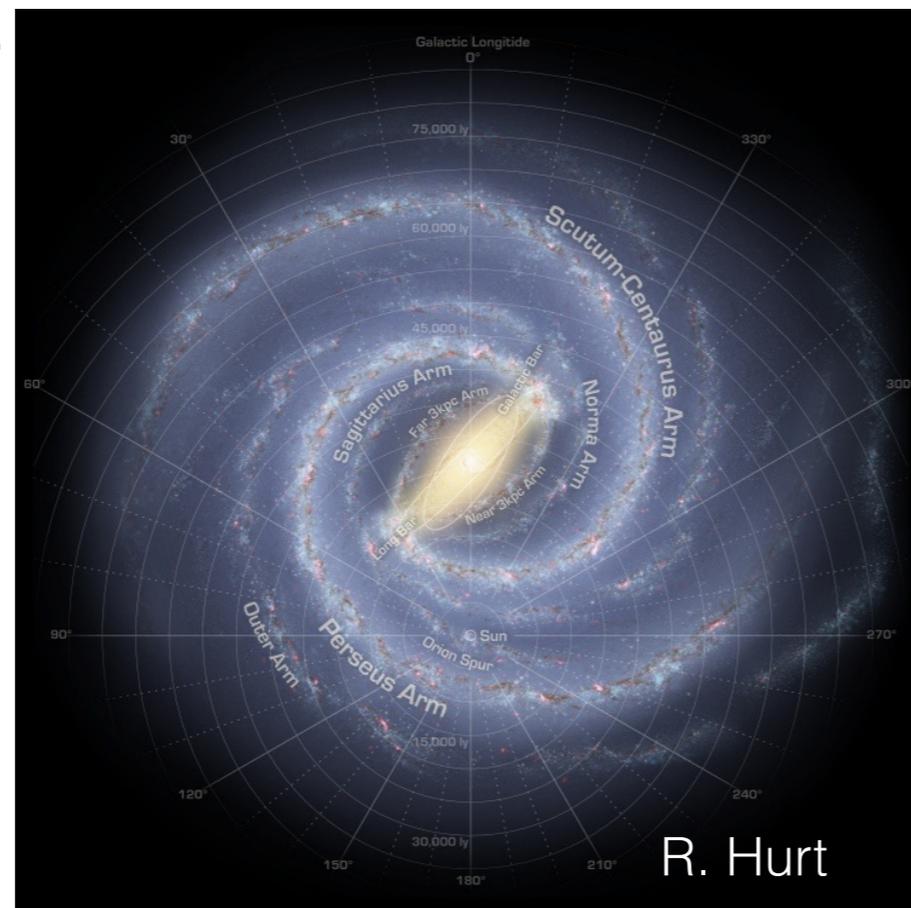


La Voie Lactée, galaxie de référence

La seule galaxie qui peut être étudiée de manière détaillée. L'étude des **populations stellaires** est nécessaire pour comprendre comment les galaxies se sont assemblées en général : but principal de l'**archéologie galactique**.

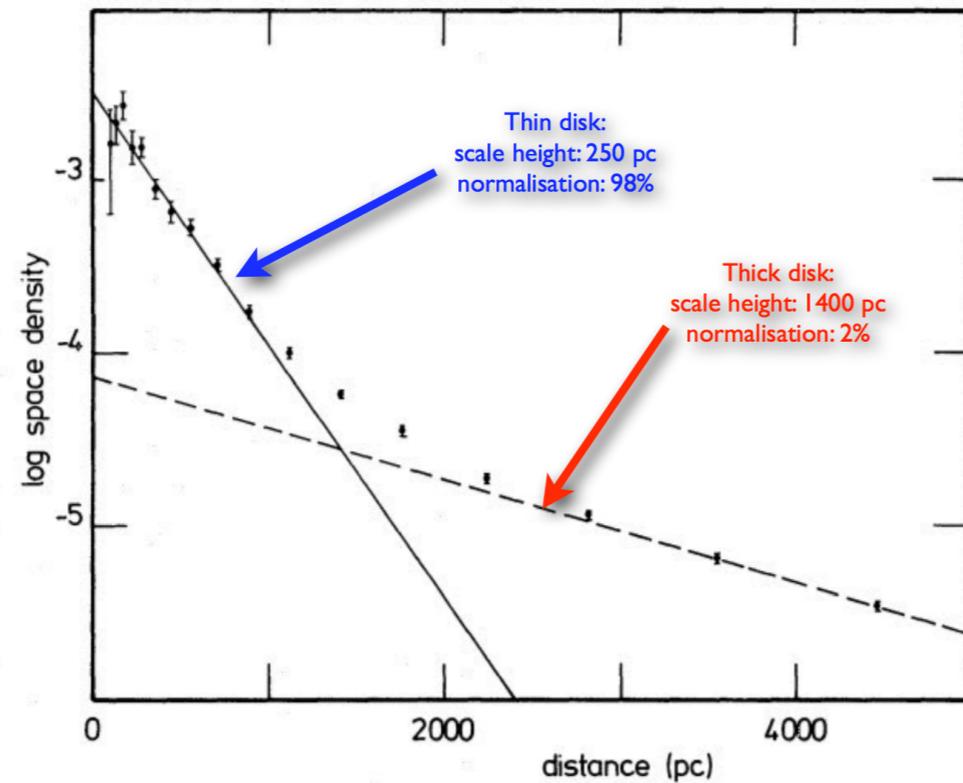
L'archéologie galactique suppose que l'histoire de notre Galaxie est encodée à la fois dans les abondances chimiques des étoiles et dans la cinématique. Un des piliers de cette discipline est l'utilisation des **rapports d'abondance** comme indicateur de l'âge.

Les éléments chimiques synthétisés à l'intérieur des étoiles, puis éjectés dans le MIS, sont incorporés dans les générations stellaires suivantes. Les différents éléments étant éjectés par des étoiles de masses différentes, et donc avec des échelles de temps différentes, les rapports des abondances stellaires fournissent une **horloge cosmique** (rapport $[\alpha/\text{Fe}]$).

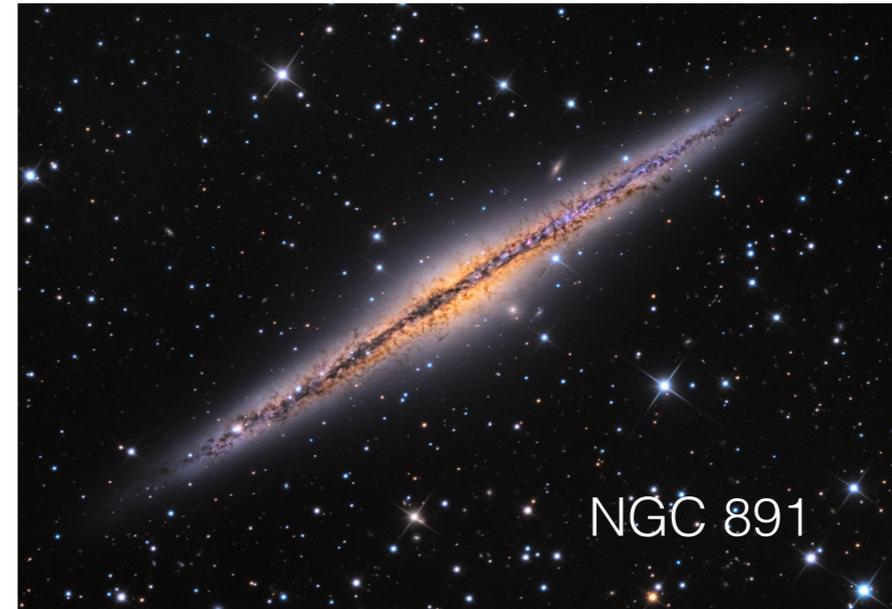


- Composantes :
- disque
 - disque épais
 - bulbe
 - halo (stellaire, sombre)

Le disque épais



(Gilmore & Reid, 1983, MNRAS, 202, 102)



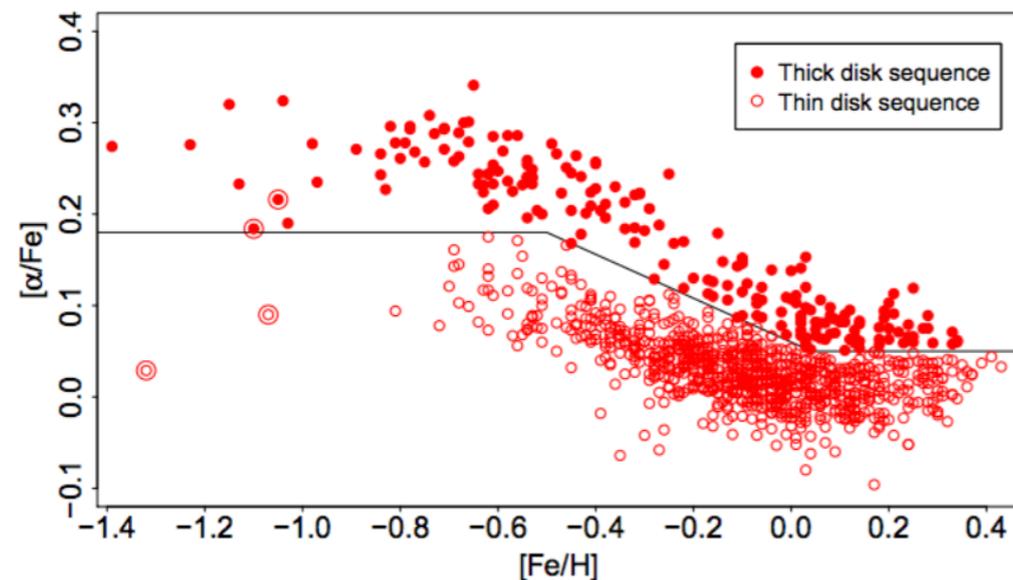
Plus de 30 ans après sa découverte, le disque épais n'est toujours pas totalement exploré, sa structure et son origine restent peu connues.

Est-il une partie du disque, qui trace une époque de formation stellaire qui diffère du disque, ou séparé par un épisode avec peu de formation stellaire ?

Son origine est-elle totalement différente ? i) reliquat d'accrétions de satellites ; ii) épaississement du disque par des accrétions ou des instabilités dues à la barre/les bras spiraux; iii) migration radiale; iv) fragments géants de gaz turbulents à grand z .

