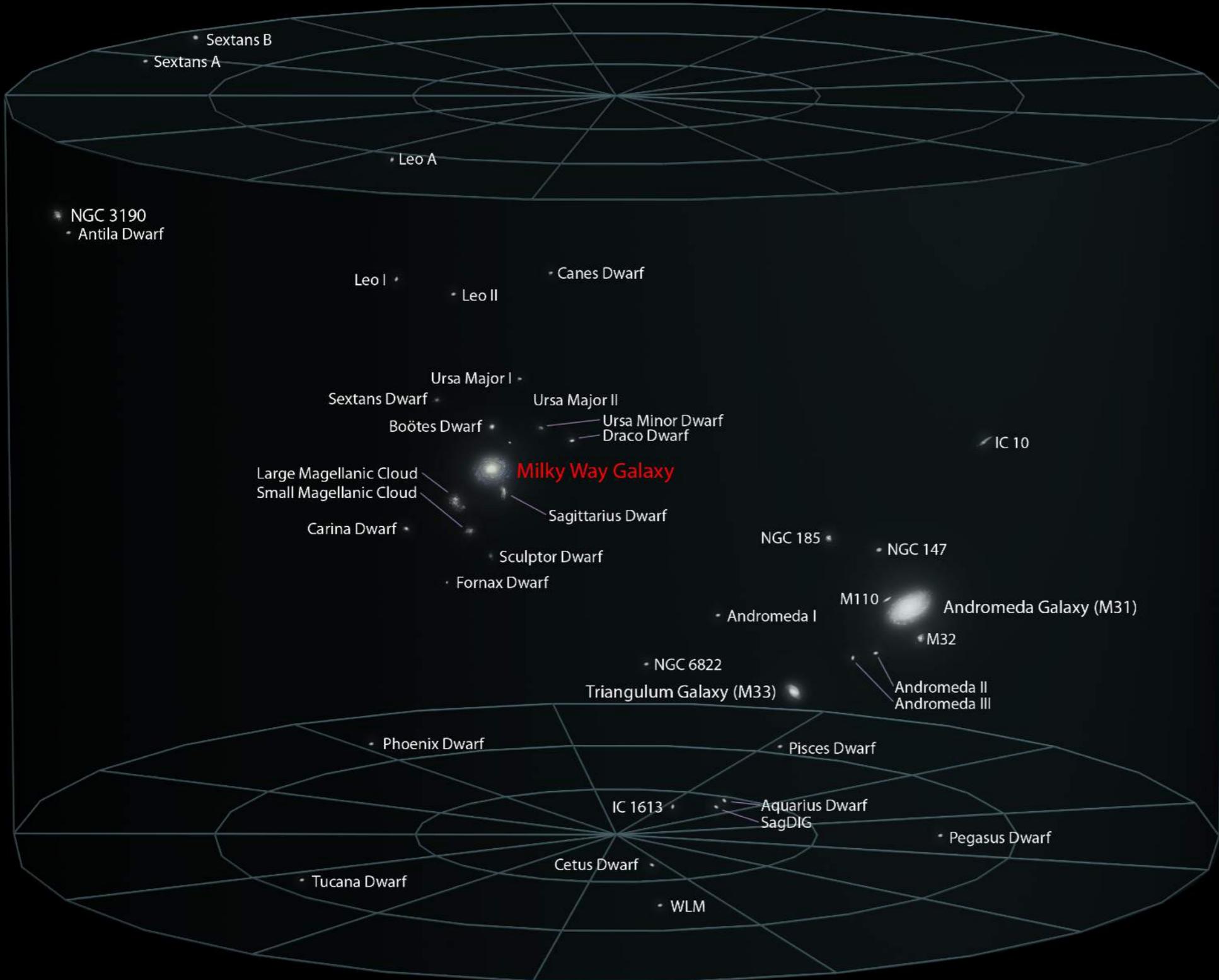


# INTERACTIONS ET FUSIONS DE GALAXIES : À LA RECHERCHE DU PASSÉ DE LA VOIE LACTÉE

PAOLA DI MATTEO  
OBSERVATOIRE DE PARIS



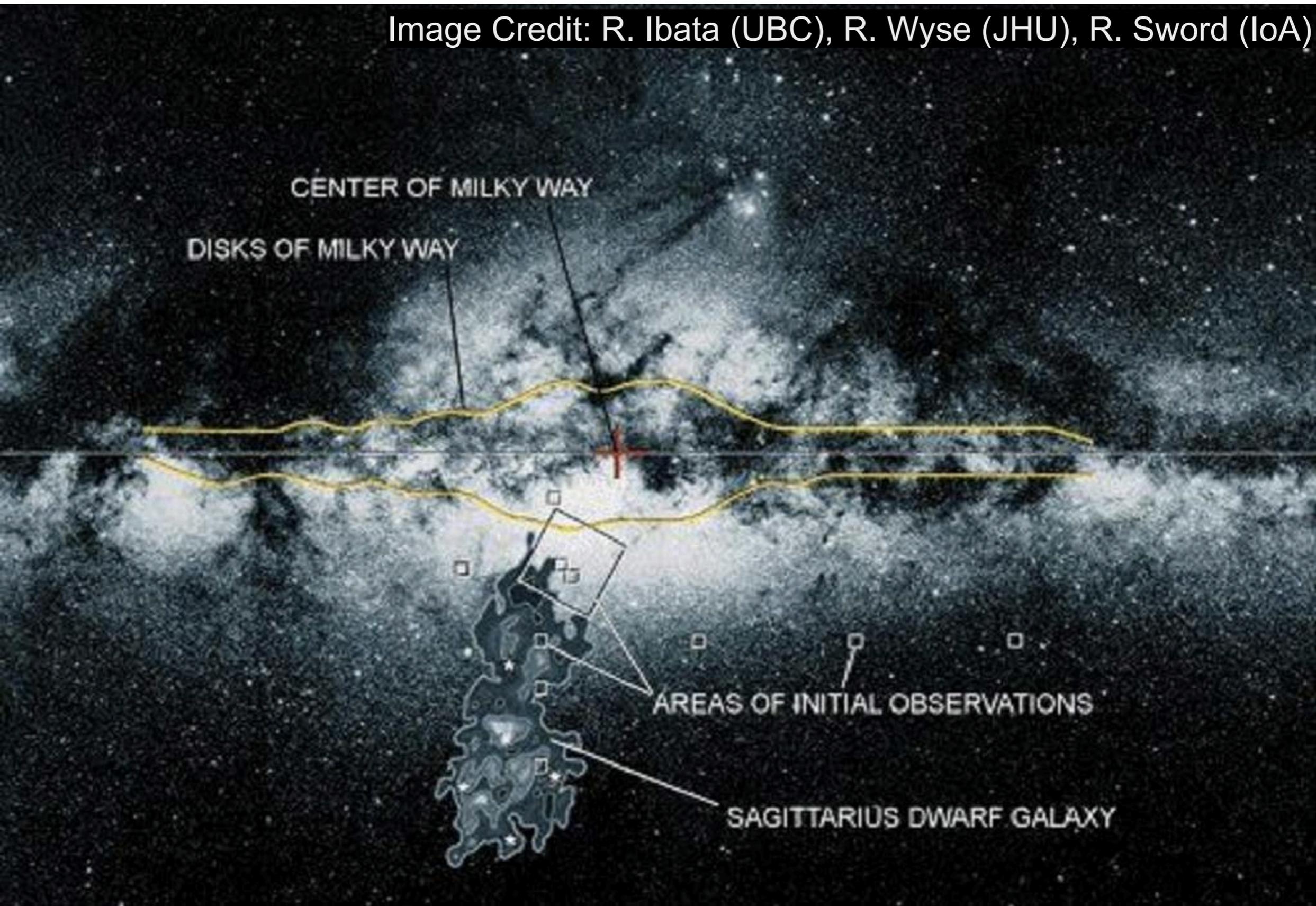
# Groupe Local





# INTERACTIONS EN COURS : LA GALAXIE DU SAGITTAIRE

Image Credit: R. Ibata (UBC), R. Wyse (JHU), R. Sword (IoA)



# LA GALAXIE DU SAGITTAIRE

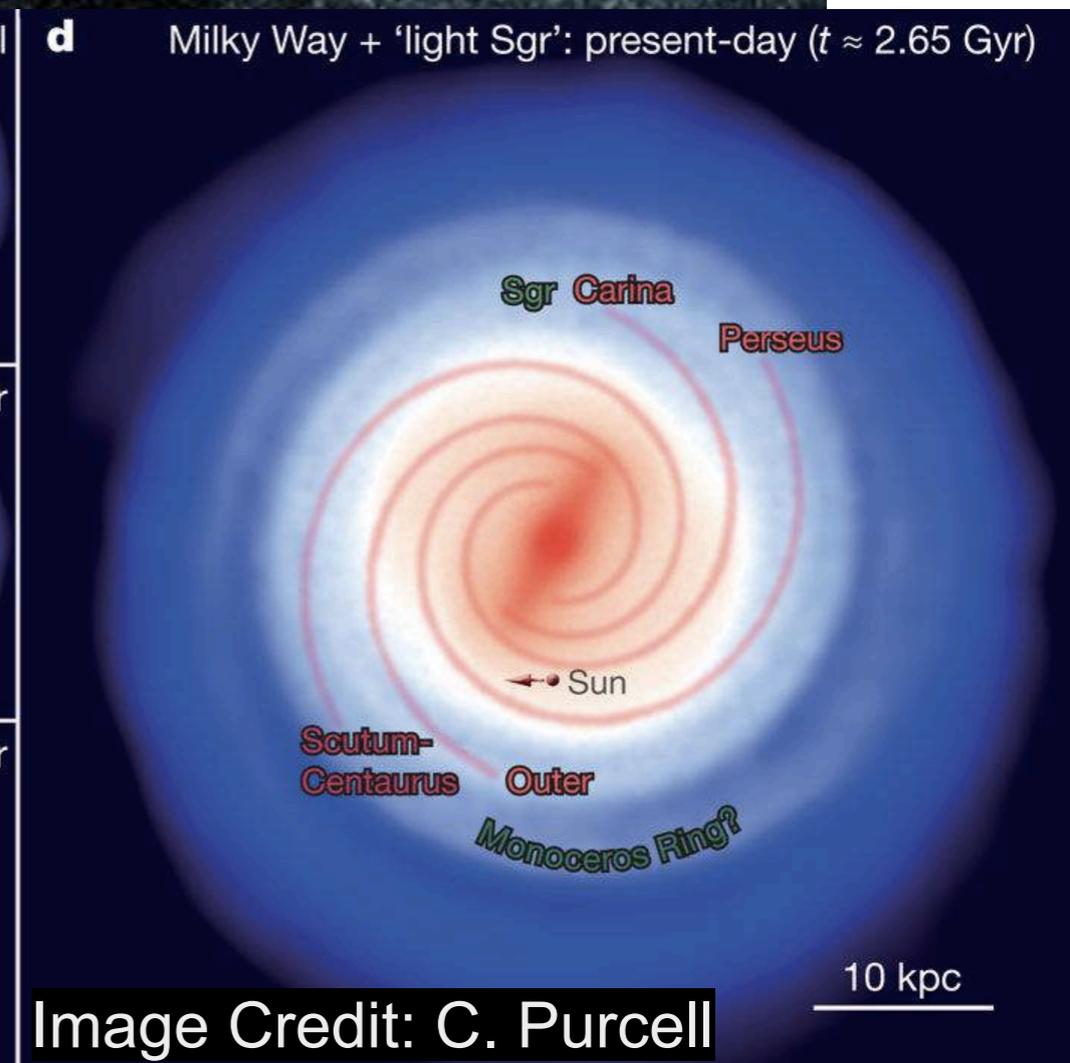
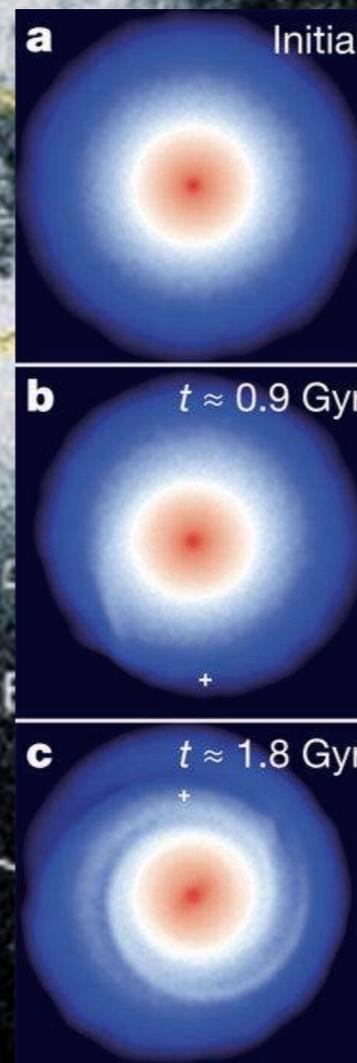
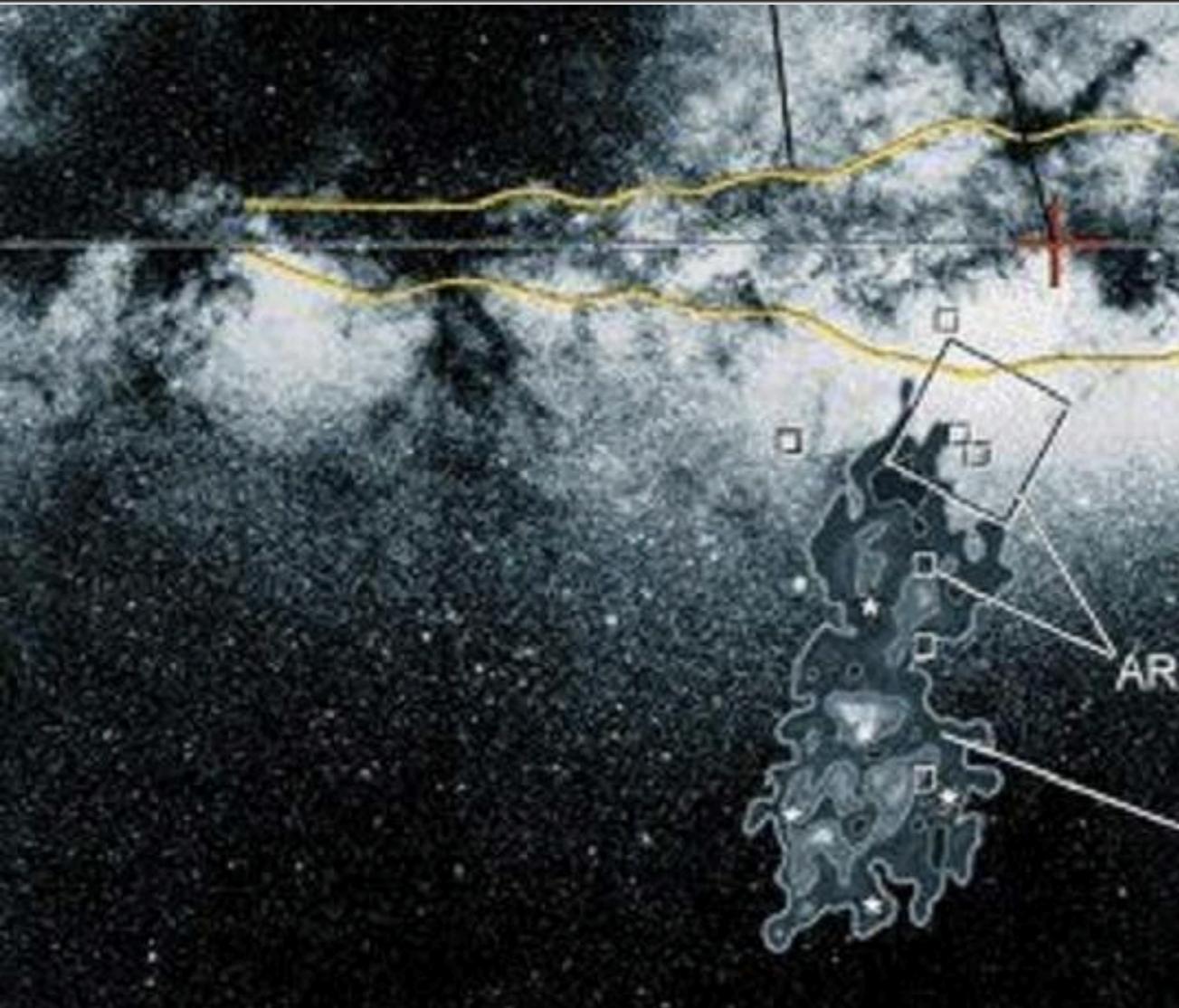
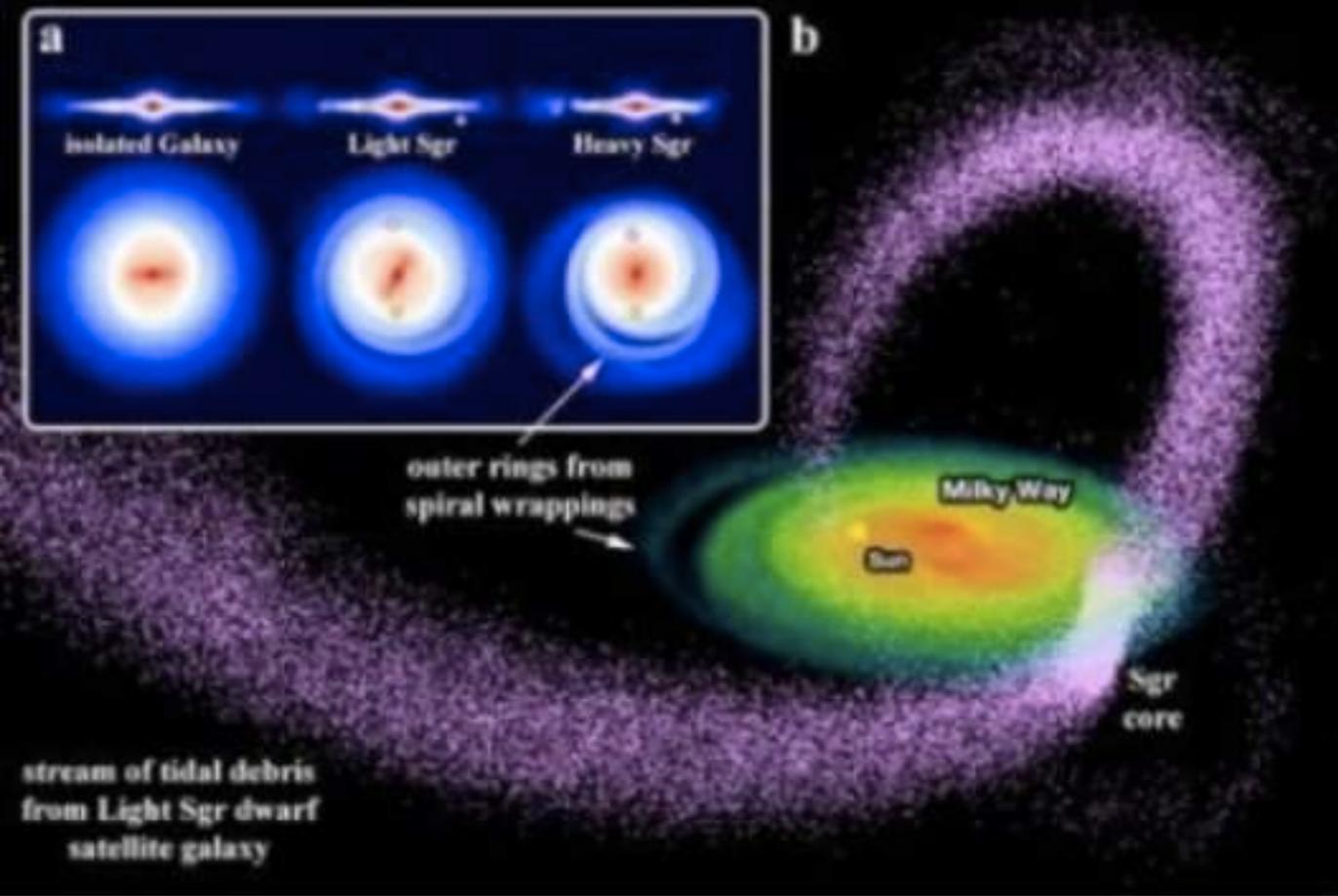