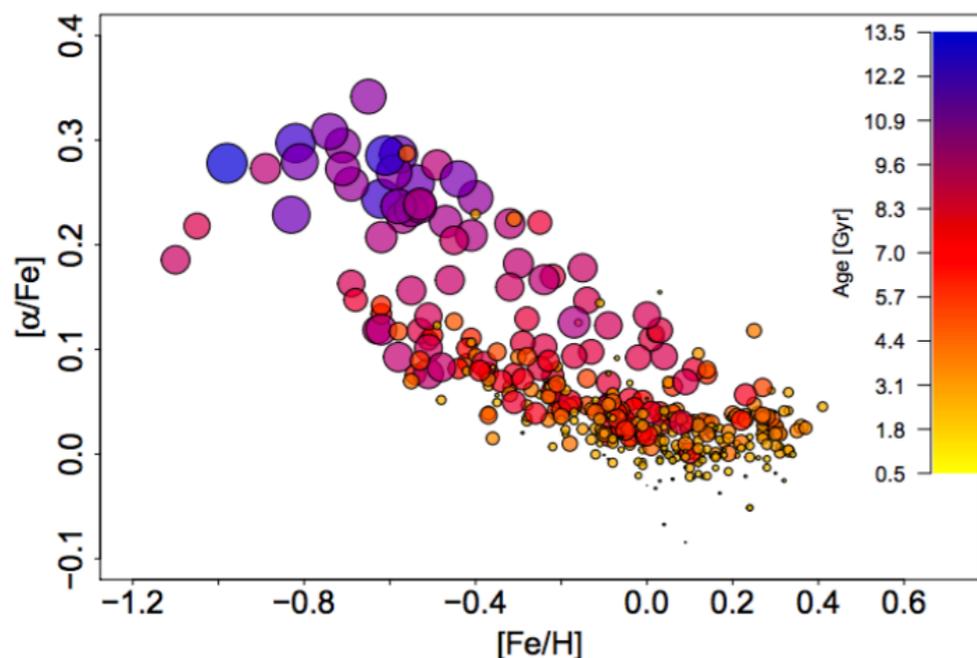
Le disque épais

Nouveau paradigme pour comprendre le disque: séparation par les propriétés chimiques (par opposition à une définition cinématique ou géométrique)



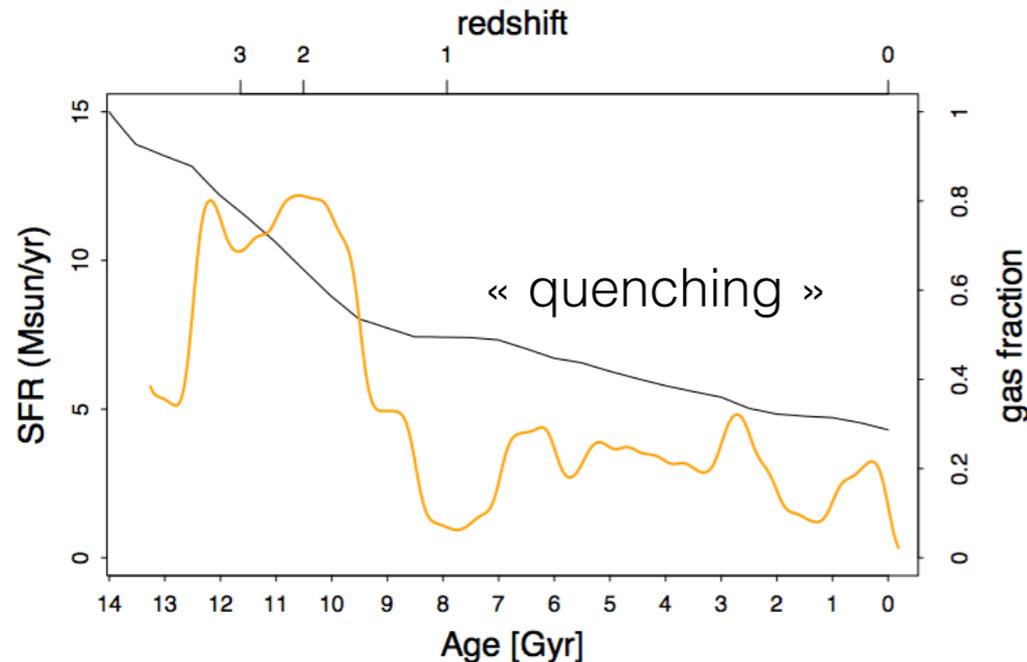
Echantillon FGK du voisinage solaire (Adibekian et al 2012)

Haywood et al. (2013)



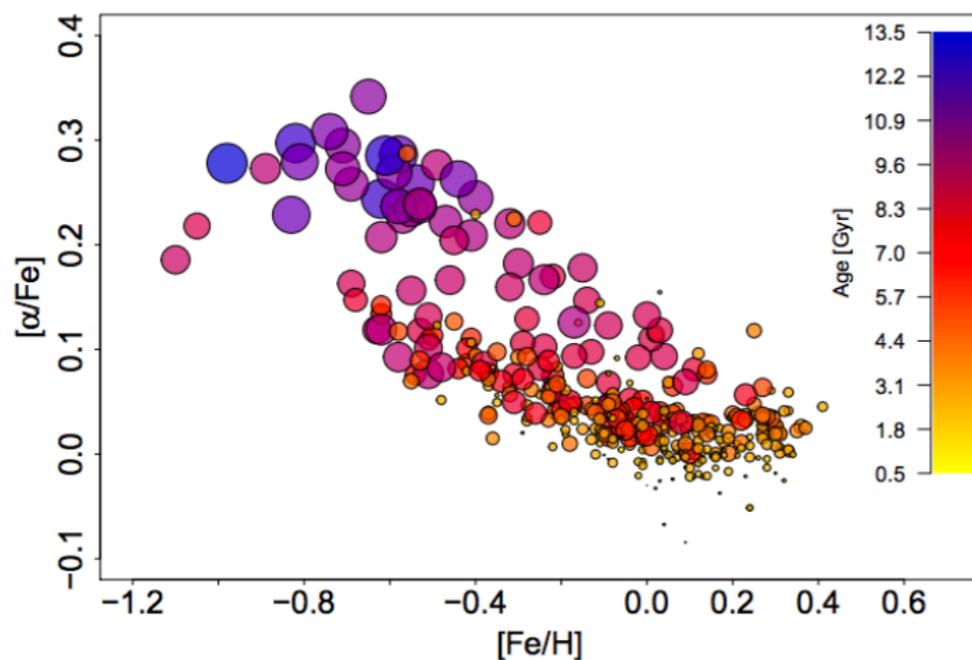
→ la population stellaire du disque épais s'étend de 9 à 13 Gyr
“formed from a well mixed interstellar medium, probably first in starburst, then in a more quiescent mode, over a time scale of 4-5 Gyr”

Le disque épais



- 2 phases distinctes de formation stellaire
- la formation stellaire a pu être inhibée par la formation de la barre (Haywood et al 2016, étude étendue à un échantillon du relevé APOGEE)

↑ modélisation des abondances chimiques (Snaith et al 2014, 2015)

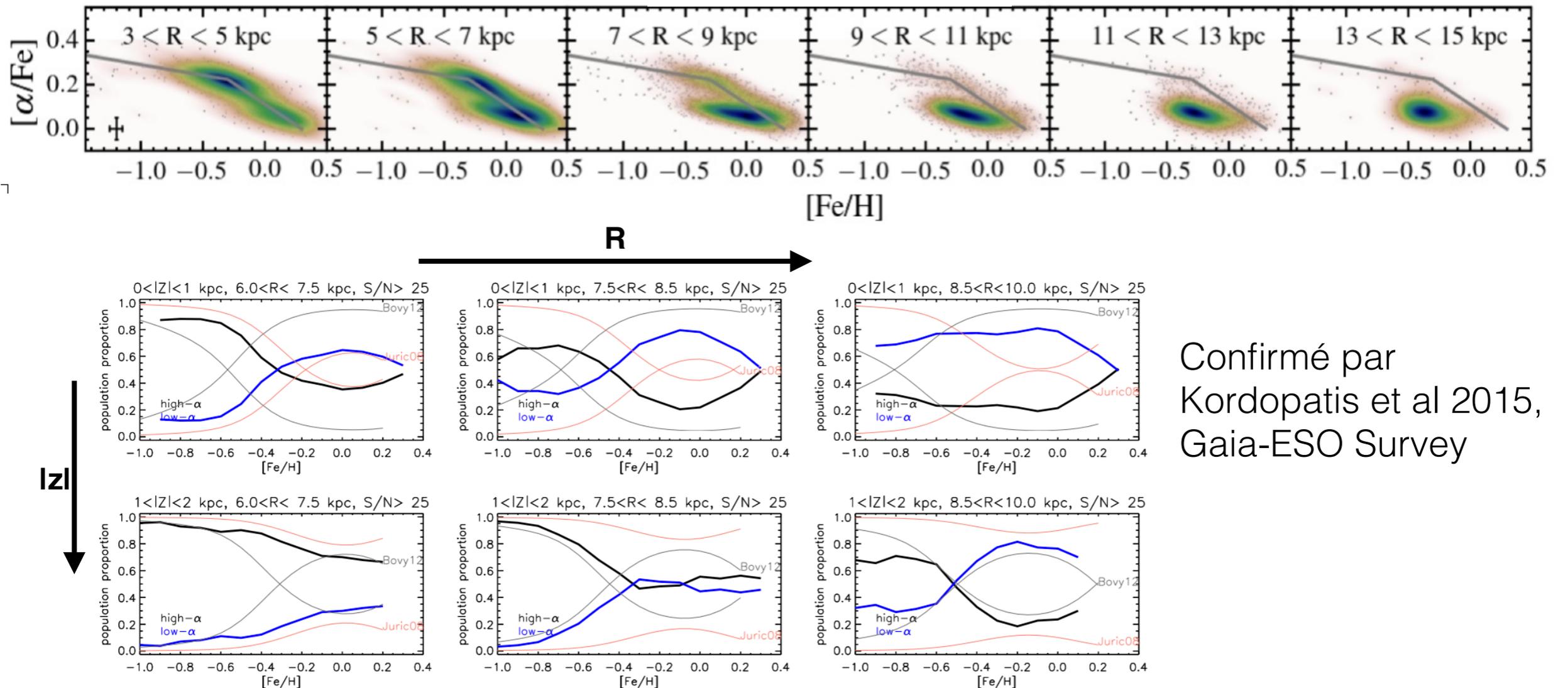


- la population stellaire du disque épais s'étend de 9 à 13 Gyr

Le disque épais

Où se situent ces 2 populations chimiquement séparées ?

Hayden et al 2015, APOGEE : le disque épais a une plus grande échelle de hauteur et une plus grande échelle de longueur \rightarrow composante massive (pour une même normalisation au voisinage solaire).



Confirmé par
Kordopatis et al 2015,
Gaia-ESO Survey

Fig. 14. Relative proportion of the high- α (in black) and low- α (in blue) populations as a function of $[\text{Fe}/\text{H}]$, for increasing Galactocentric radii (from left to right) and distances from the Galactic plane (upper panels: close to the plane, lower panels: far from the plane). Plain thick lines

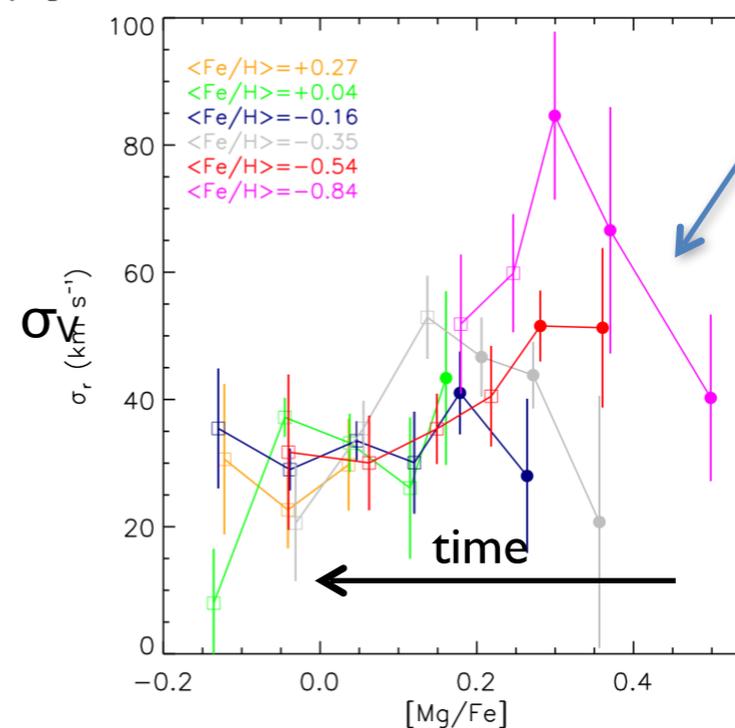
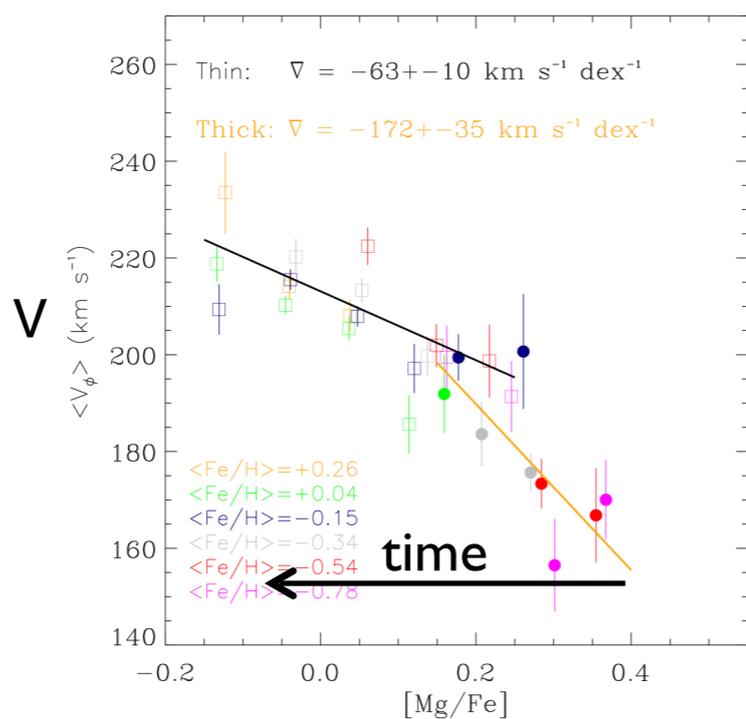
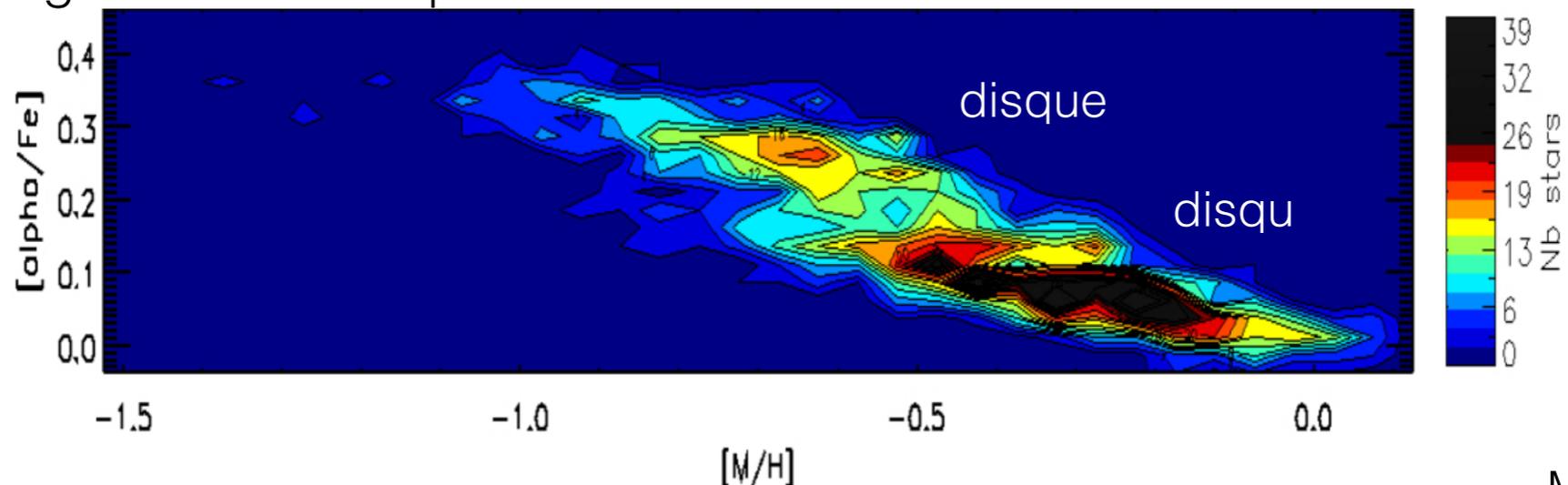
Le disque épais

Cinématique des 2 populations chimiquement séparées ?

Recio-Blanco et al 2014, Guiglion et al 2015 :

Gaia-ESO Survey : étude chemo-dynamique

- les étoiles se sont installées progressivement dans des couches de plus en plus fines
- la rotation augmente et la dispersion des vitesses diminue



Merger ?
Minchev 2013

Le disque épais

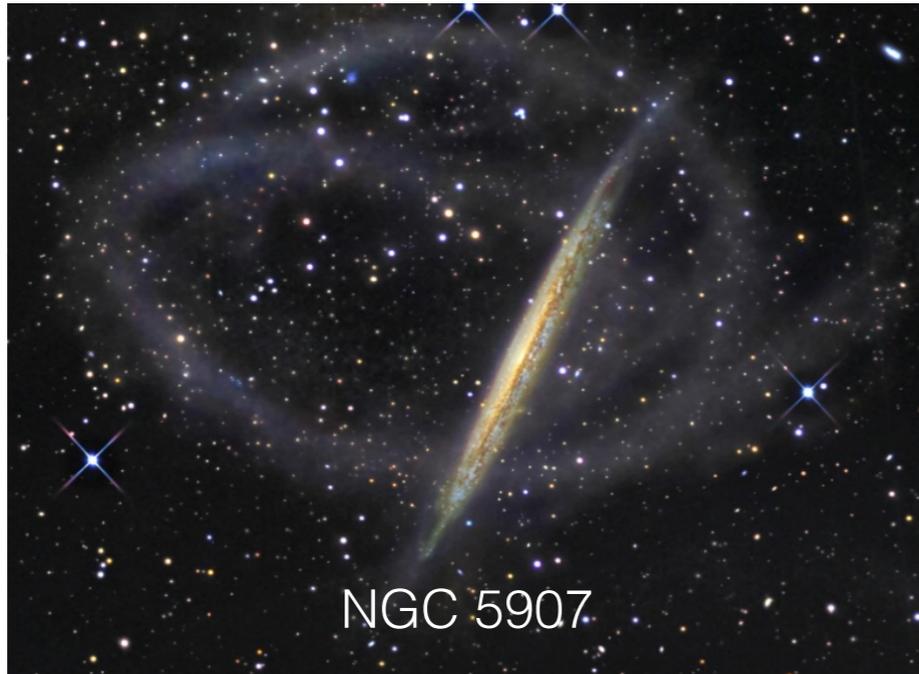
Etude la forme du disque épais en comparant les données photométriques 2MASS et SDSS avec le modèle de la Galaxie de Besançon (modèle de synthèse de population stellaire, Robin et al 2014)

Meilleur ajustement obtenu en considérant une formation du disque épais s'étendant entre 12 et 10 Gyr, avec une diminution de l'échelle de longueur de hauteur (850 à 300 pc) et de l'échelle de longueur (3 à 2 kpc) indiquant une contraction. Pas d'évasement.

→ résultats en faveur d'une formation du disque épais à grand z lorsque la turbulence du gaz est assez grande pour résister à l'effondrement gravitationnel en un disque mince (Bournaud et al 2009). Pendant cette période, le disque épais peut se contracter légèrement. L'absence d'évasement est en accord avec ce scénario (contrairement à la migration radiale ou l'échauffement du disque mince par des accrétions Minchev et al 2012; Roškar et al 2013).

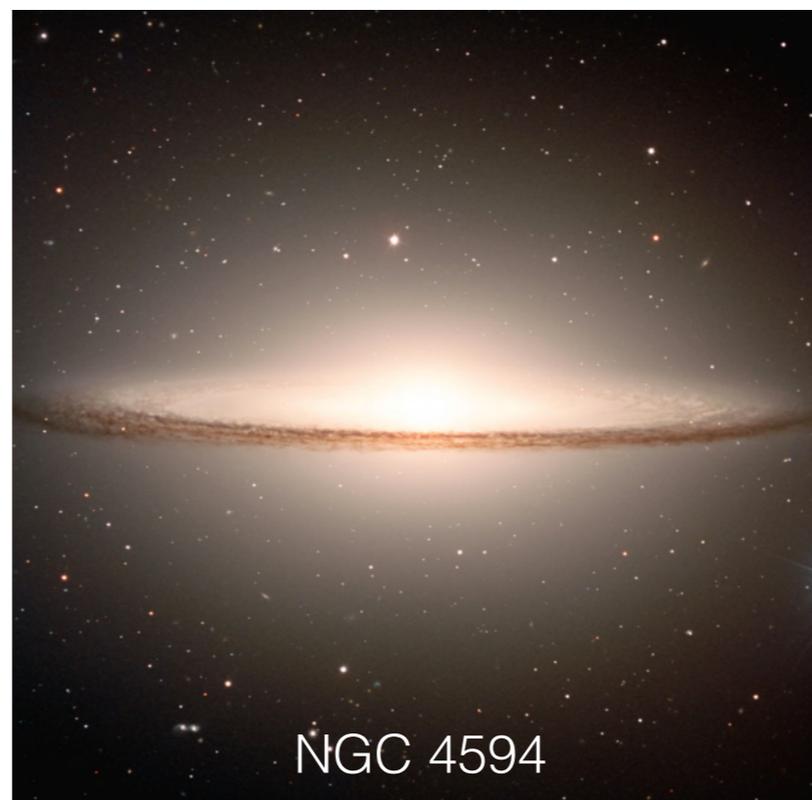
L'extrapolation du disque épais dans les régions centrales de la Galaxie explique bien les populations stellaires observées dans le bulbe (Schultheis et al 2016, APOGEE, Ness 2013 ARGOS, Vasquez et al 2013, Zoccali et al 2016, Di Matteo 2014, 2016).

Le bulbe



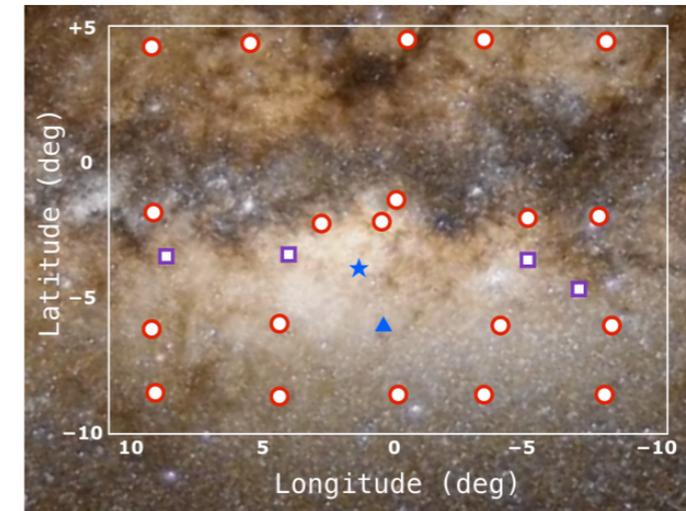
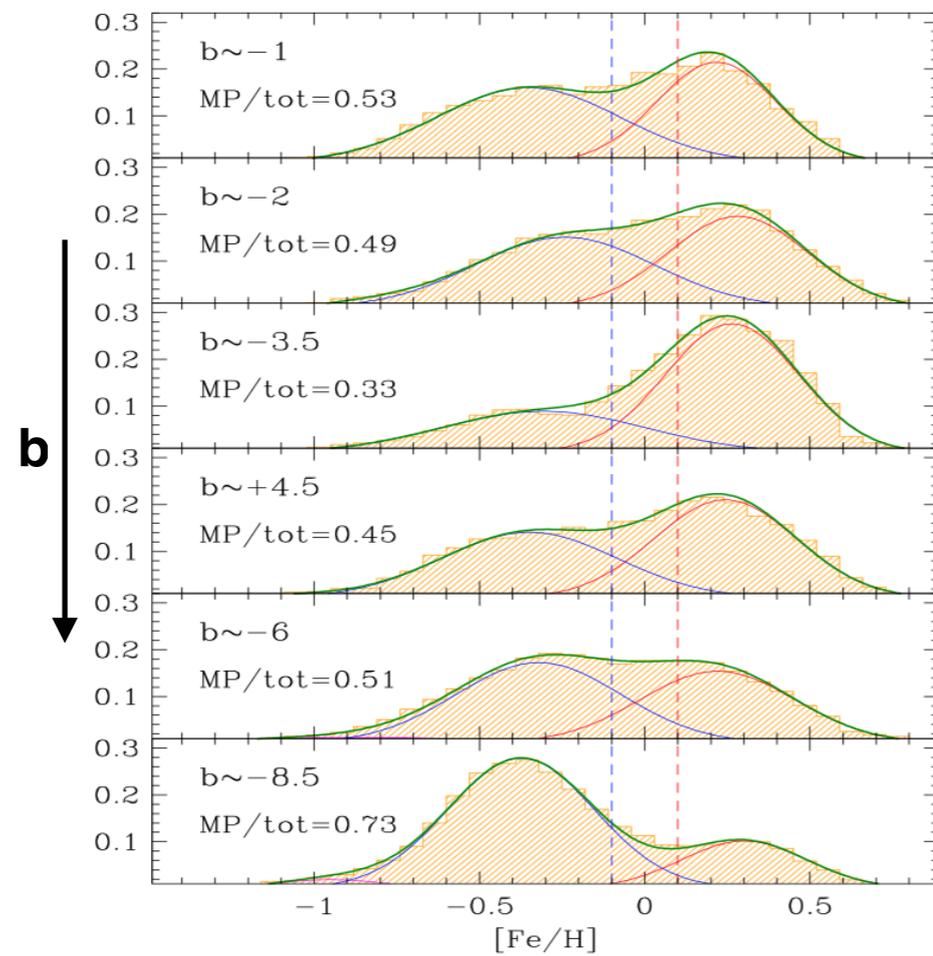
Certaines galaxies ont des bulbes sphéroïdaux, boxy, ou pas de bulbe (pas rare, Kormendy et al 2010)