Image Credit: C. Purcell

# INTERACTIONS EN COURS : LES NUAGES DE MAGELLAN

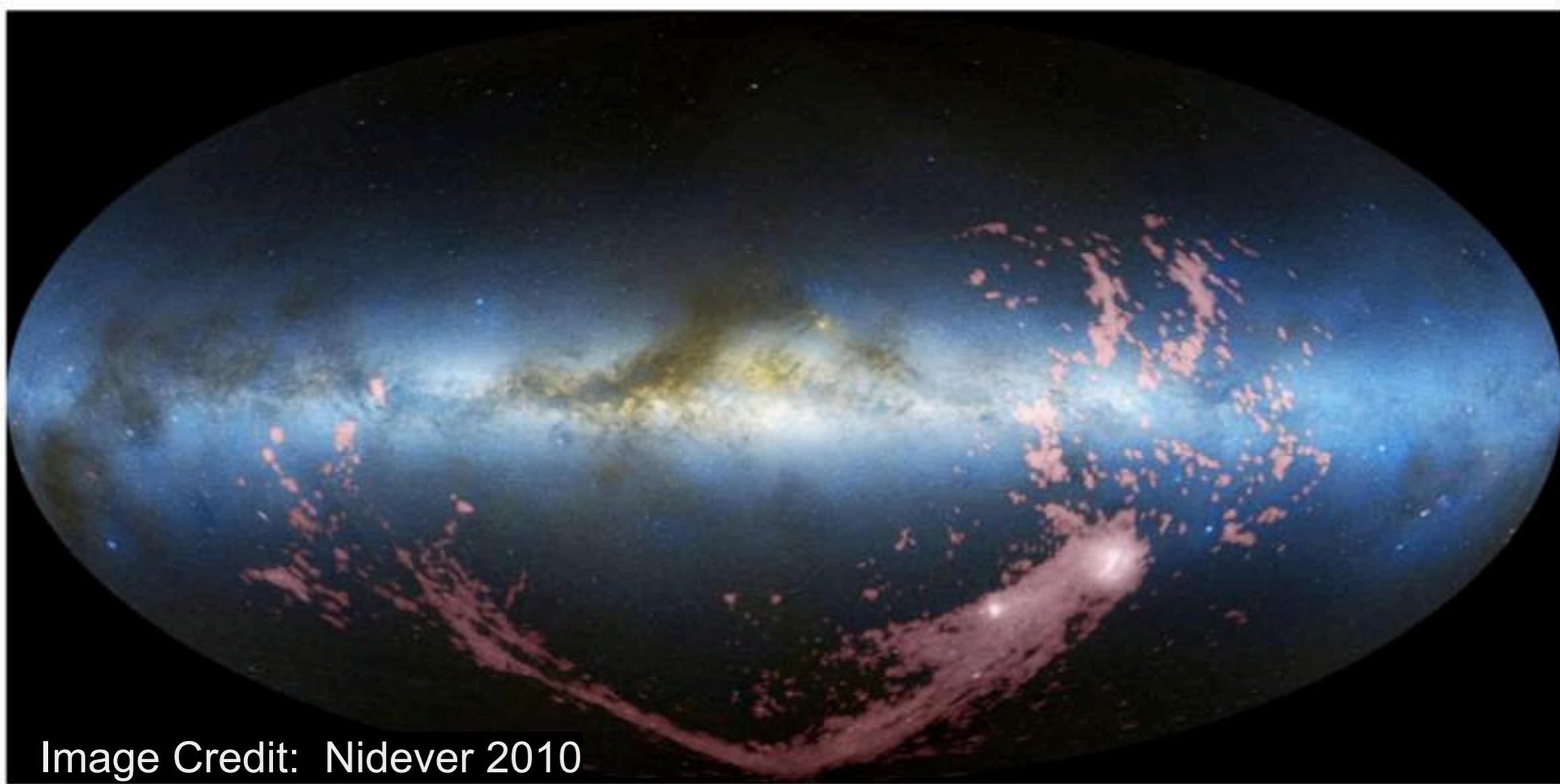
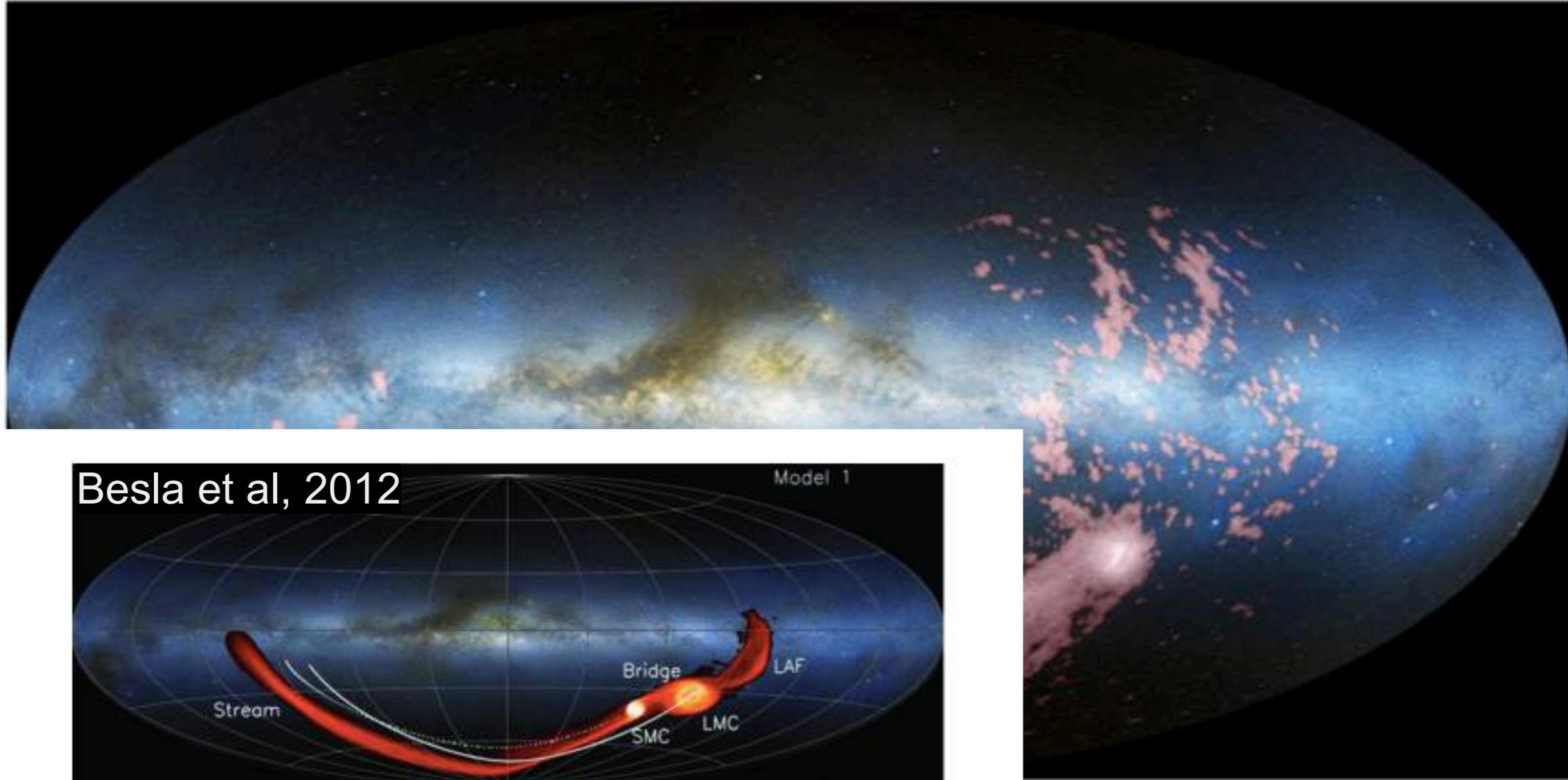
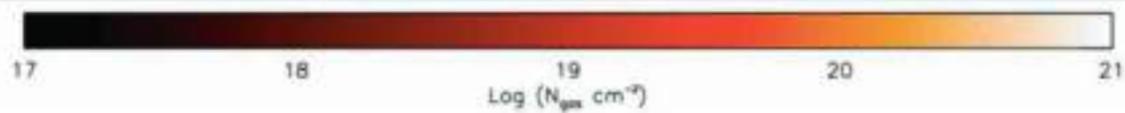
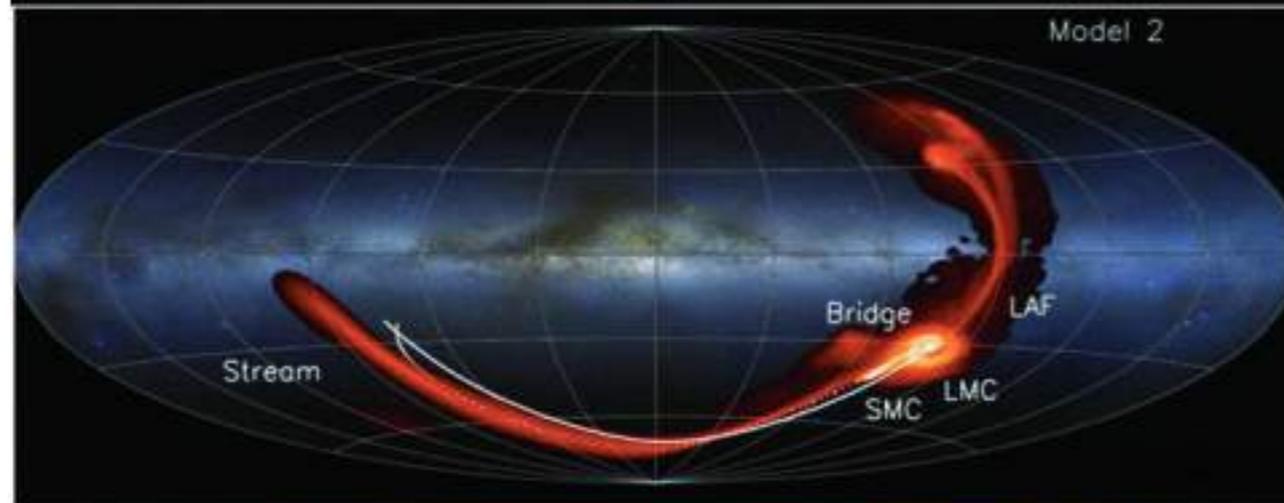
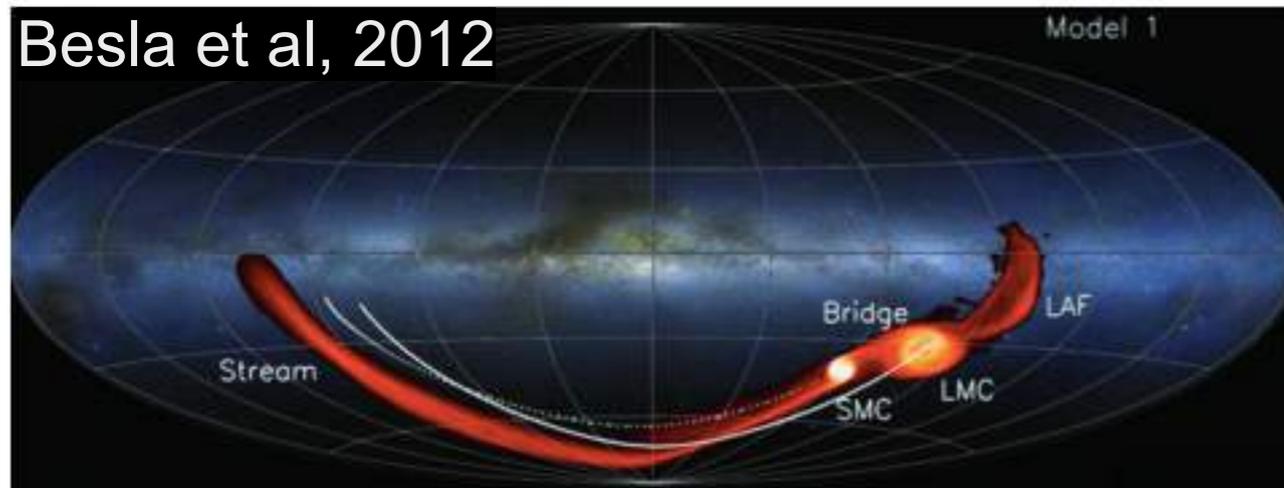