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



Le bulbe

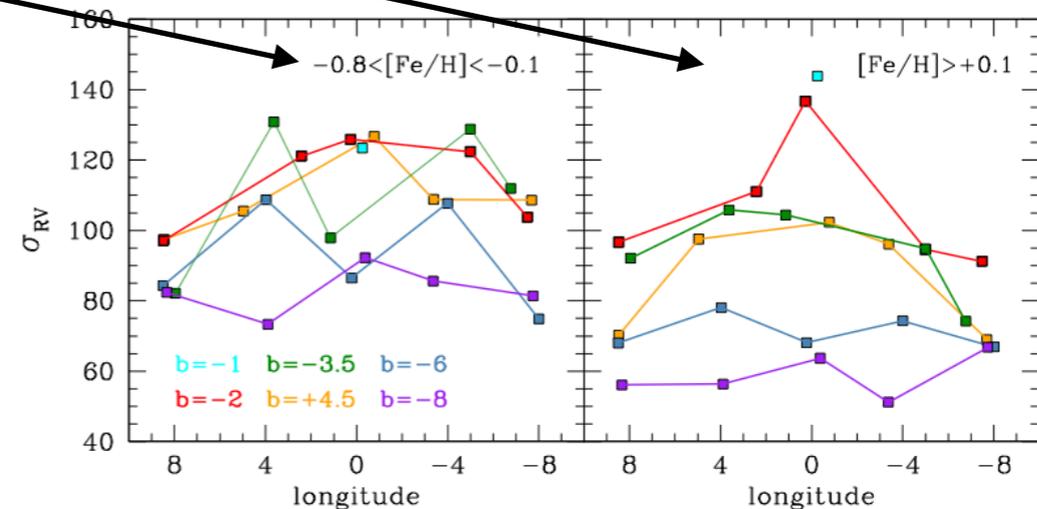
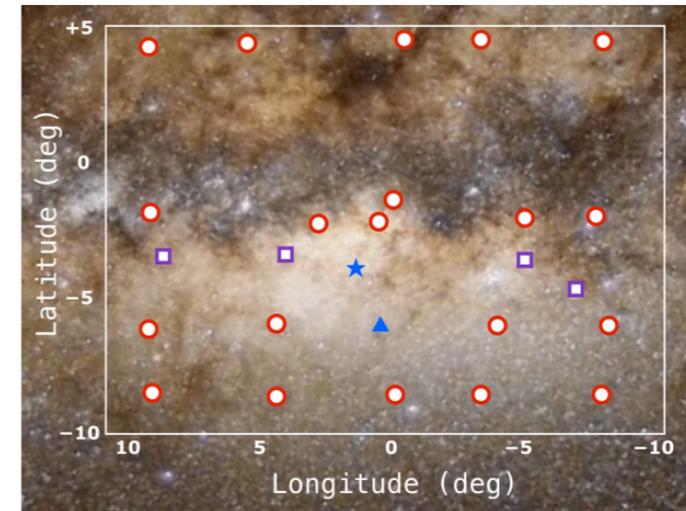
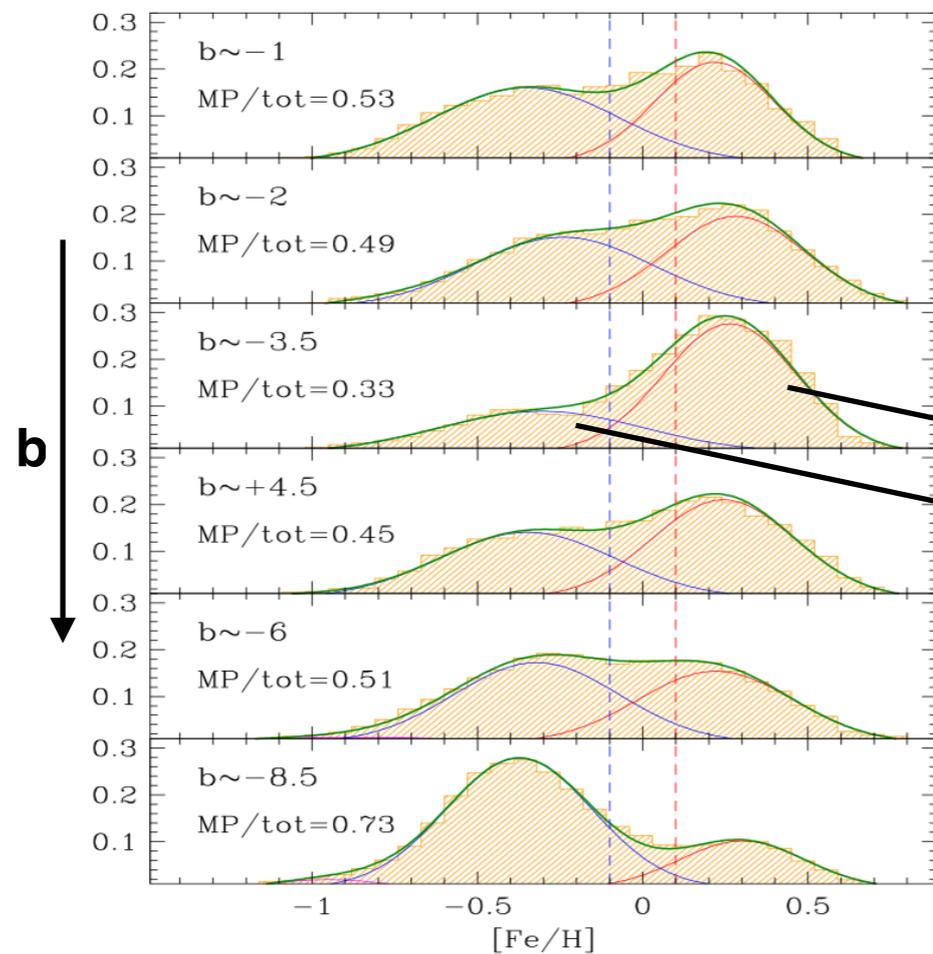
Superposition de deux populations dans la région du bulbe, confirmées (Rojas Arriagada et al. 2014, GES; Zoccali et al. 2016, GIBS)



GIBS : GIRAFFE Inner Bulge Survey
26 champs, Red Clump

Le bulbe

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

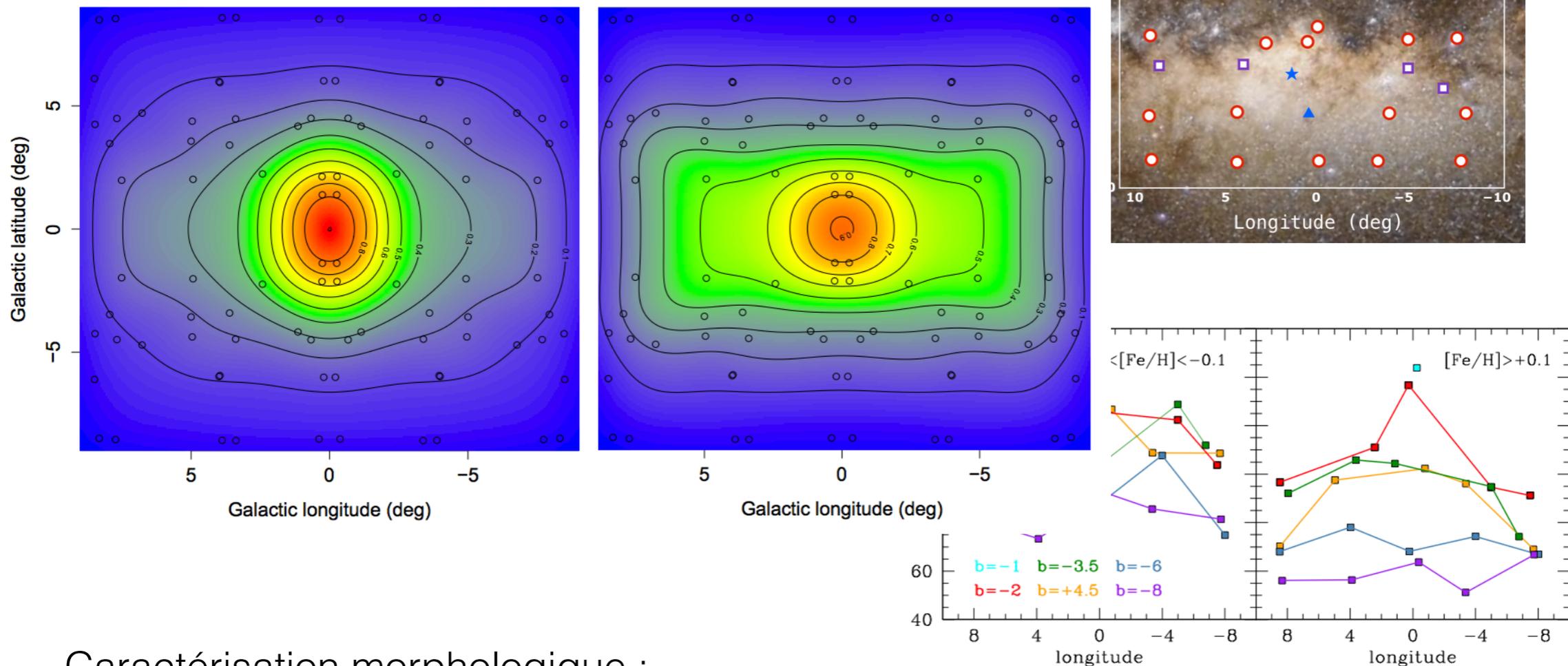


Caractérisation cinématique :

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

Le bulbe

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

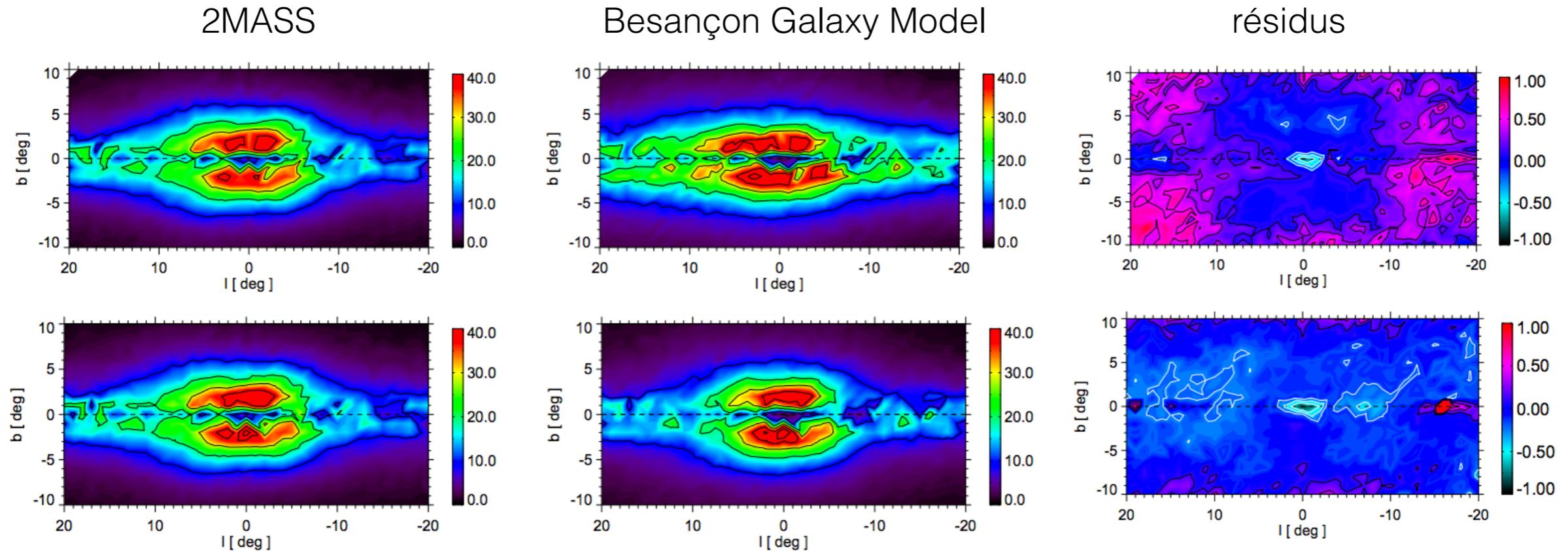


Caractérisation morphologique :

- MP plus concentrée, distribution spatiale plus sphéroïdale (Schultheis et al 2016, APOGEE)
- MR a une distribution boxy en accord avec une structure de type barre (Ness 2013 ARGOS, Vasquez et al 2013)

Le bulbe

Du côté des simulations



Meilleur ajustement des CMD avec 2 populations :

- boxy, âge ~ 8 Gyr, métallicité moyenne solaire
- sphéroïdale, métallicité moyenne -0.35 peut-être expliquée par la population du disque épais (Robin et al 2014)

Les simulations N-corps d'un bulbe boxy/X-shaped formé dans un disque mince sous l'influence d'une barre permettent d'interpréter la morphologie du bulbe mais pas ses caractéristiques chemo-dynamiques : contribution d'un bulbe classique limitée (Di Matteo et al 2014, 2016)

Le bulbe

GALCEN : relevé du bulbe interne avec APOGEE

Découverte d'une population d'étoiles sous-métalliques (pic à $[M/H] = -1.0$) dans la région centrale (Schultheis et al 2015)

Ce résultat pourrait indiquer un processus de formation d'un bulbe classique associé à un scénario rapide de formation (Babusiaux et al 2010)

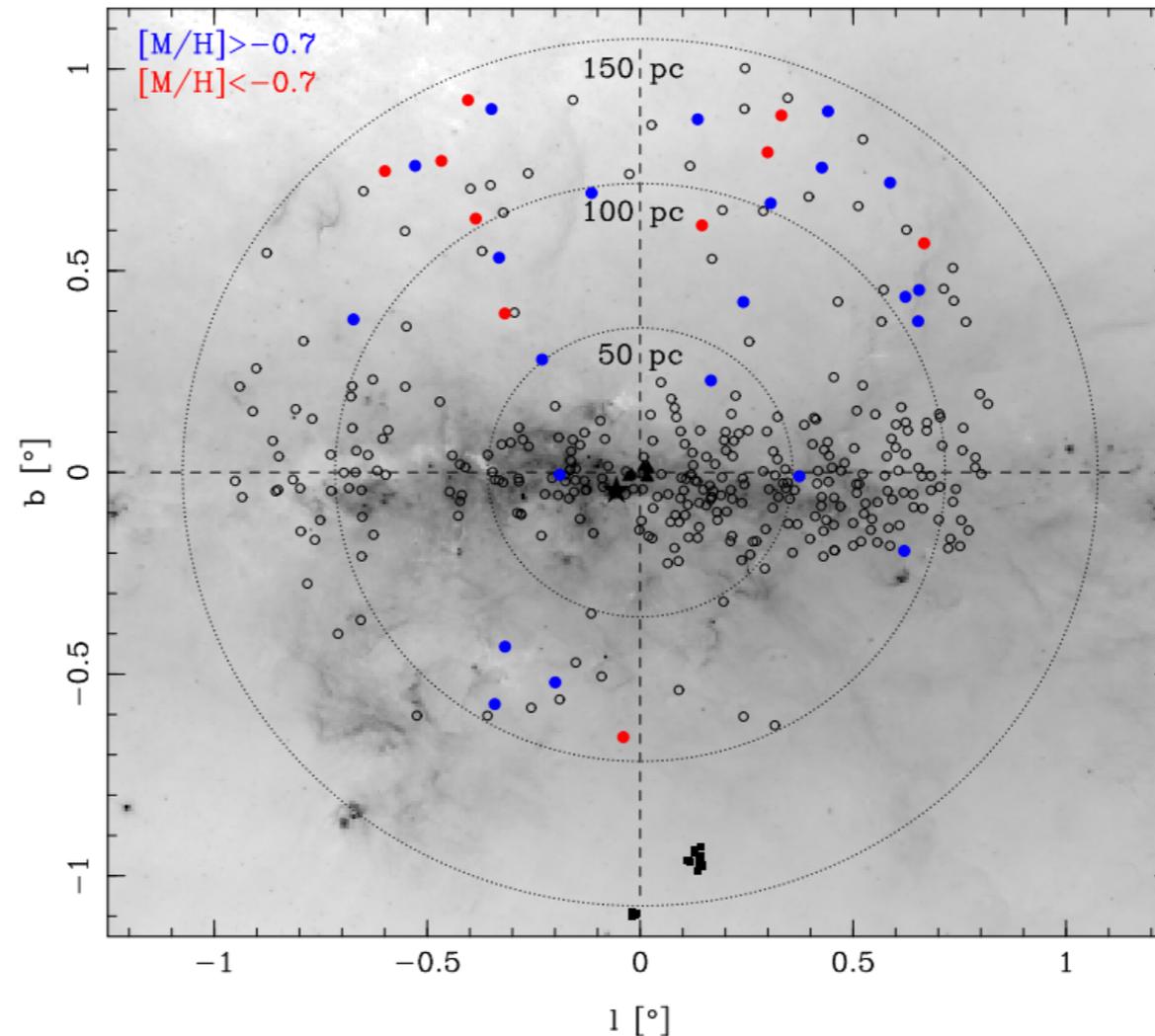


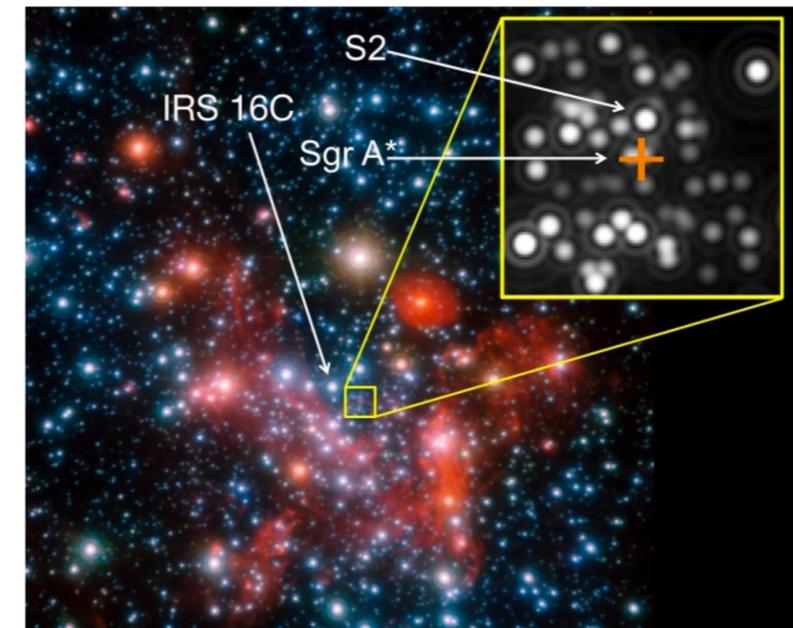
Fig. 1. Galactic longitude vs. Galactic latitude distribution of the GALCEN sample superimposed on the $8\mu\text{m}$ IRAC image of GLIMPSE-II (Churchwell et al. 2009). The red filled symbols indicate our selected sample with $[M/H] < -0.7$, the blue ones with $[M/H] > -0.7$ and the open black symbols the full GALCEN sample. Circles denote galactocentric radii of 50, 100,

Le centre galactique

Observation du trou noir supermassif Sgr A* au centre de la Galaxie avec l'imageur interférométrique GRAVITY.

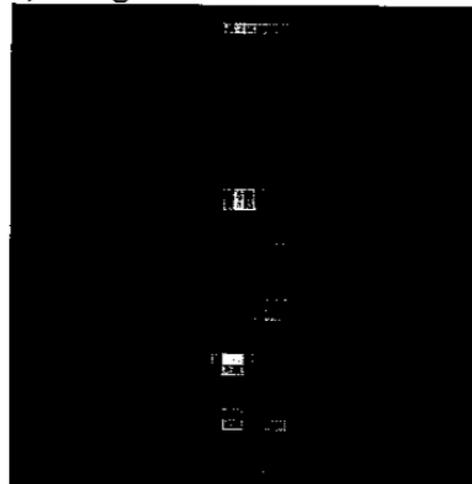
Mesure de visibilités et de phases sur l'étoile S2 (étoile connue la plus proche du trou noir).

→ détection de sursauts d'une part, étude de l'environnement proche (60 mas) de Sgr A*, étude de la nature de SgrA*.