Image Credit: Nidever 2010

# INTERACTIONS EN COURS : LES NUAGES DE MAGELLAN



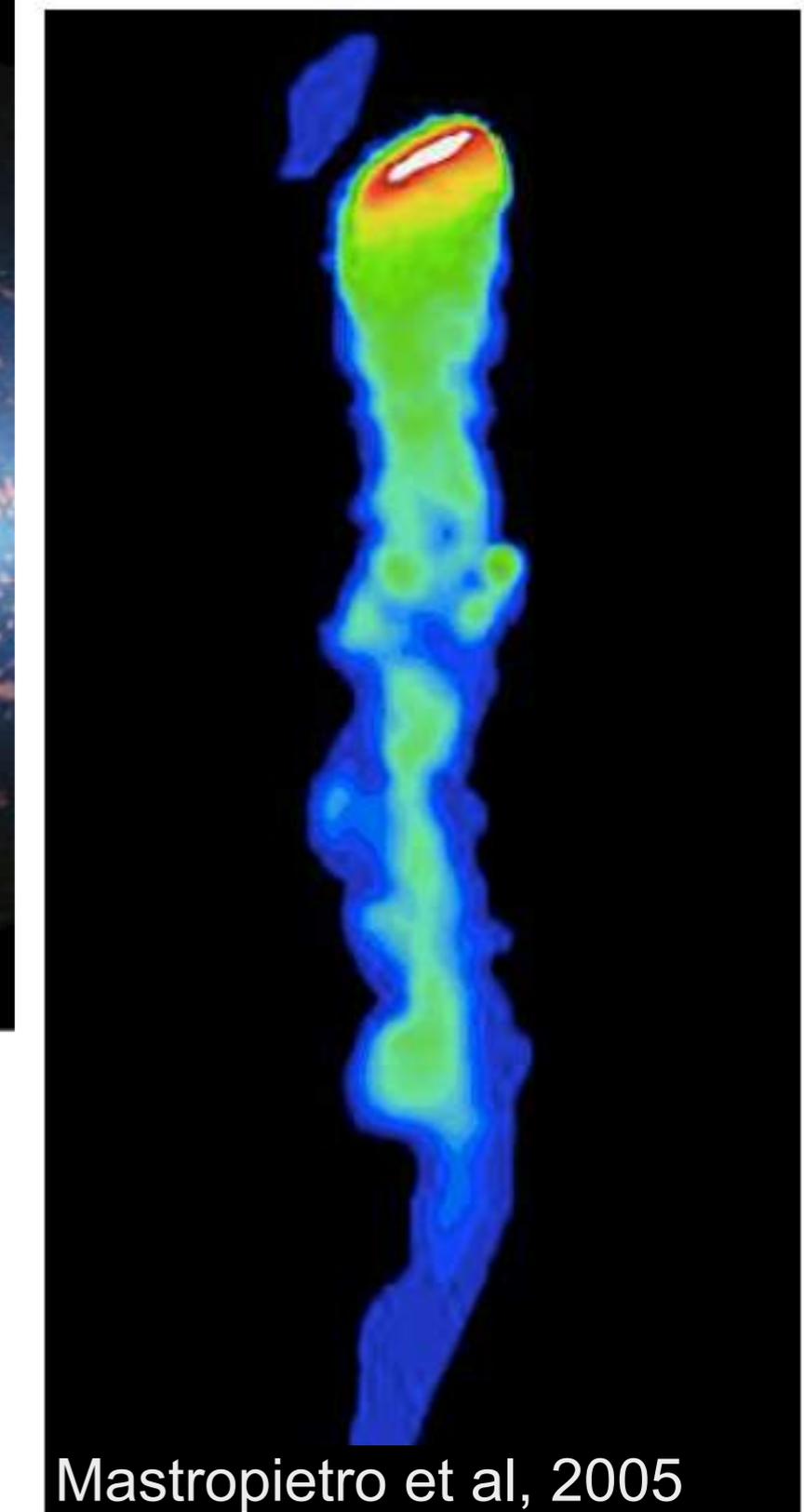
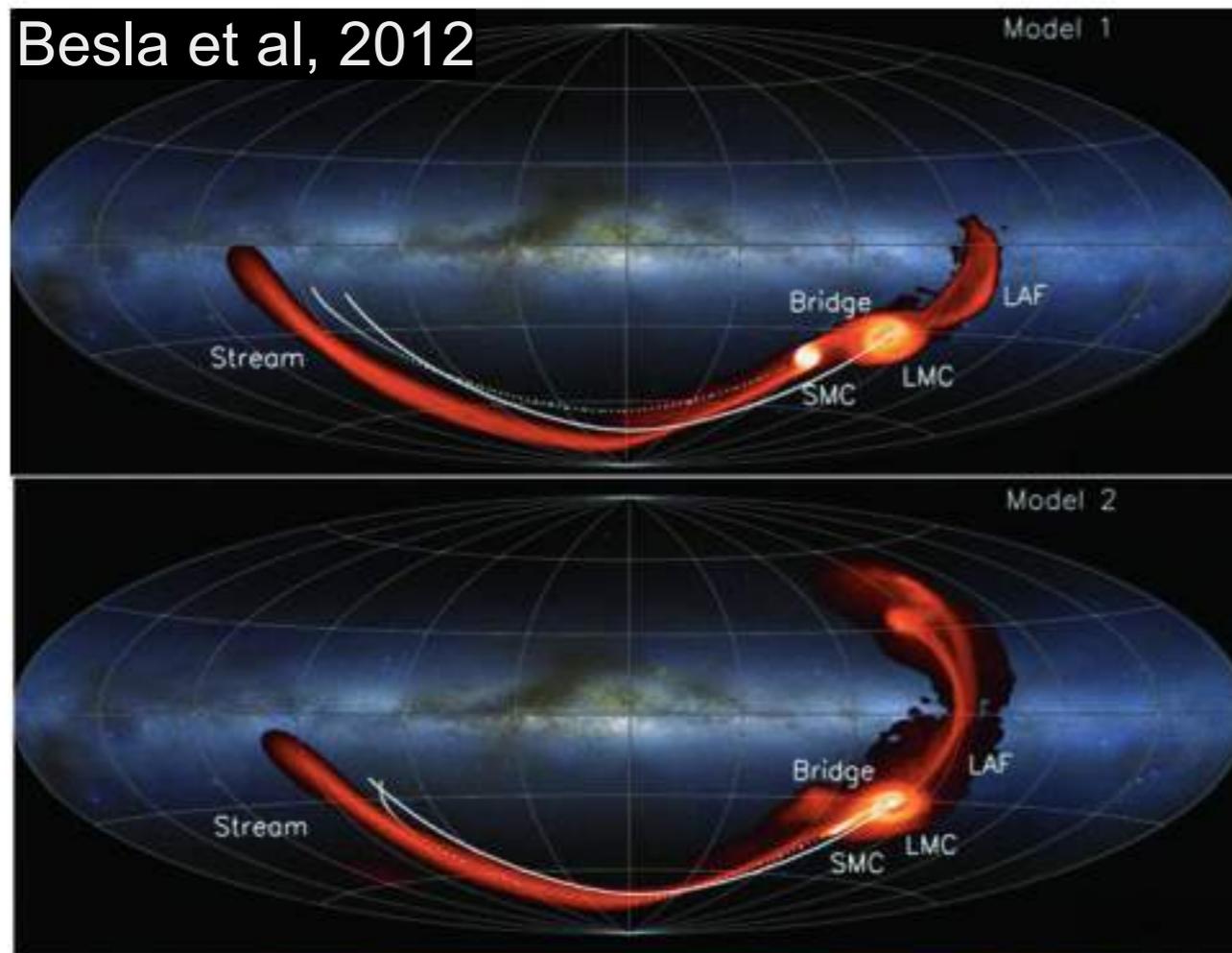
Besla et al, 2012



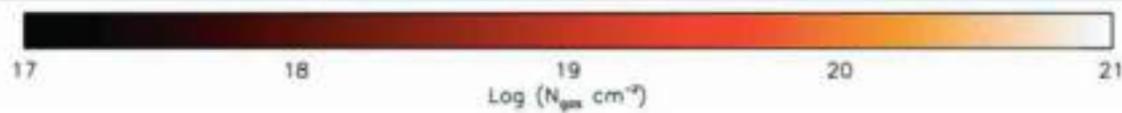
# INTERACTIONS EN COURS : LES NUAGES DE MAGELLAN



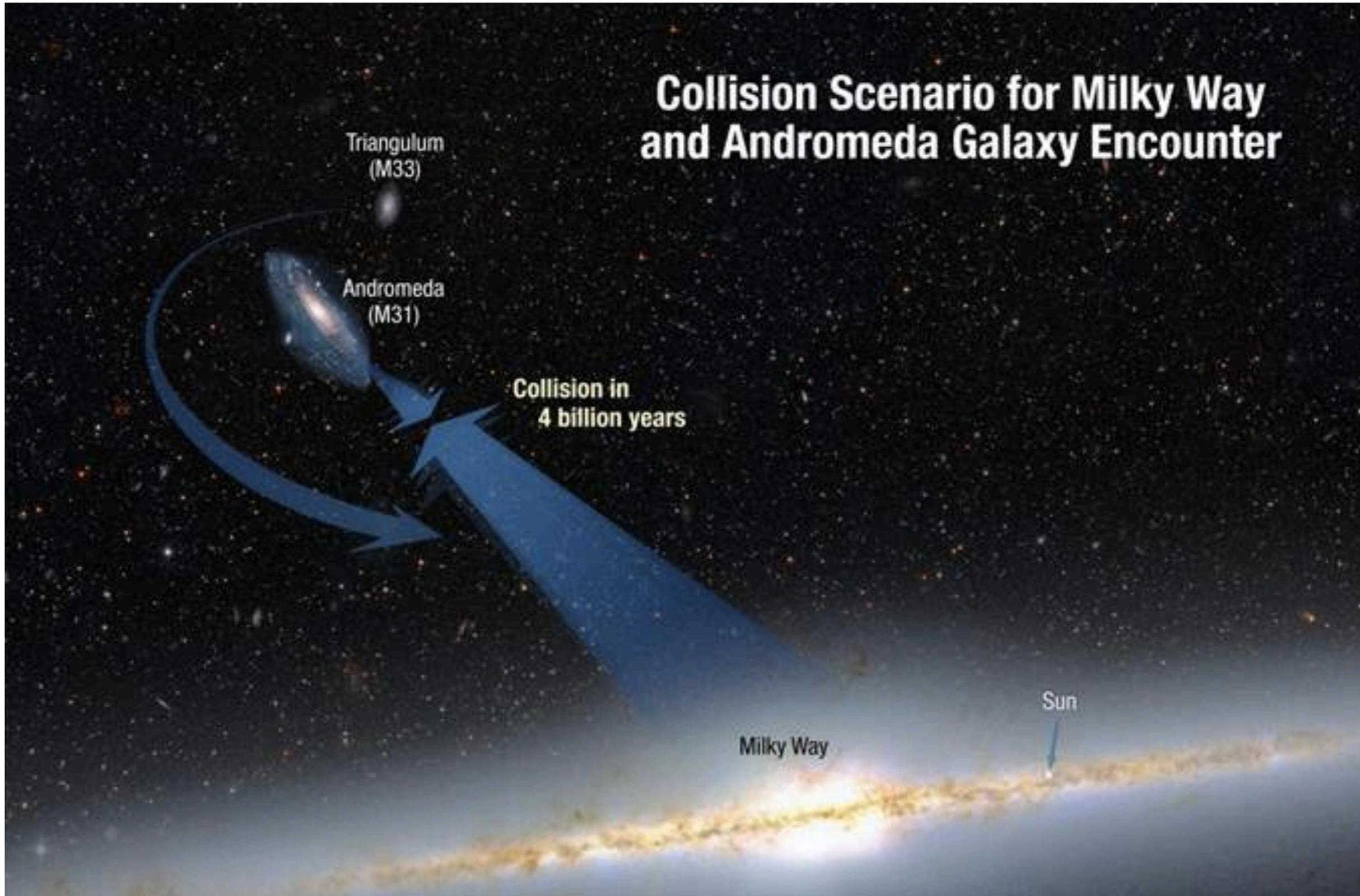
Besla et al, 2012



Mastropietro et al, 2005



# INTERACTIONS FUTURES : ANDROMÈDE ?



(Visualization Credit: NASA; ESA; and F. Summers, STScI |  
Simulation Credit: NASA; ESA; G. Besla, Columbia University; and R. van der Marel, STScI)