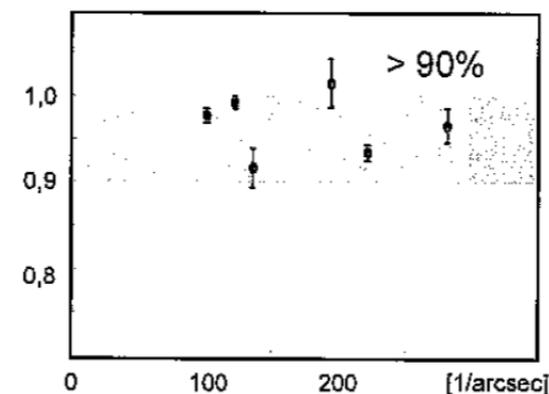


Le centre de la Voie Lactée - Image du centre galactique. Pour les observations interférométriques de GRAVITY, l'étoile IRS 16C a été utilisée comme étoile de référence, et la cible était l'étoile S2. La position du centre galactique, qui avoisine le trou noir (invisible) connu sous le nom de Sgr A*, avec 4 millions de masses solaires, est indiquée par la croix rouge. Crédit : ESO/MPPE/S. Gillessen et al.

a) Franges sur S2



b) Visibilités S2



c) Clôtures de phase IRS16C

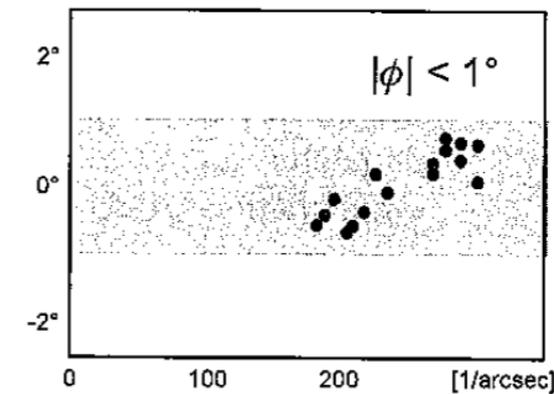


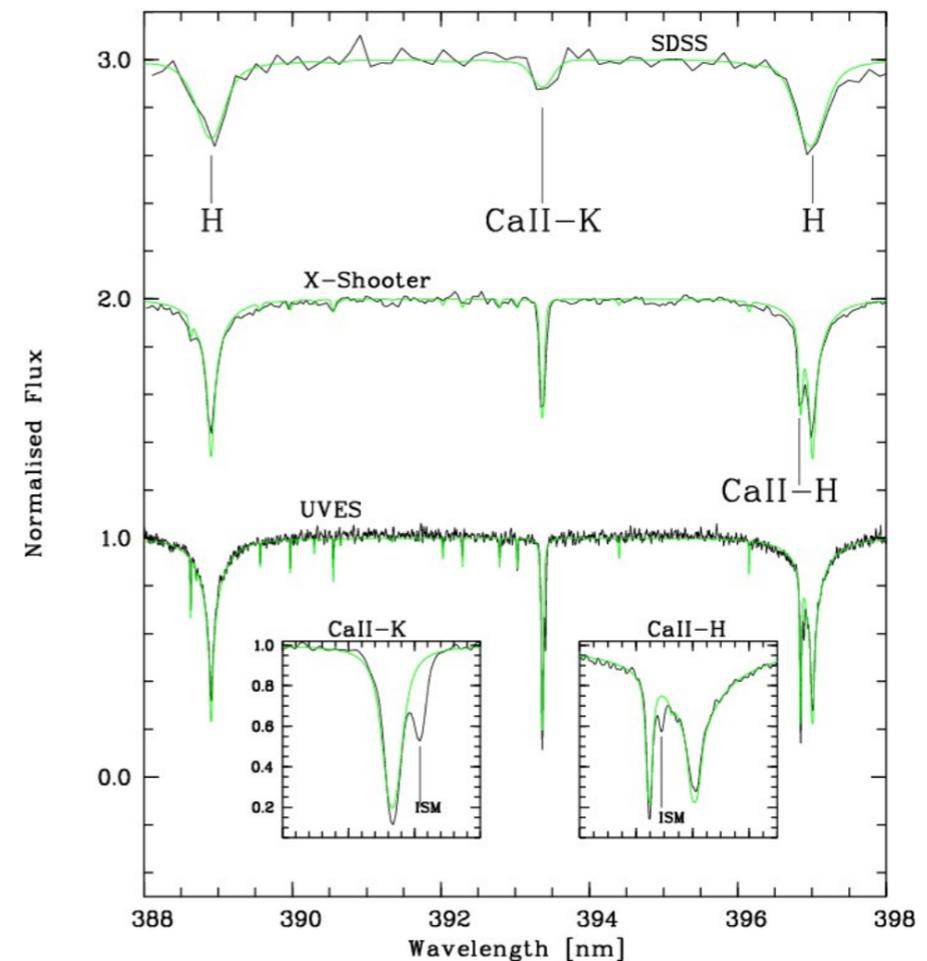
Figure 2 : résultats obtenus sur S2 et IRS16C au centre galactique. Figure de gauche : 9 canaux sur 24 des franges obtenues sur S2 (pose de 60s). Figure du centre : visibilités mesurées sur S2. Figure de droite : clôtures de phase mesurées sur IRS16C.

Premières étoiles

Les étoiles de très basse métallicité ont la mémoire de la composition chimique du MIS à l'époque de leur formation. Elles sont les descendantes des premières étoiles. Leur découverte, et étude, peut aider à mieux comprendre la nucléosynthèse durant les phases précoces de l'Univers.

Suivi spectroscopique ayant pour but de fournir des abondances détaillées de candidats dans des volumes de plus en plus grands.

- Large Programme TOPoS : suivi avec X-Shooter de 100 étoiles SDSS parmi les plus déficientes dans la Galaxie. Caffau et al. (2013), Bonifacio et al. (2015) : distribution bimodale de l'abondance du carbone dans les étoiles très déficientes en métaux.



SDSS J102915+172027 : $Z \leq 7.4 \times 10^{-7}$ (Caffau et al 2012)

Premières étoiles

- Relevé des étoiles de basse métallicité dans les galaxies naines du Groupe Local (UFDsph, Sculptor) : ces étoiles ont-elles les mêmes caractéristiques que les étoiles de la Galaxie, au même niveau de métallicité (François et al 2016, Skúladóttir et al 2015, Jablonka et al 2015).

Perspectives relevé Pristine et Luau (CFHT).

Observation avec un filtre étroit en Ca H&K et suivi spectroscopique, complément bande u de SDSS. Ces relevés permettront d'avoir un échantillon statistiques d'étoiles sous-métalliques (plusieurs dizaines avec $[Fe/H] < -4.0$ et plusieurs milliers avec $[Fe/H] < -3$).

→ Recherche de résidus d'épisodes d'accrétion, formation stellaire à l'époque de la réionisation, détection de sous-structures dans le halo (notamment à l'aide des données Gaia).

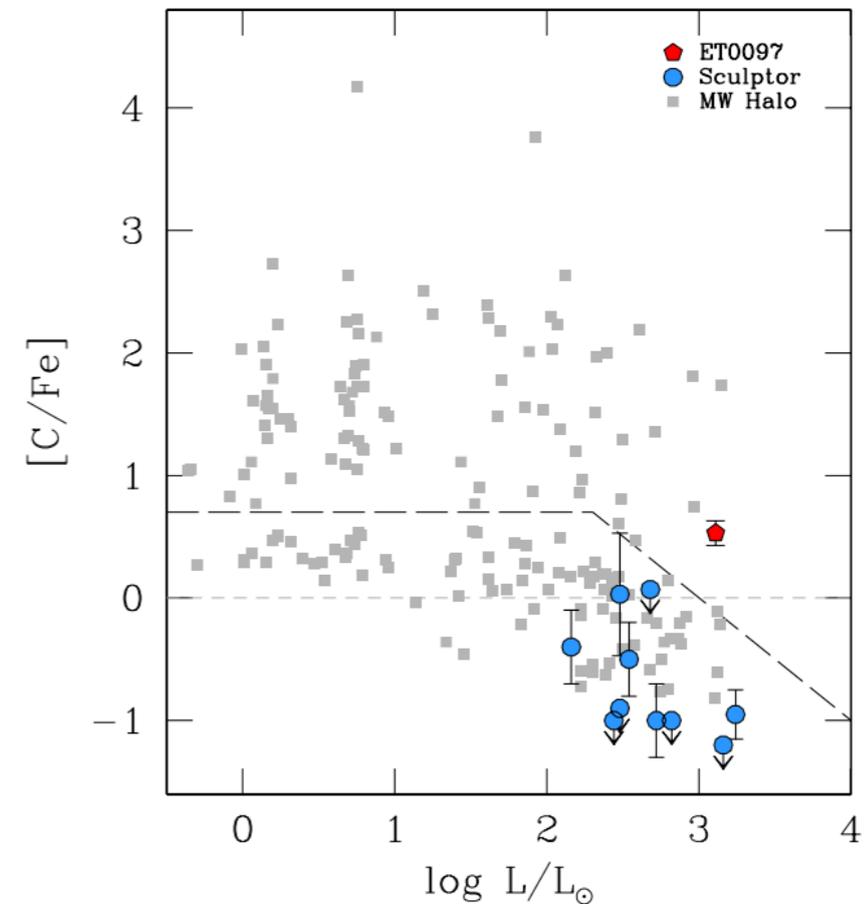


Fig. 5. Carbon in Sculptor and the Galactic halo as a function of luminosity. Dashed line shows the definition of CEMP stars as proposed by Aoki et al. (2007), to account for the mixing in stars at higher luminosities. Halo stars (gray squares) come from Yong et al. (2013), and Sculptor stars (blue circles) from: Tafelmeyer et al. (2010); Frebel et al. (2010); Kirby & Cohen (2012); Starkenburg et al. (2013).

Skúladóttir et al 2015

Amas globulaires dans l'amas de Virgo

Les amas globulaires sont depuis toujours des cibles de référence pour valider notre compréhension des populations stellaires vieilles. Leur formation a commencé à des époques proches de la réionisation pour les plus anciens et s'est poursuivie jusqu'à une époque assez mal déterminée. Leur lien avec le processus hiérarchique de formation des galaxies n'est pas compris : se sont-ils formés tels quels dans le halo de leur galaxie hôte actuelle ? Ou sont-ils les restes de galaxies naines dont les parties externes auraient été dispersées ? ...

Le lieu des amas dans l'espace couleur-couleur est extrêmement bien défini, et représente une contrainte nouvelle très forte sur les modèles d'évolution spectrophotométrique des populations stellaires, et in fine sur la nature de ces amas.

Modèle de synthèse de populations stellaires (Pégase)
Bibliothèque spectrale XSL (X-shooter Spectral Library),
bibliothèque empirique (de l'UV proche à l'infrarouge proche)

→ les prédictions avec des modèles de synthèse ne reproduisent pas les observations, probablement dû aux bibliothèques stellaires (Powalka et al, 2016, Lançon et al 2016, Gonneau et al 2016)

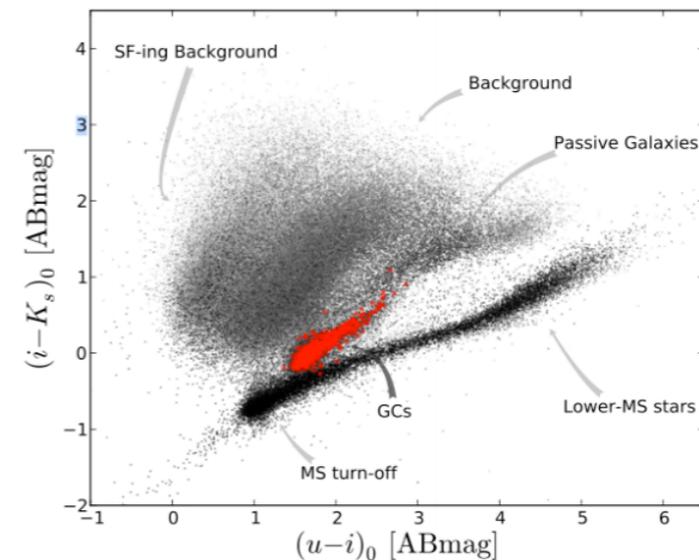
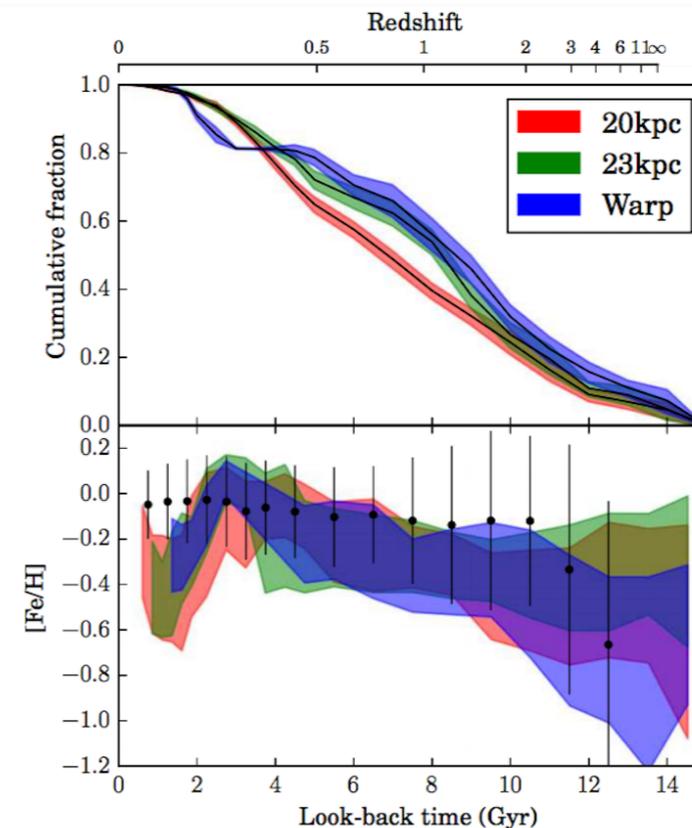
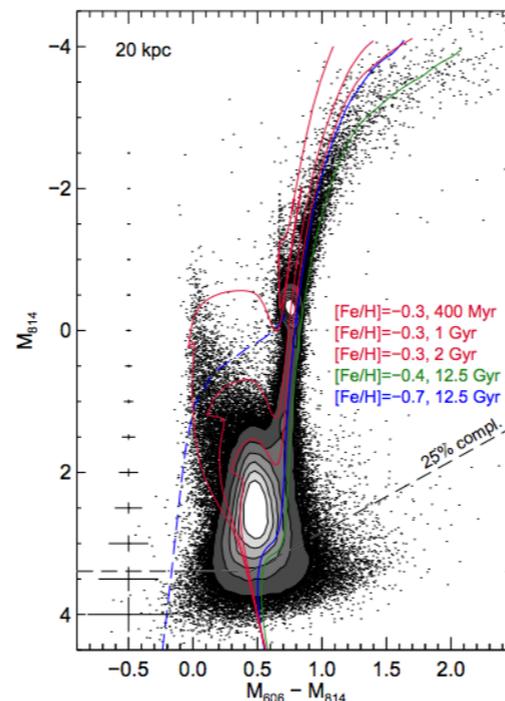
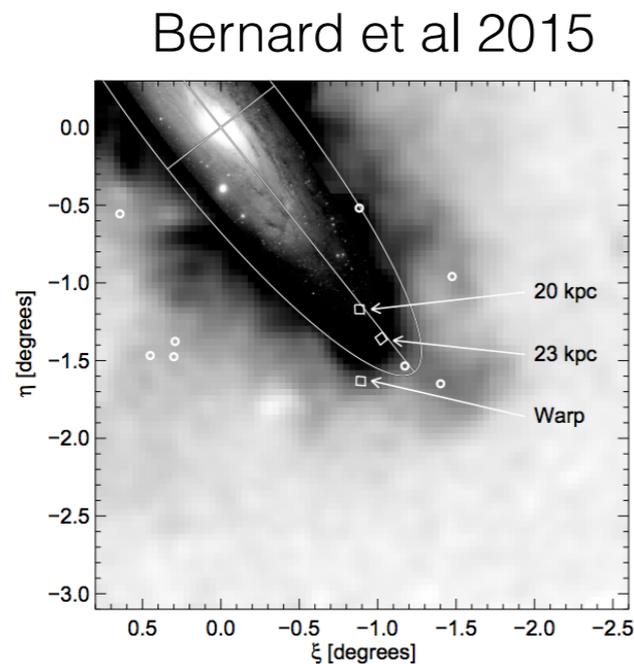


Diagramme couleur-couleur obtenu avec NGVS (Muñoz et al 2014).
En rouge : amas confirmés par la spectroscopie

Le disque mince de M31

Observations HST dans le disque externe de M31 et étude des CMDs jusqu'au plus vieilles étoiles au turn-off (~ 13 Gyr) pour contraindre la variation radiale de l'histoire de formation stellaire.

- pas d'évidence de croissance « inside-out »
- la moitié de la masse s'est formée avant $z \sim 1$, montrant que le disque externe était en place avec une formation stellaire active à grand redshift (peu d'effet de la rétro-action stellaire et de la migration radiale)
- la relation âge-métallicité augmente de $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.4$ à solaire entre 3 et 10 Gyr (contrairement à la relation plate dans la Voie Lactée)



Perspectives

Gaia, Gaia, et Gaia... Un avant goût...

Les modèles de formation hiérarchique prédisent qu'une partie du halo stellaire est formée par des accrétions. Recherche d'empreintes de l'accrétion de satellites sous la forme de « moving groups » au voisinage du Soleil.

Helmi et al 2016 (DR1/TGAS et RAVE) : détection de sous structures et caractérisation de leur cinématique.

Confrontation avec des modèles cosmologiques (voir aussi Jean-Baptiste et al 2016)

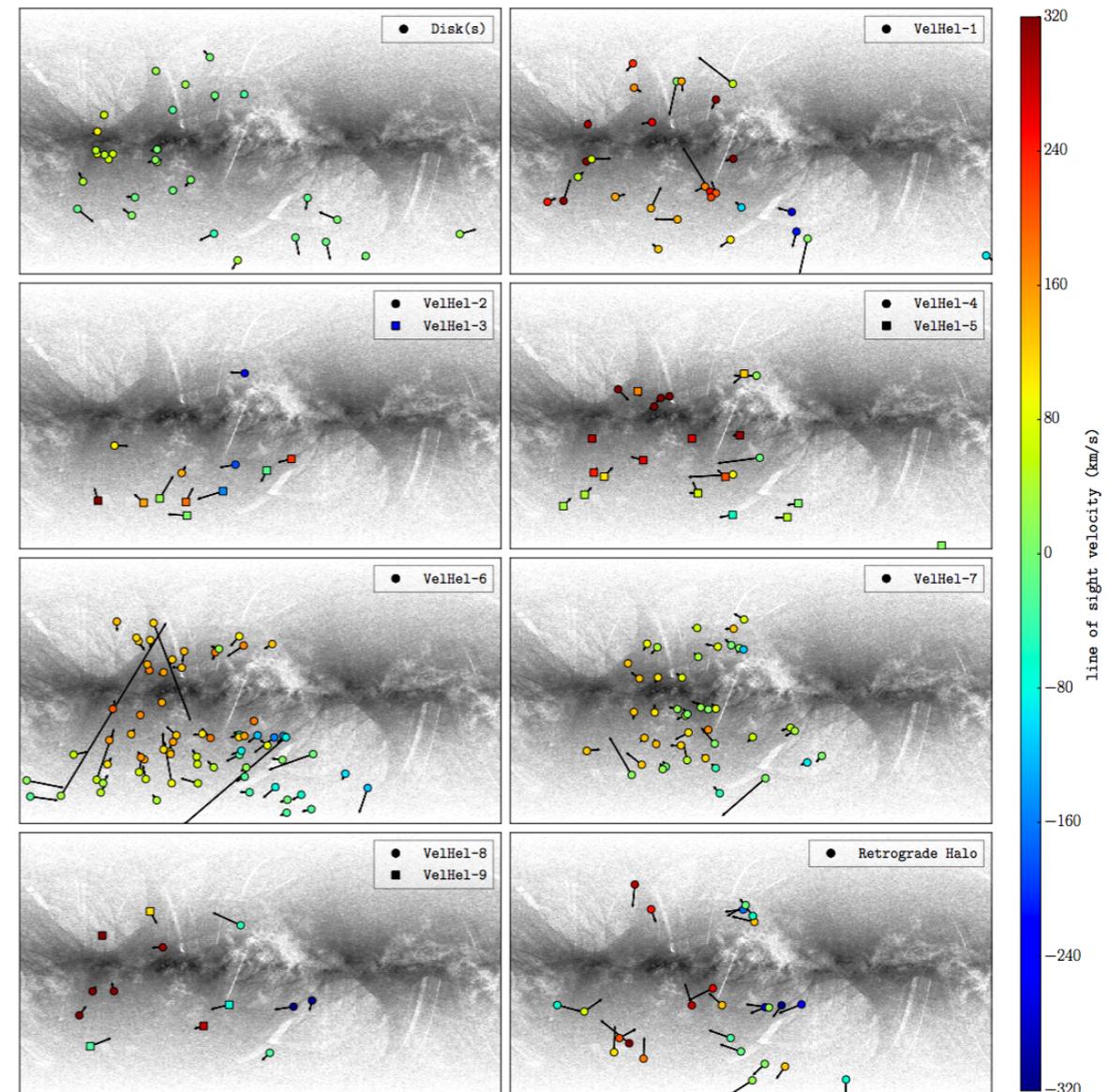
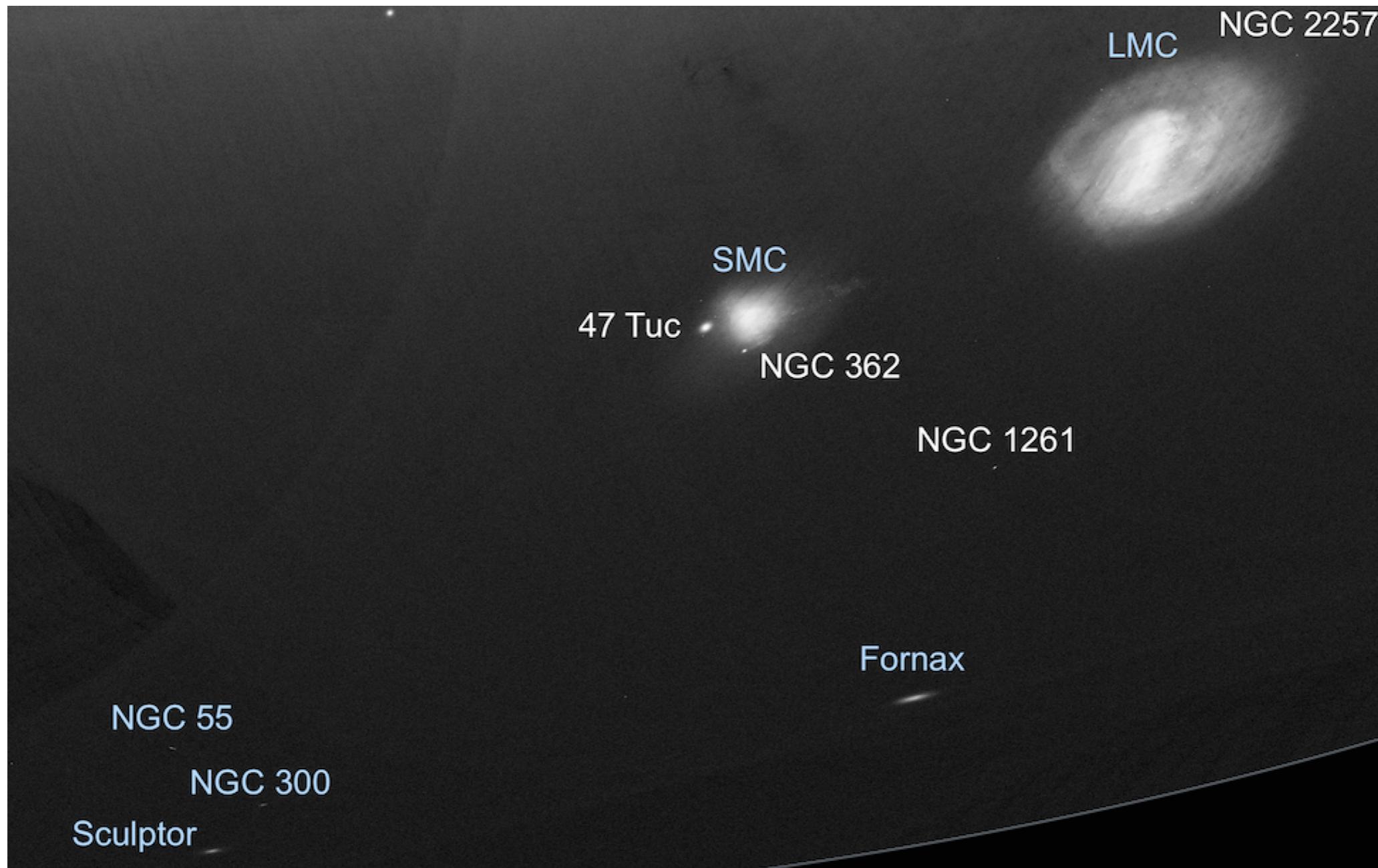


Fig. 12. Sky distribution in Galactic coordinates (l, b) of the stars in the structures identified in Sec. 3.4.2. The arrows indicate their velocities in the Galactic latitude and longitude, while the colour corresponds to their line-of-sight velocities. In the background, the stars from the full TGAS release are shown.