# INTERACTIONS FUTURES : ANDROMÈDE ?

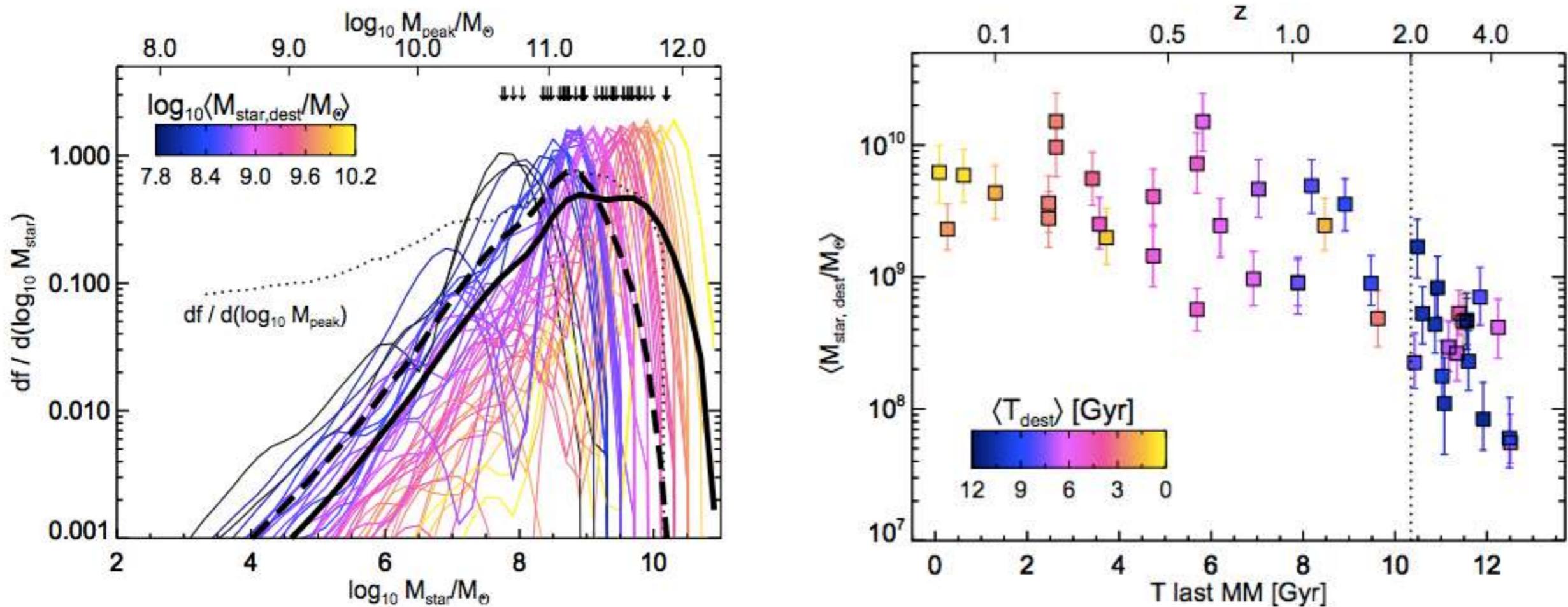


(Visualization Credit: NASA; ESA; and F. Summers, STScI |  
Simulation Credit: NASA; ESA; G. Besla, Columbia University; and R. van der Marel, STScI)

# À LA RECHERCHE DES ACCRÉTIONS PASSÉES

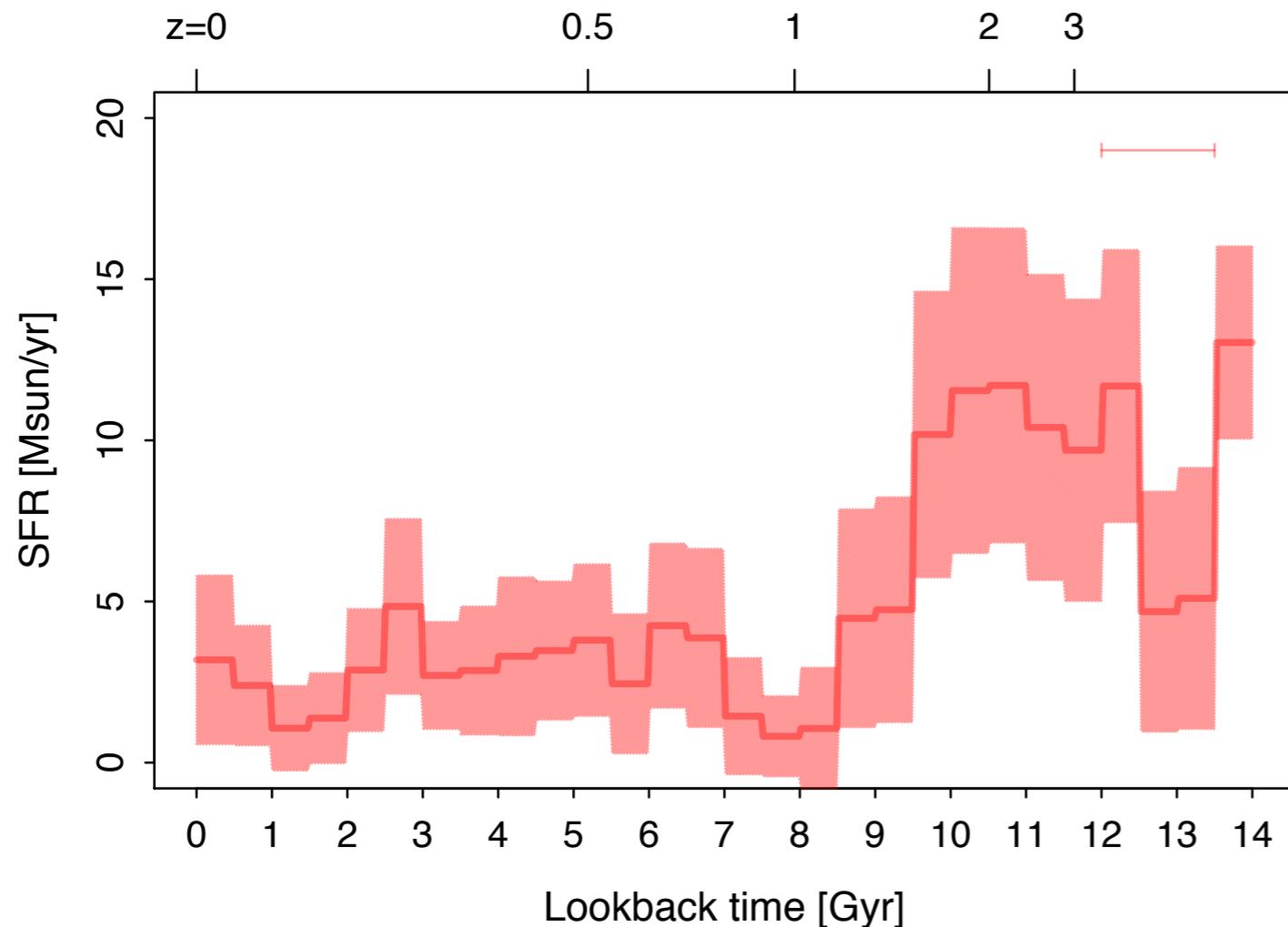


# QUELLES MASSES POUR LES ANCIENNES ACCRÉTIONS ?



Deason et al, 2016 : Etude d'un échantillon de simulations de la formation de galaxies type VL. Ils trouvent que les contributions dominantes viennent de satellites avec des masses entre  $10^8 - 10^{10} M_{\odot}$ . Les halos qui ont eu une histoire d'accrétion plus calme, accrètent satellites moins massifs ( $10^8 - 10^9 M_{\odot}$ )

# HISTOIRE DE LA FORMATION STELLAIRE DE LA VL ET EPOQUE DE FUSIONS

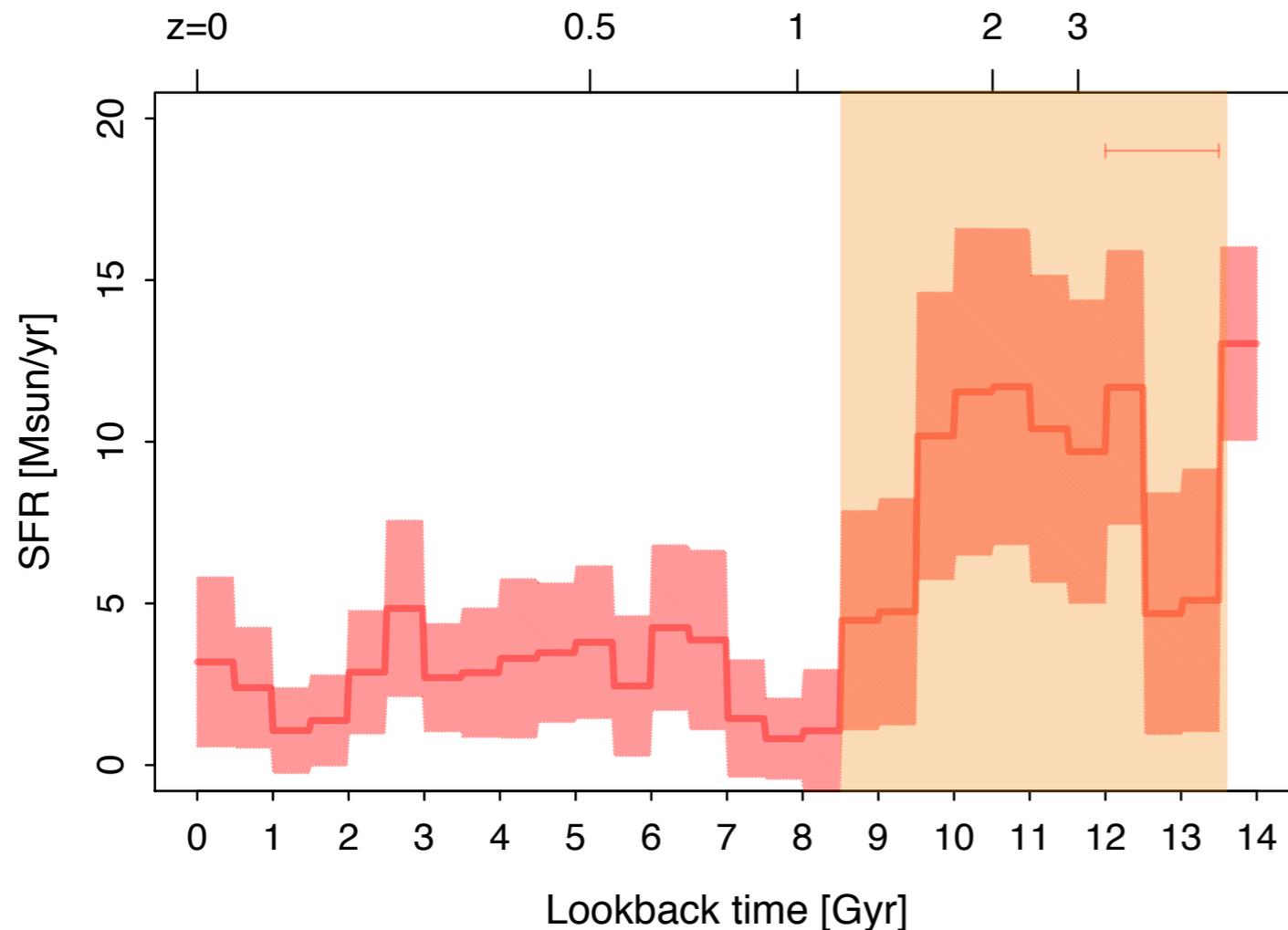


Snaith et al, 2014 :

**Deux phases dans la formation stellaire du disque de la VL.**

Une première phase, **il y a 10-13 milliards d'années**, où la **formation stellaire a été intense** ( $\sim 12 \text{ Msun/an}$ ) suivie par une **phase calme dans les derniers 8-9 milliards d'années** ( $\sim 2-3 \text{ Msun/an}$ ).

# HISTOIRE DE LA FORMATION STELLAIRE DE LA VL ET EPOQUE DE FUSIONS



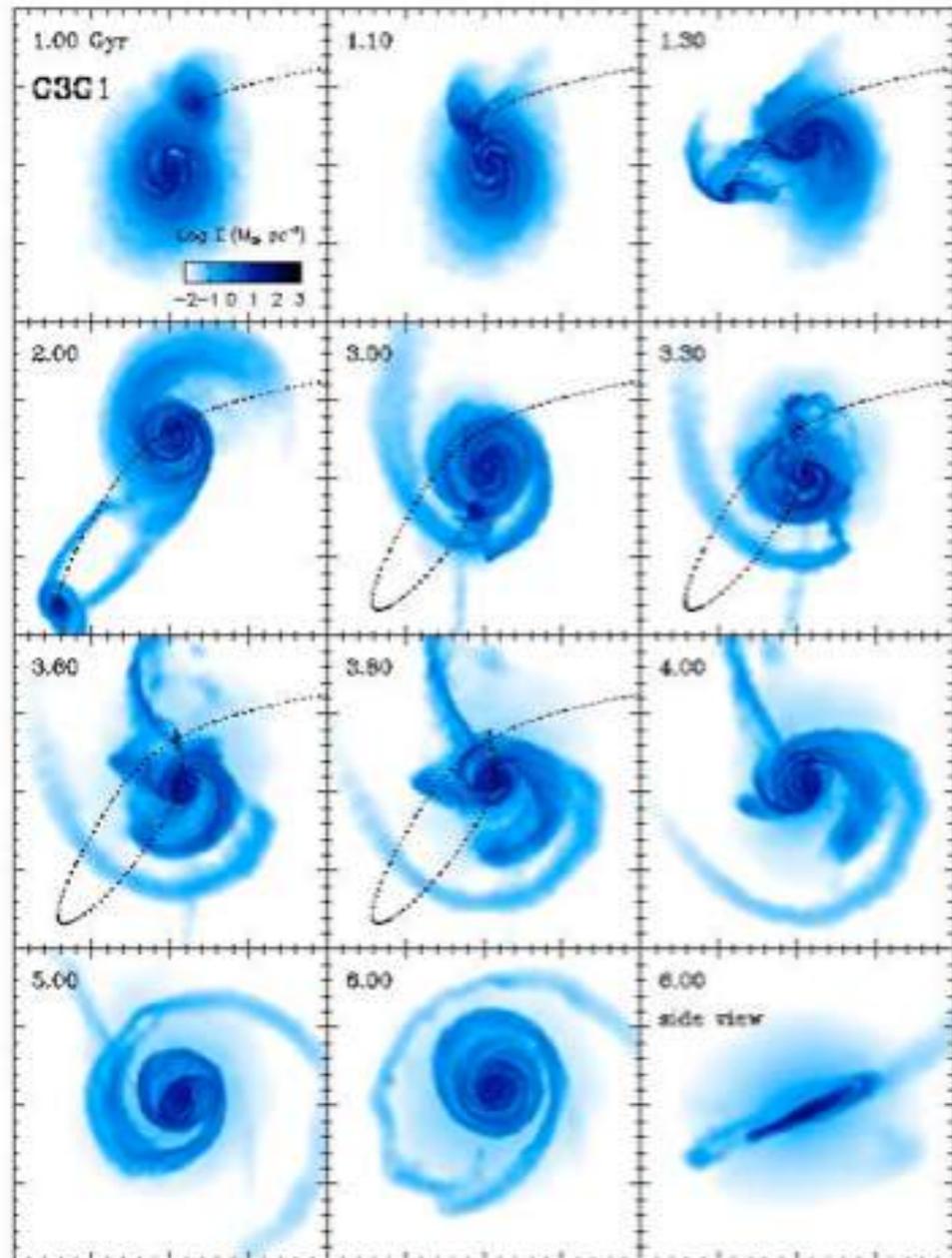
Snaith et al, 2014 :