Perspectives

Gaia, Gaia, et Gaia... Un avant goût...

Rotation des nuages de Magellan (DR1, TGAS) (R. Van Der Marel, 2016)

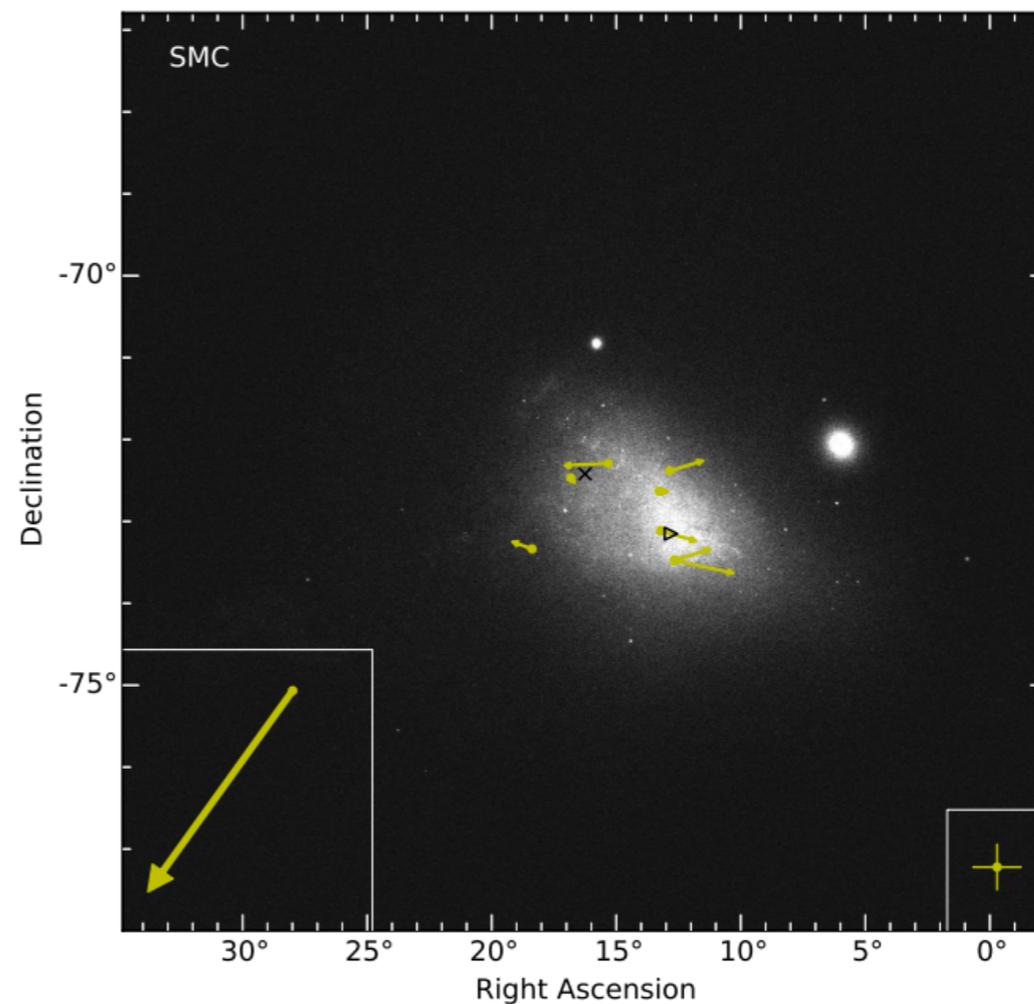
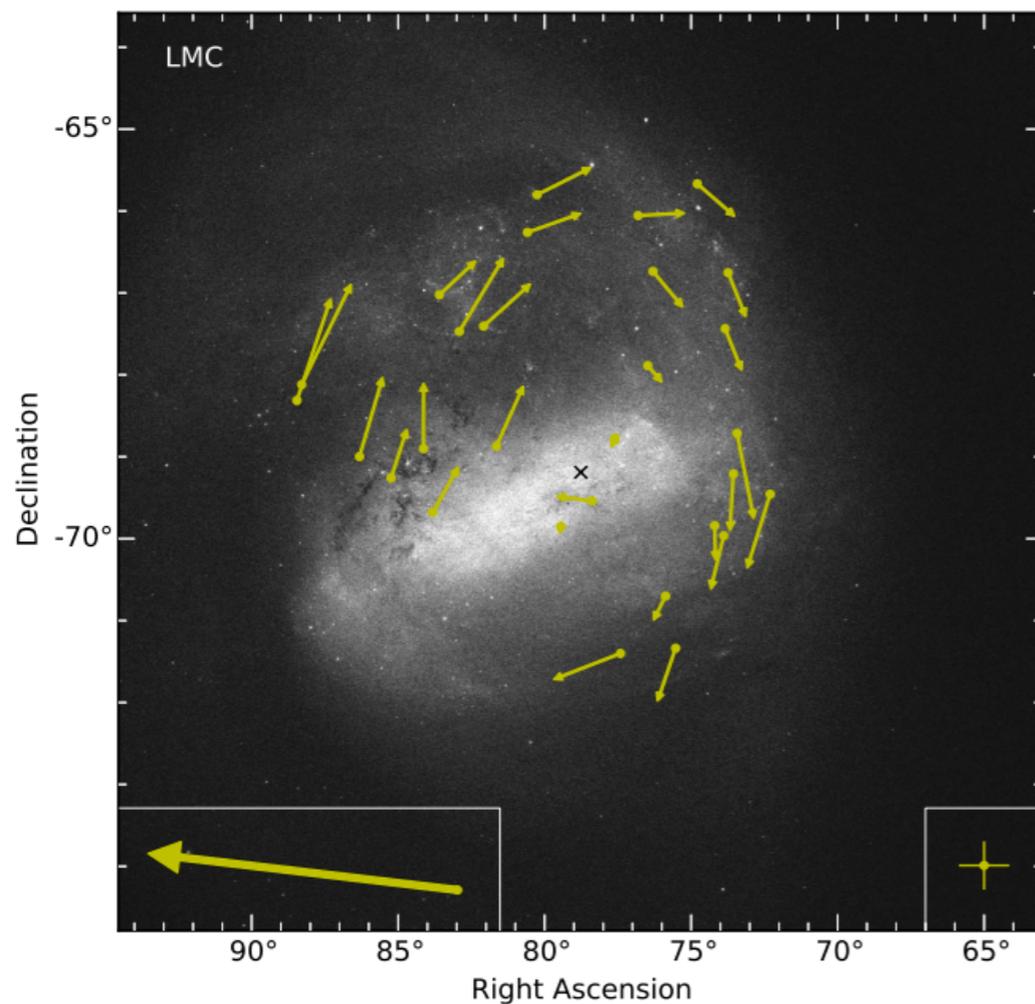


Perspectives

Gaia, Gaia, et Gaia... Un avant goût...

Rotation des nuages de Magellan (DR1, TGAS) (R. Van Der Marel, 2016)

- 29 supergéantes dans le LMC et 8 dans le SMC
 - mouvement du centre de masse comparable avec les HST PPM
- détection de la rotation interne



Perspectives

Environnement idéal, très riche, pour l'archéologie galactique

Suivis au sol spectroscopiques : 4MOST et WEAVE (BAO QSO), MOONS, MSE (chimie et à la dynamique de l'univers local et lointain)

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

Géantes sont de nouvelles horloges cosmiques

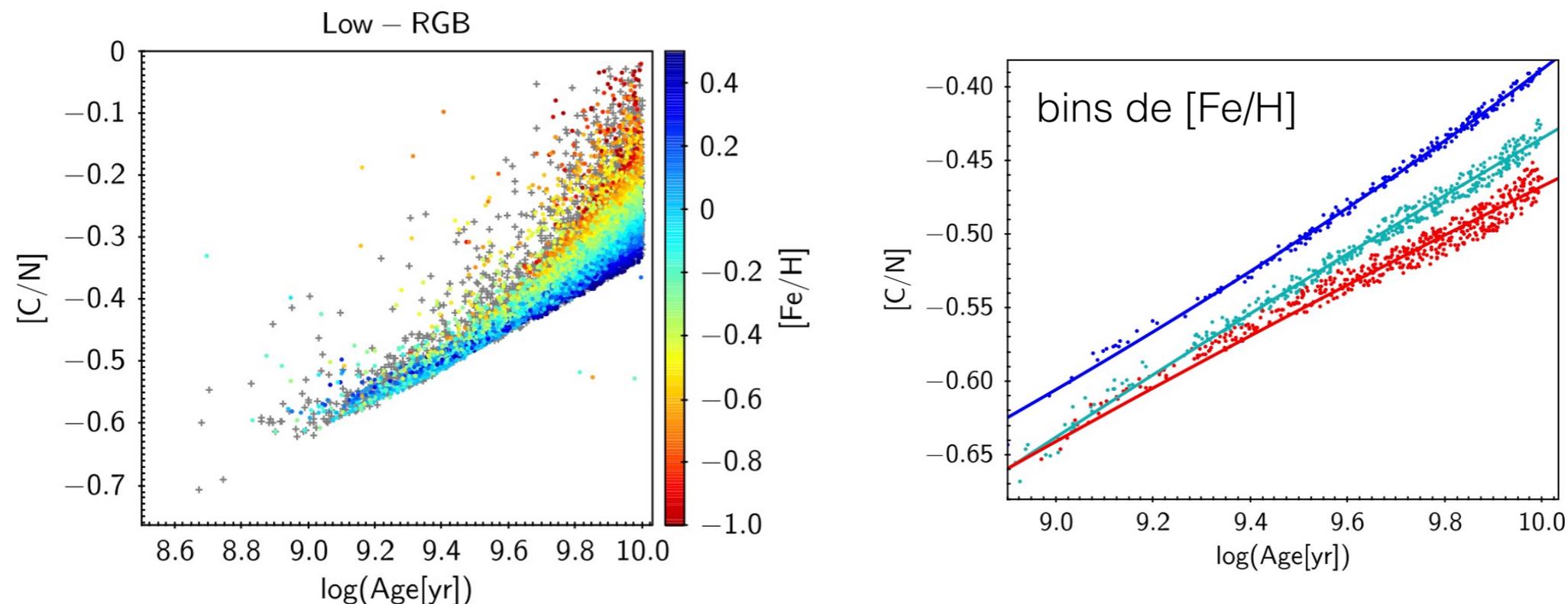
- données spectroscopiques -> paramètres stellaires dans un grand volume
 - astérosismologie (Corot, Kepler, K2, PLATO) -> rayon, donc âge des géantes
- permettent de tracer l'évolution chimique des populations stellaires

Perspectives

Environnement idéal pour l'archéologie galactique

Suivis au sol spectroscopiques : WEAVE et 4MOST (BAO), MSE (chimie et à la dynamique de l'univers local et lointain)

Grands relevés photométriques au sol (cartographie de la métallicité à grande échelle, populations stellaires) : CFIS/Luau, LSST, Euclid



Lagarde, priv. comm. simulation avec le modèle de la Galaxie de Besançon