**Deux phases dans la formation stellaire du disque de la VL.**

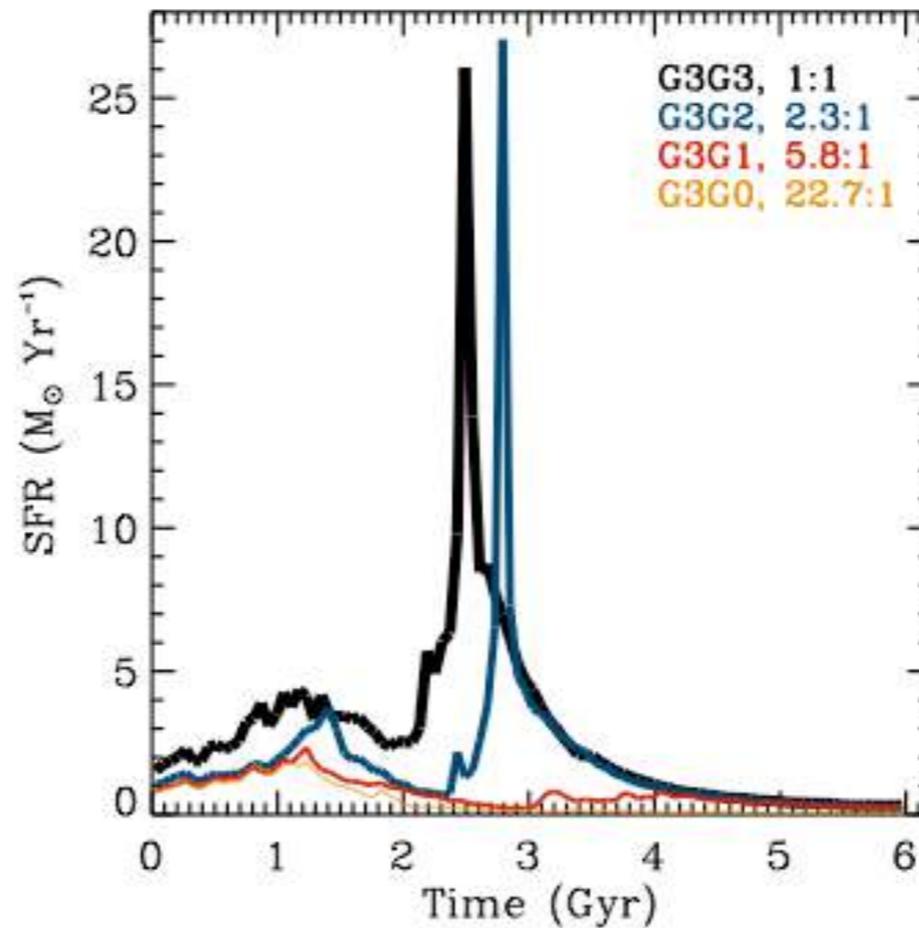
Une première phase, **il y a 10-13 milliards d'années**, où la **formation stellaire a été intense** ( $\sim 12 \text{ Msun/an}$ ) suivie par une **phase calme dans les derniers 8-9 milliards d'années** ( $\sim 2-3 \text{ Msun/an}$ ).

L'histoire de formation stellaire de la VL, telle que montrée en haut, indiquerait que l'époque la plus propice pour des fusions dans la Galaxie se situe à  $z \sim 2$ , soit il y a environ 10 milliards d'années.

# FUSIONS DE GALAXIES ET FLAMBÉES DE FORMATION STELLAIRE



**Evolution du gaz pendant une fusion mineure** – Cox et al. 2008



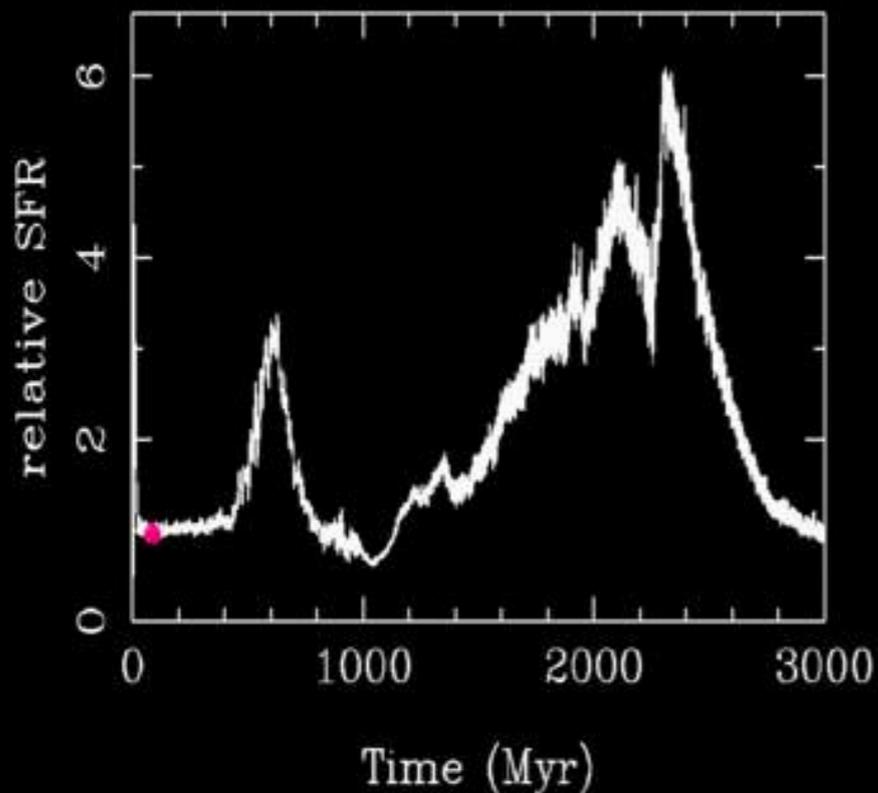
**Evolution du taux de formation stellaire (SFR) en fonction du temps, pour des fusions avec de différents rapports de masse** – Cox et al. 2008

Augmentation de la formation stellaire comme conséquence de la chute de gaz dans les régions centrales de la galaxie

# FUSIONS DE GALAXIES ET FLAMBÉES DE FORMATION STELLAIRE

Simulation de la fusion de  
deux galaxies de même  
masse, en orbite directe.

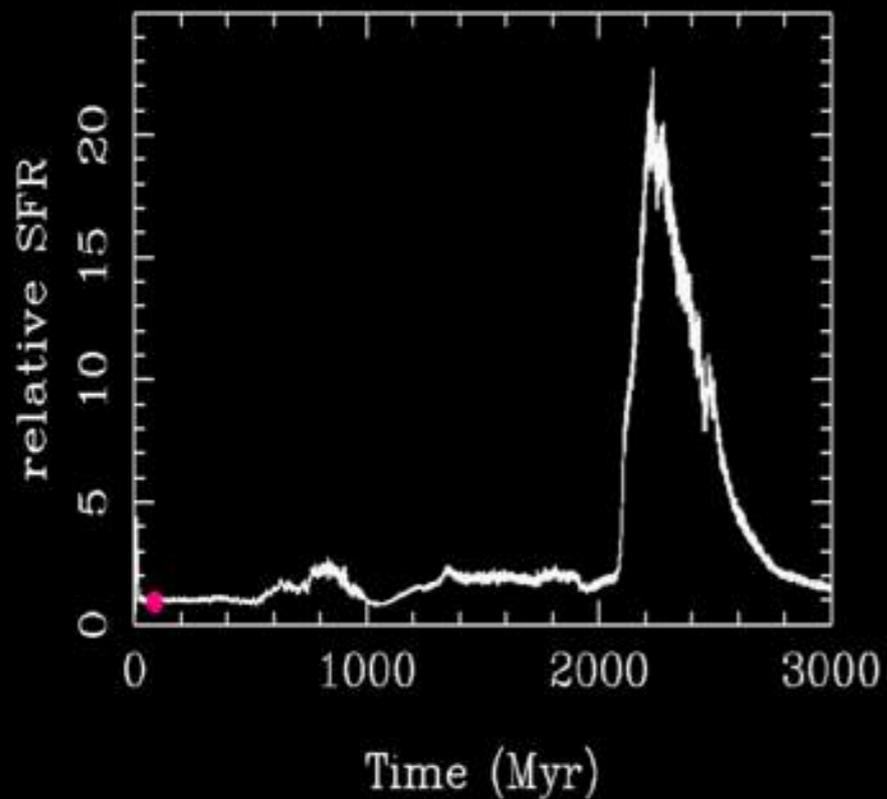
Du projet GalMer  
<http://galmer.obspm.fr>



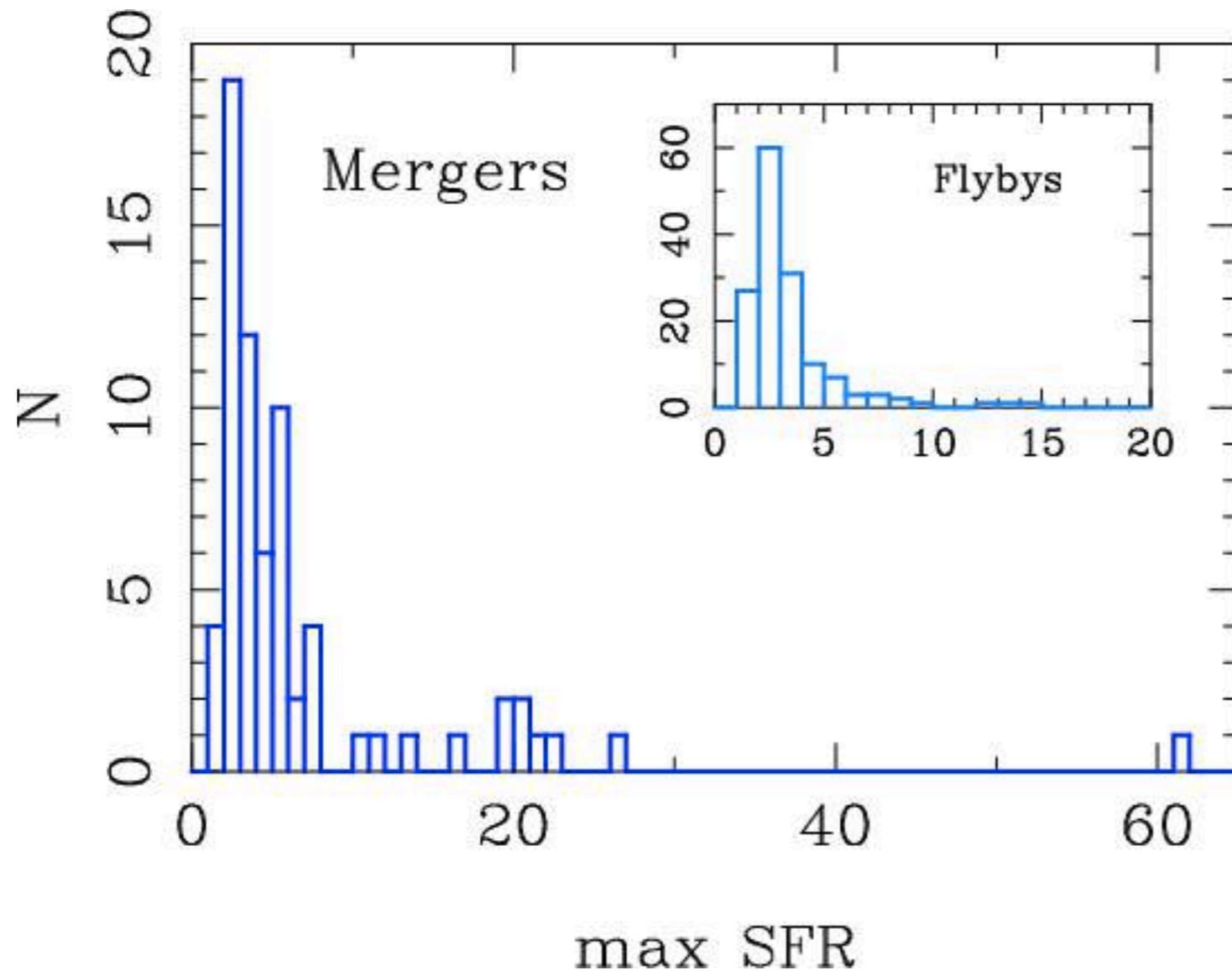
# FUSIONS DE GALAXIES ET FLAMBÉES DE FORMATION STELLAIRE

Simulation de la fusion de  
deux galaxies de même  
masse, en orbite  
rétrograde.

Du projet GalMer  
<http://galmer.obspm.fr>



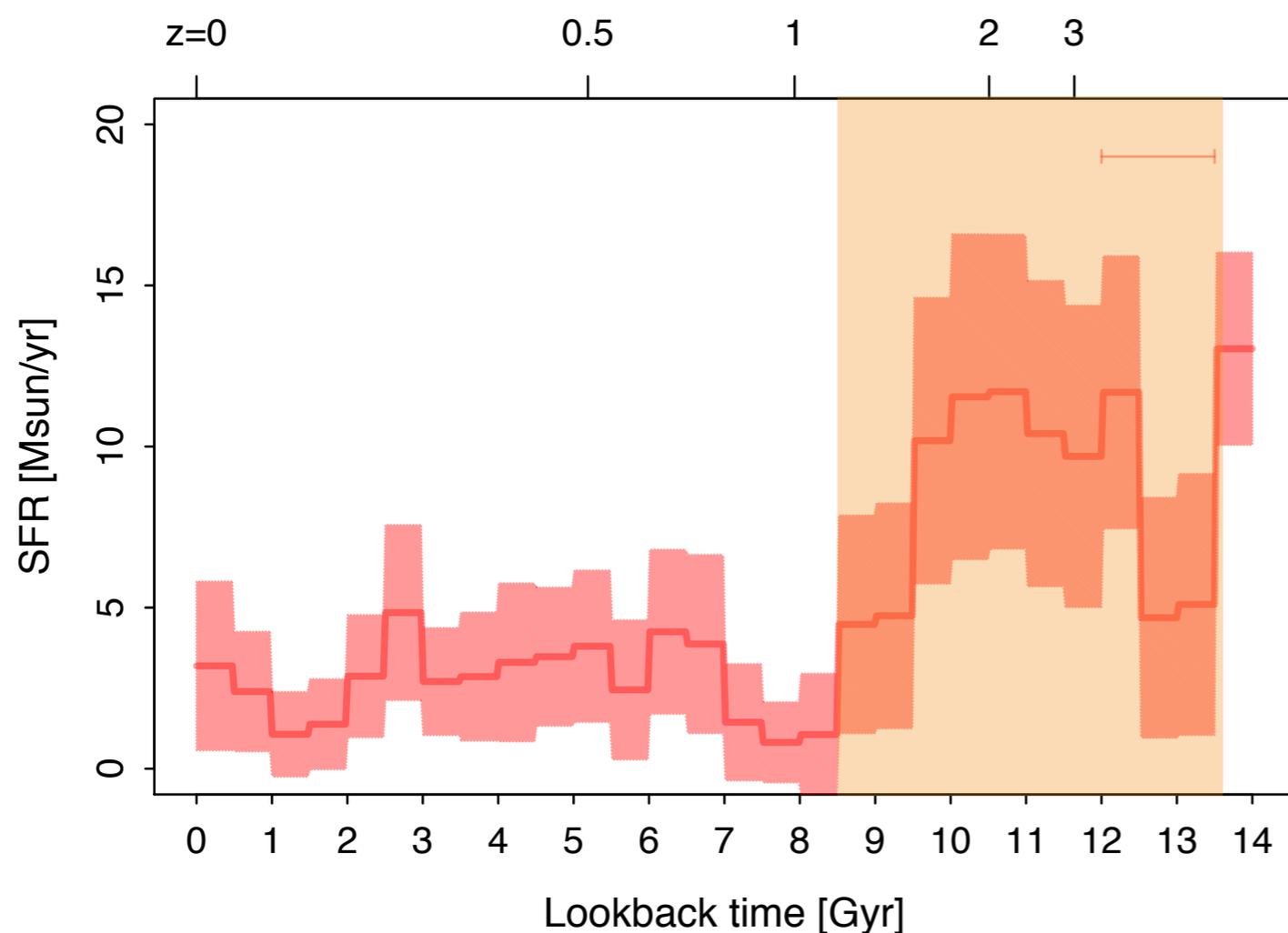
# FUSIONS DE GALAXIES ET FLAMBÉES DE FORMATION STELLAIRE



Di Matteo et al, 2007 :  
En moyenne, **les fusions majeures stimulent un taux de formation stellaire 3-4 fois plus élevé que celui d'une galaxie isolée**, ne subissant pas d'interaction

Du projet GalMer  
<http://galmer.obspm.fr>

# HISTOIRE DE LA FORMATION STELLAIRE DE LA VL ET ÉPOQUE DE FUSIONS



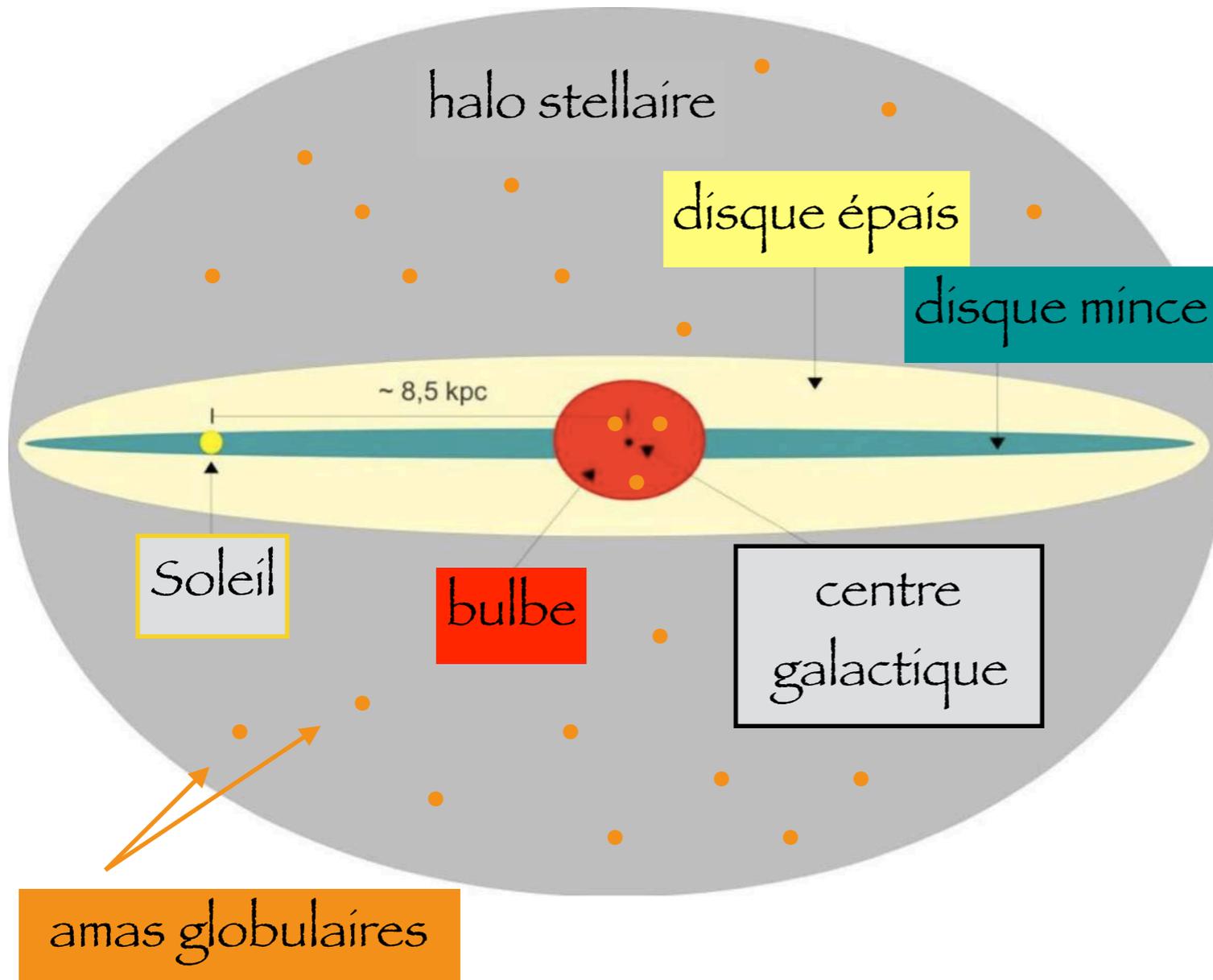
L'histoire de formation stellaire de la VL, telle que montrée en haut, indiquerait que l'époque la plus propice pour des fusions dans la Galaxie se situe à  $z \sim 2$ , soit il y a environ 10 milliards d'années.

# ARCHEOLOGIE GALACTIQUE : À LA RECHERCHE DU PASSÉ DE LA VOIE LACTÉE

Si l'époque d'accrétions dans la Galaxie se situe dans les premiers 2-3 milliards d'années de son évolution, c'est parmi les étoiles formées à ces époques qu'on peut espérer de trouver les anciennes traces de satellites accrétés.



# ARCHEOLOGIE GALACTIQUE : OÙ SONT LES ÉTOILES LES PLUS VIEILLES DANS NOTRE GALAXIE ?



**Disque mince** : âge des étoiles  $< 8-9$  Gyr

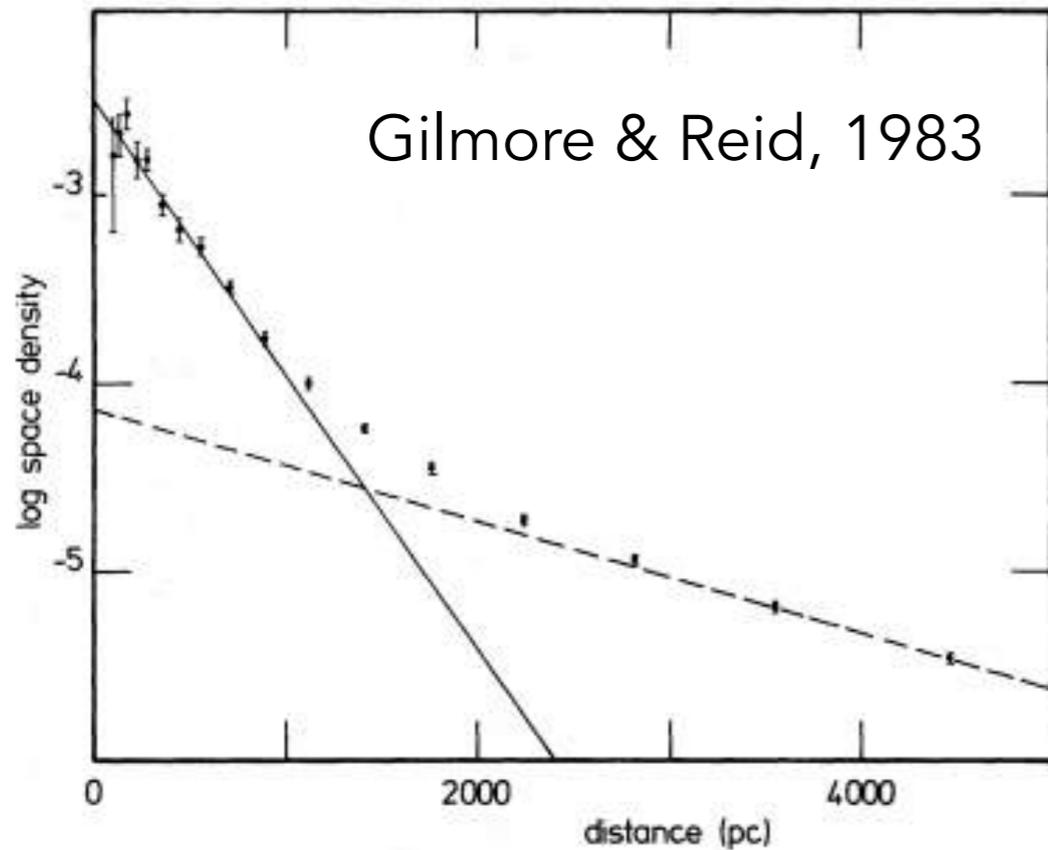
**Disque épais** : âge des étoiles entre 9 et 13 Gyr

**Halo stellaire** : âge des étoiles  $> 10$  Gyr

**Bulbe** : étoiles en moyenne vieilles (âges  $> 10$  Gyr), mais contient aussi des étoiles plus jeunes

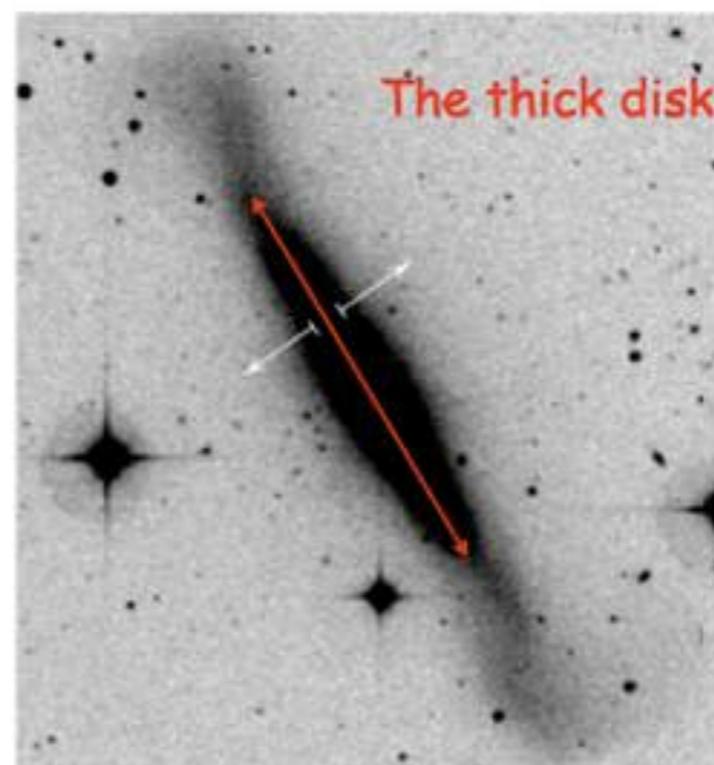
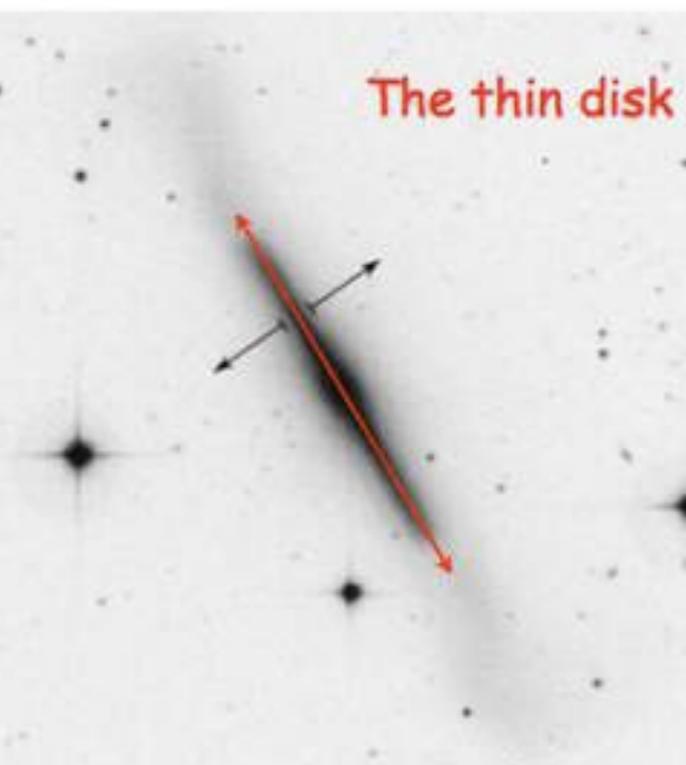
**Amas globulaires** : systèmes stellaires vieux, avec un âge moyen de  $\sim 10$  Gyr

# LE DISQUE ÉPAIS : VESTIGE DES INTERACTIONS PASSÉES ?



Découvert en 1983 (Gilmore & Reid),  
**dernière composante stellaire de la  
Voie lactée qui a été identifiée.**

Dans la VL, sa masse est estimée  
entre 10% et 50% de la masse  
stellaire totale.



Comment une telle  
composante a pu  
se former ?

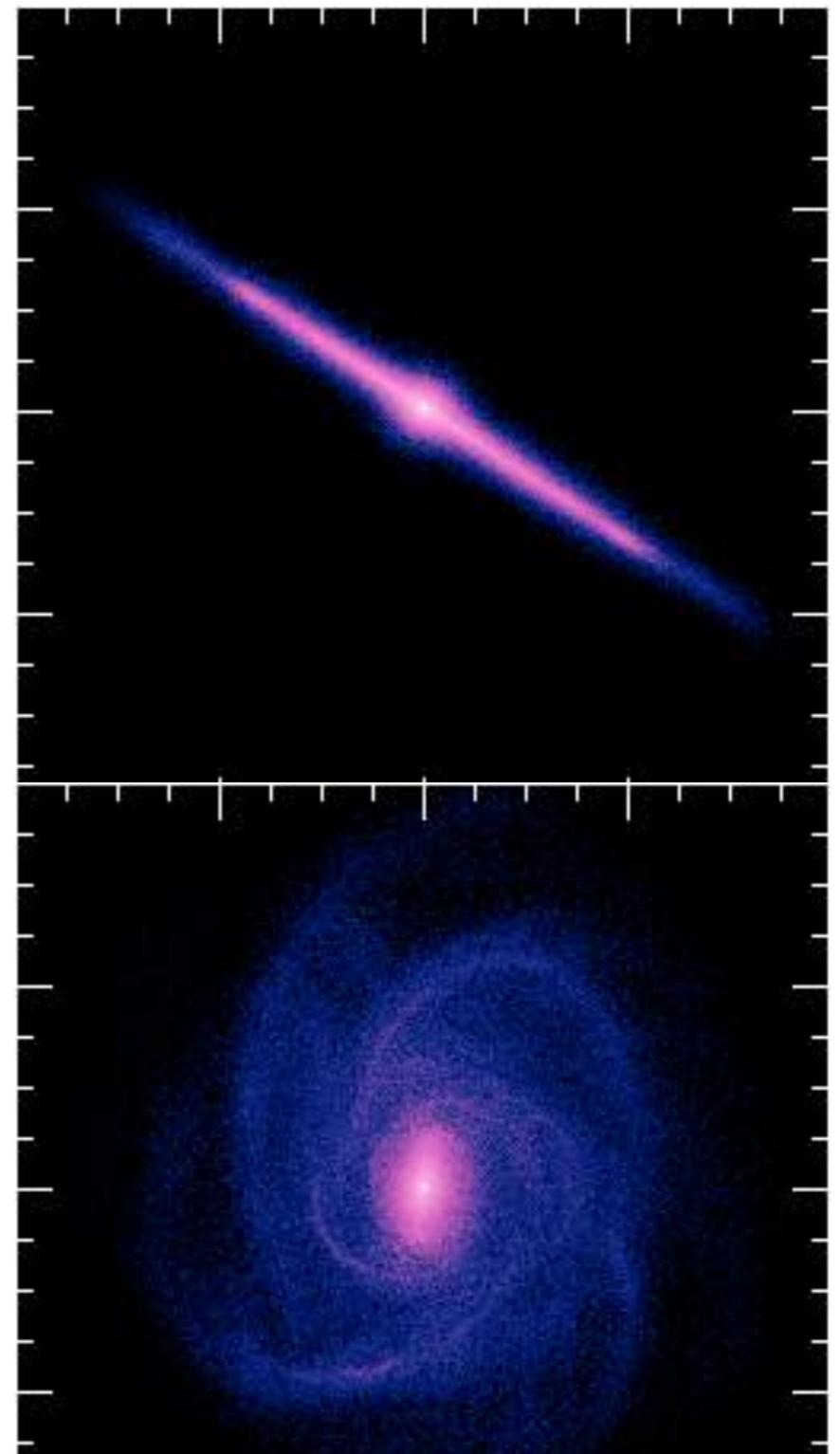
# LE DISQUE ÉPAIS : FORMATION PAR RÉCHAUFFEMENT CINÉMATIQUE D'UN DISQUE MINCE

Pendant une fusion, l'énergie orbitale et le moment angulaire sont redistribués dans le système.

Une partie du moment angulaire et de l'énergie est absorbée par l'halo de matière noire.

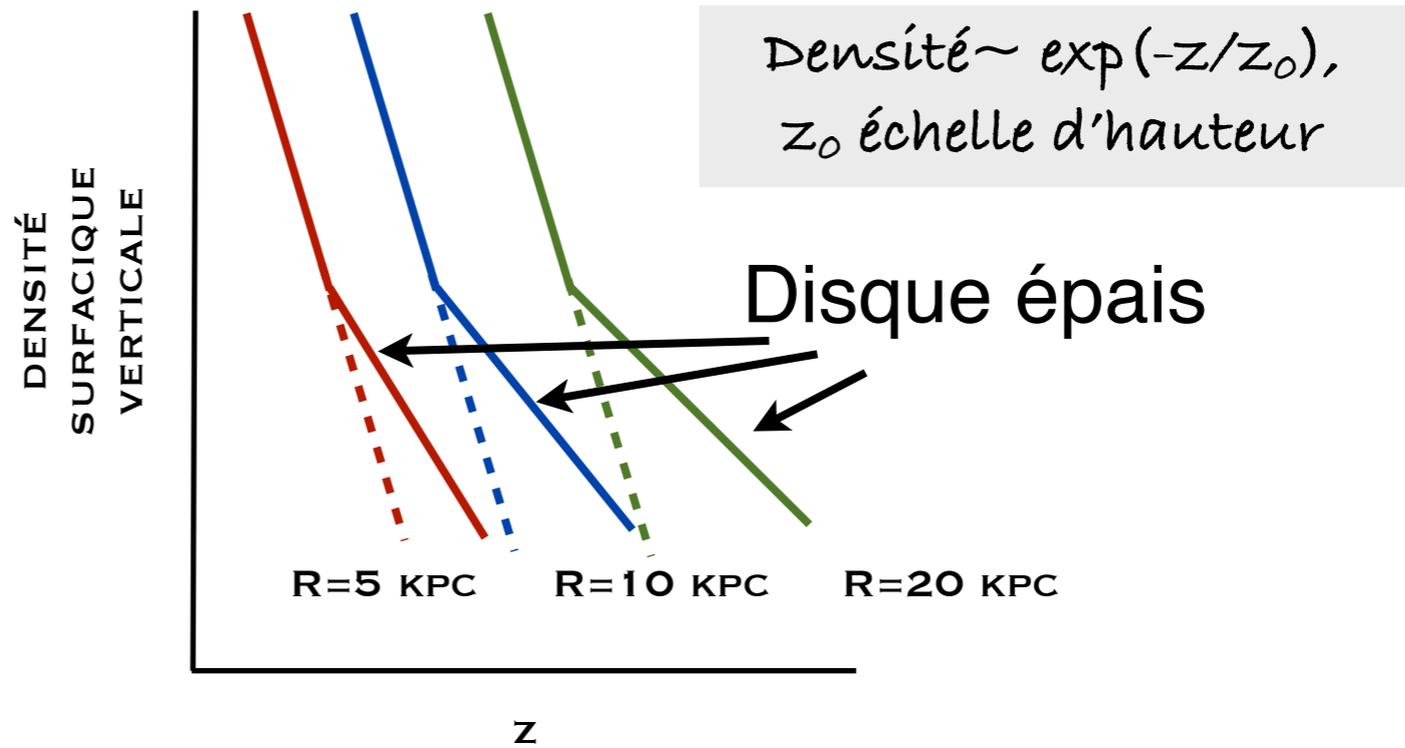
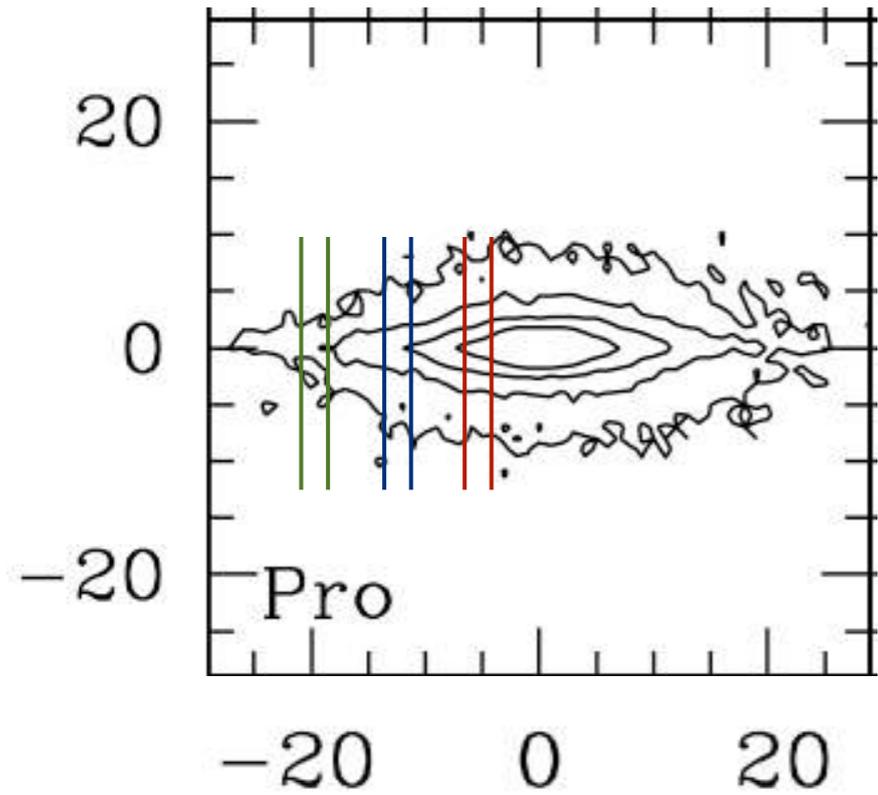
Une autre partie est absorbée par les étoiles du disque mince.

➔ **Augmentation des dispersions de vitesse, réchauffement et épaisseur du disque**

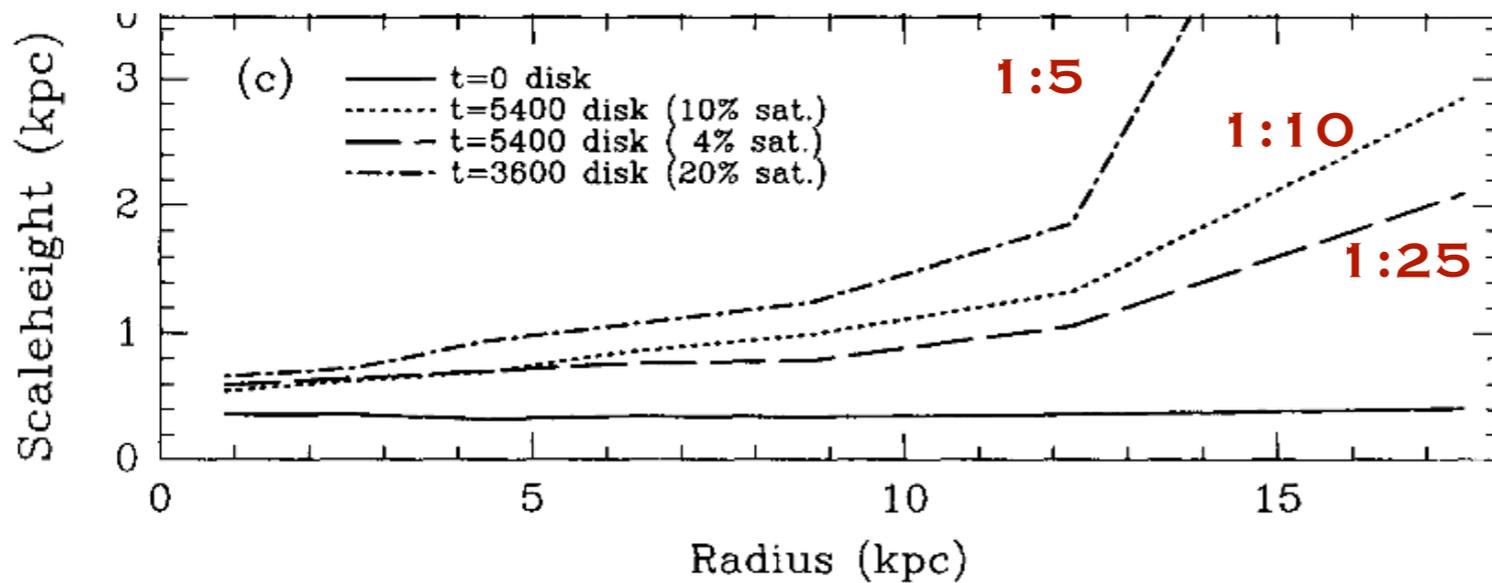


**Simulation d'une fusion mineure, composante stellaire** – Di Matteo et al. 2010, Projet GalMer

# LE DISQUE ÉPAIS : FORMATION PAR RÉCHAUFFEMENT CINÉMATIQUE D'UN DISQUE MINCE

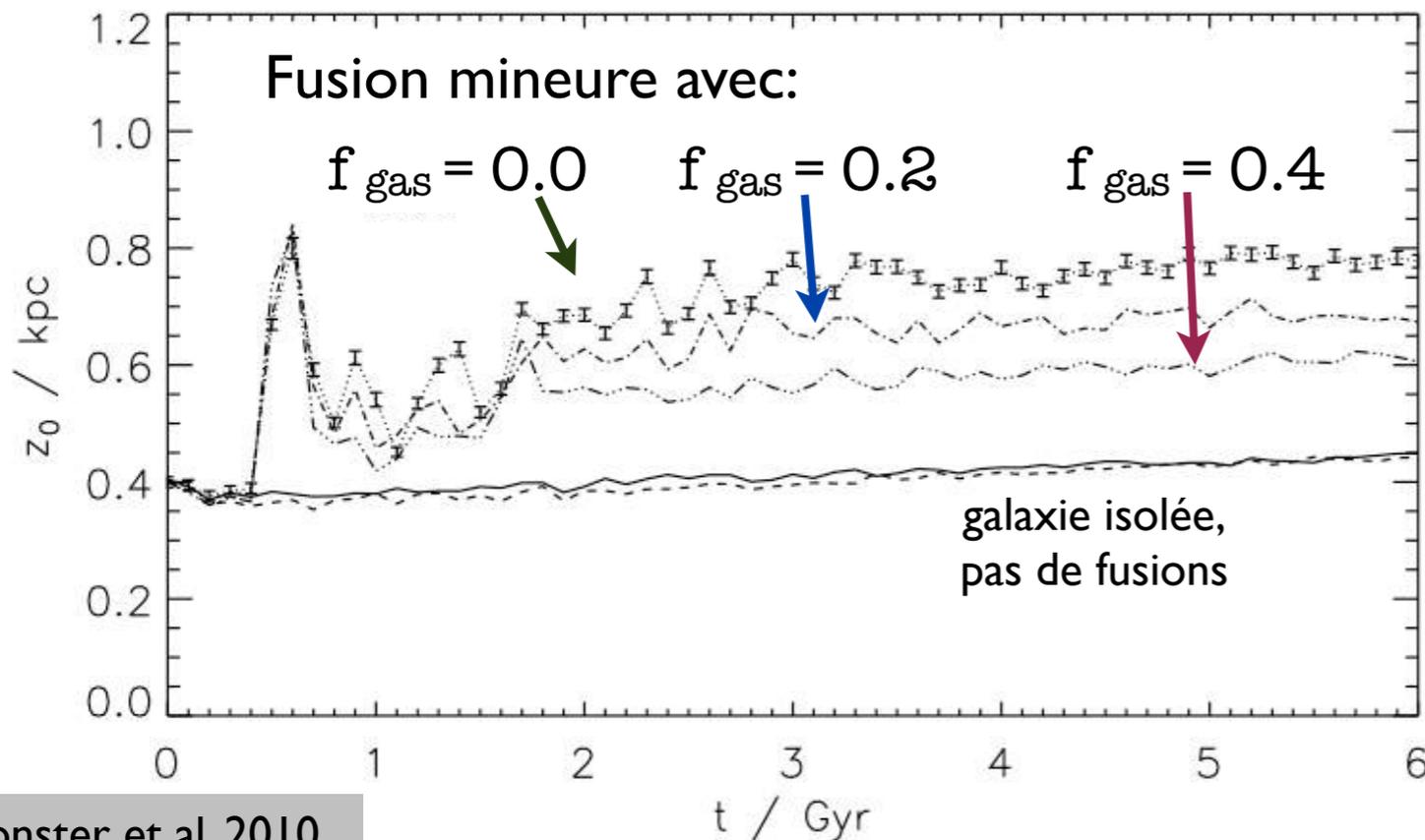
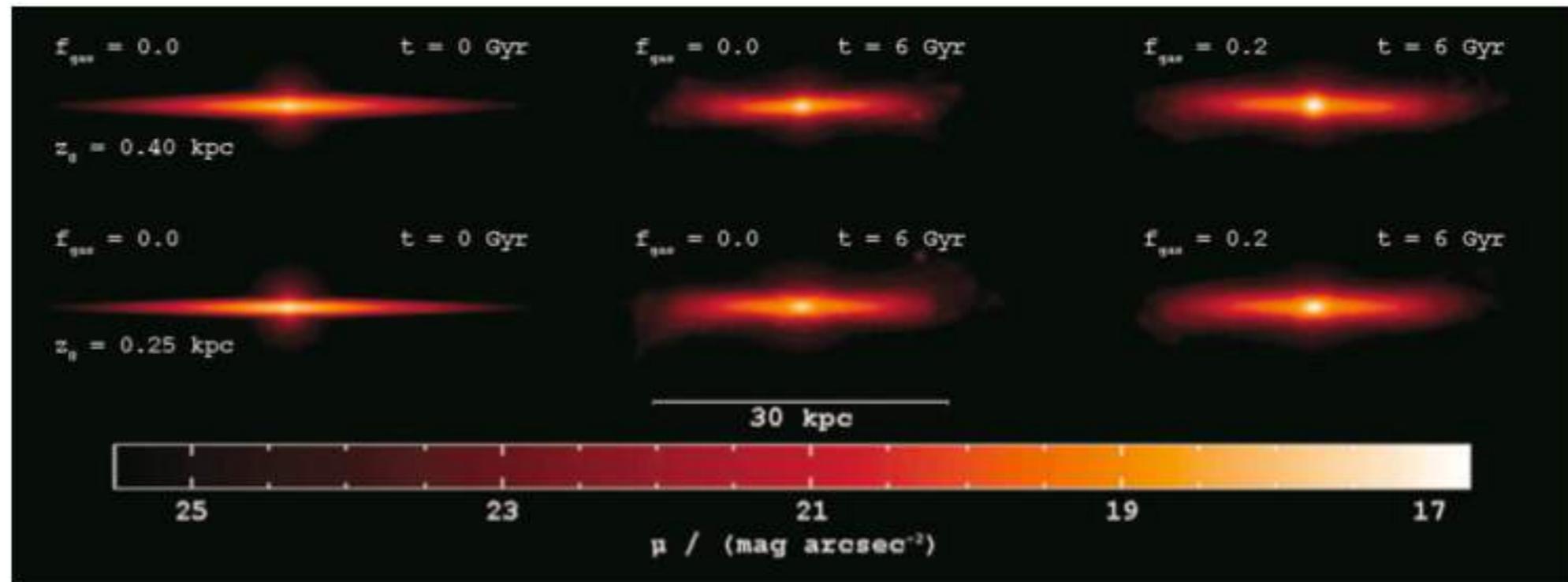


**Echelle d'hauteur du disque épais le long de l'axe majeur** - Quinn et al. 1993



L'épaisseur finale du disque épais augmente avec la masse du satellite accrété

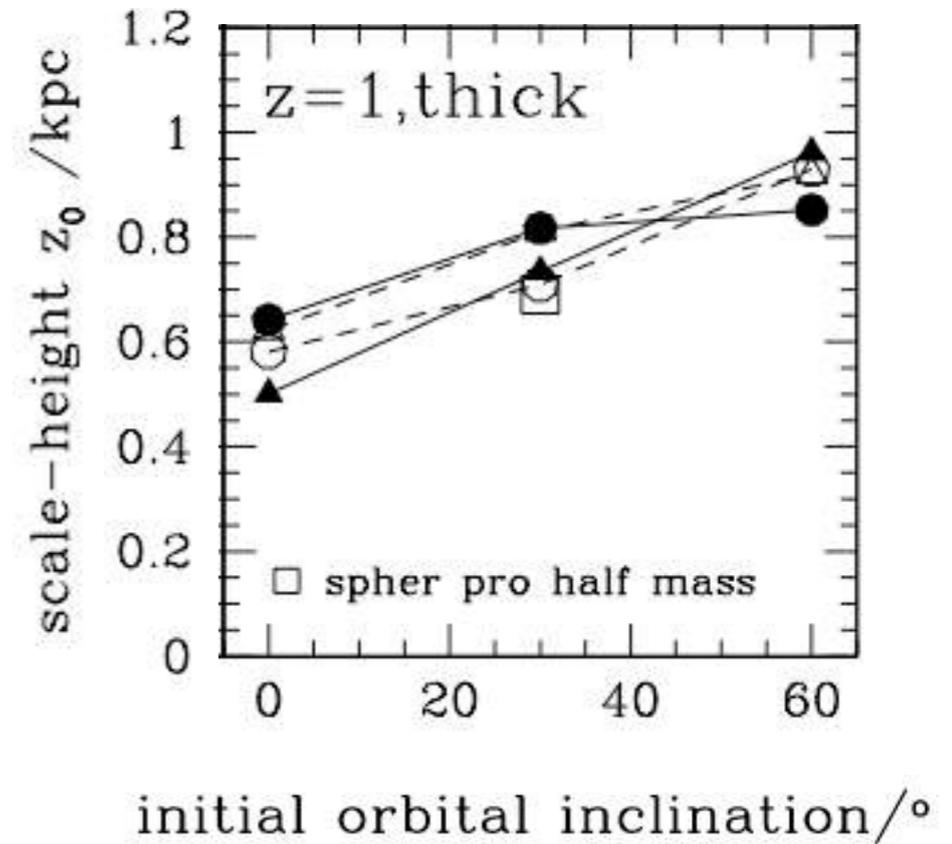
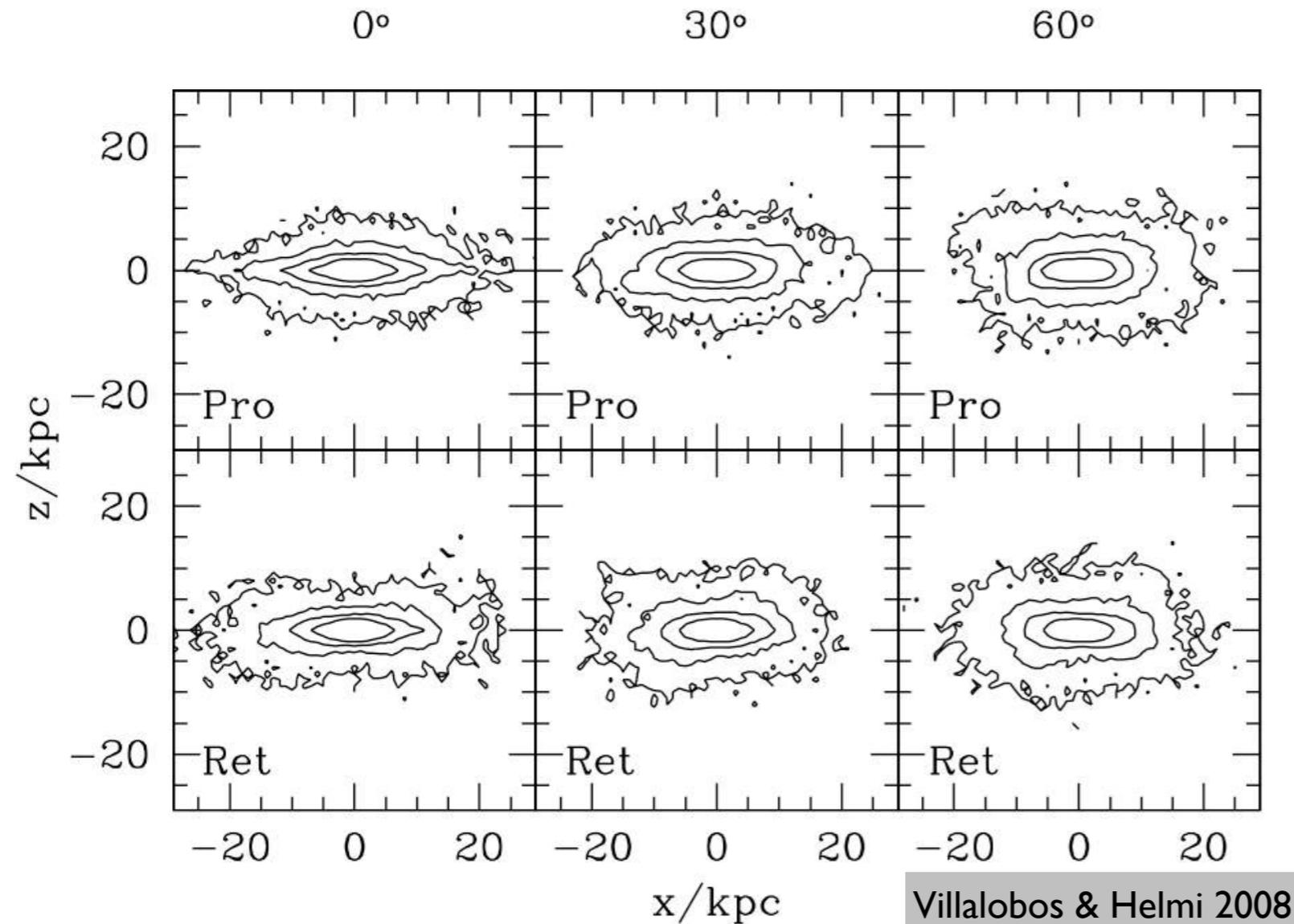
# LE DISQUE ÉPAIS : FORMATION PAR RÉCHAUFFEMENT CINÉMATIQUE D'UN DISQUE MINCE



L'épaisseur finale du disque dépend de la fraction de gaz au départ dans le disque mince.

**Epaississement plus faible si la fraction de gaz est plus élevée**

# LE DISQUE ÉPAIS : FORMATION PAR RÉCHAUFFEMENT CINÉMATIQUE D'UN DISQUE MINCE



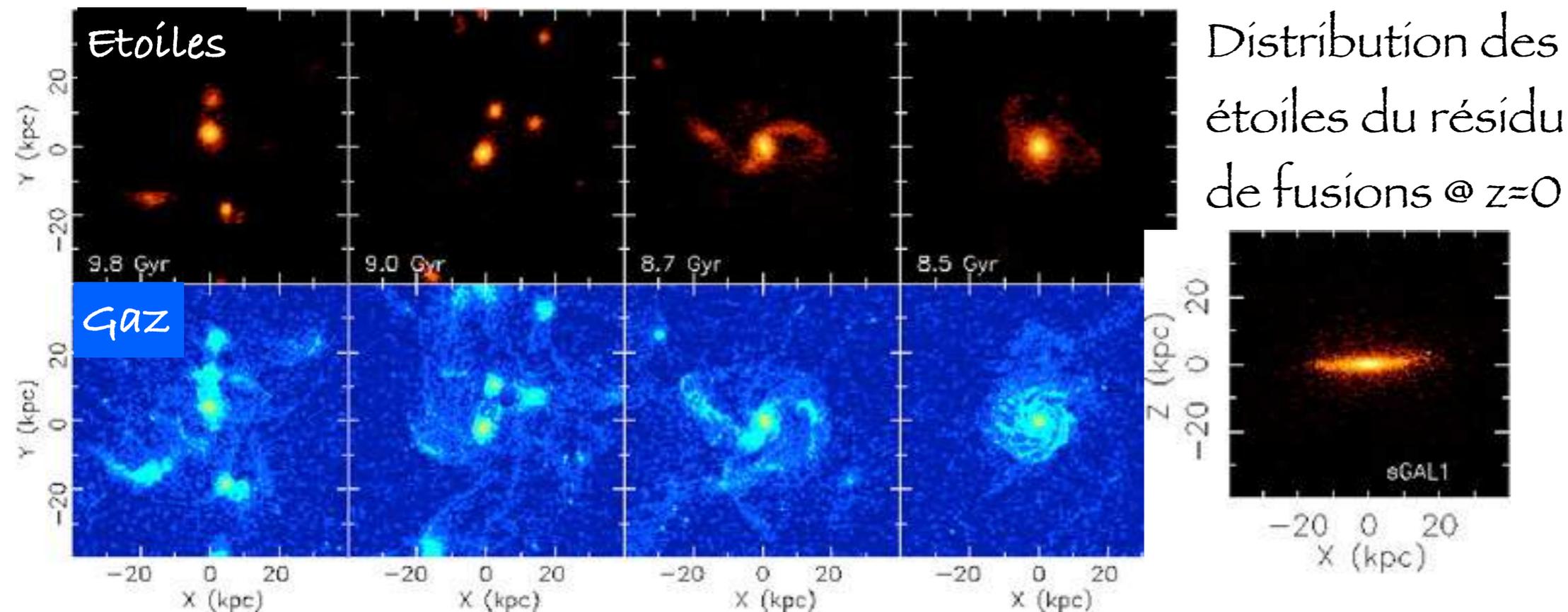
L'épaisseur finale du disque épais dépend de l'inclinaison du plan orbital du satellite:

**l'échelle d'hauteur augmente avec l'inclinaison**

# LE DISQUE ÉPAIS : RÉCHAUFFEMENT OU REFROIDISSEMENT CINÉMATIQUE ?

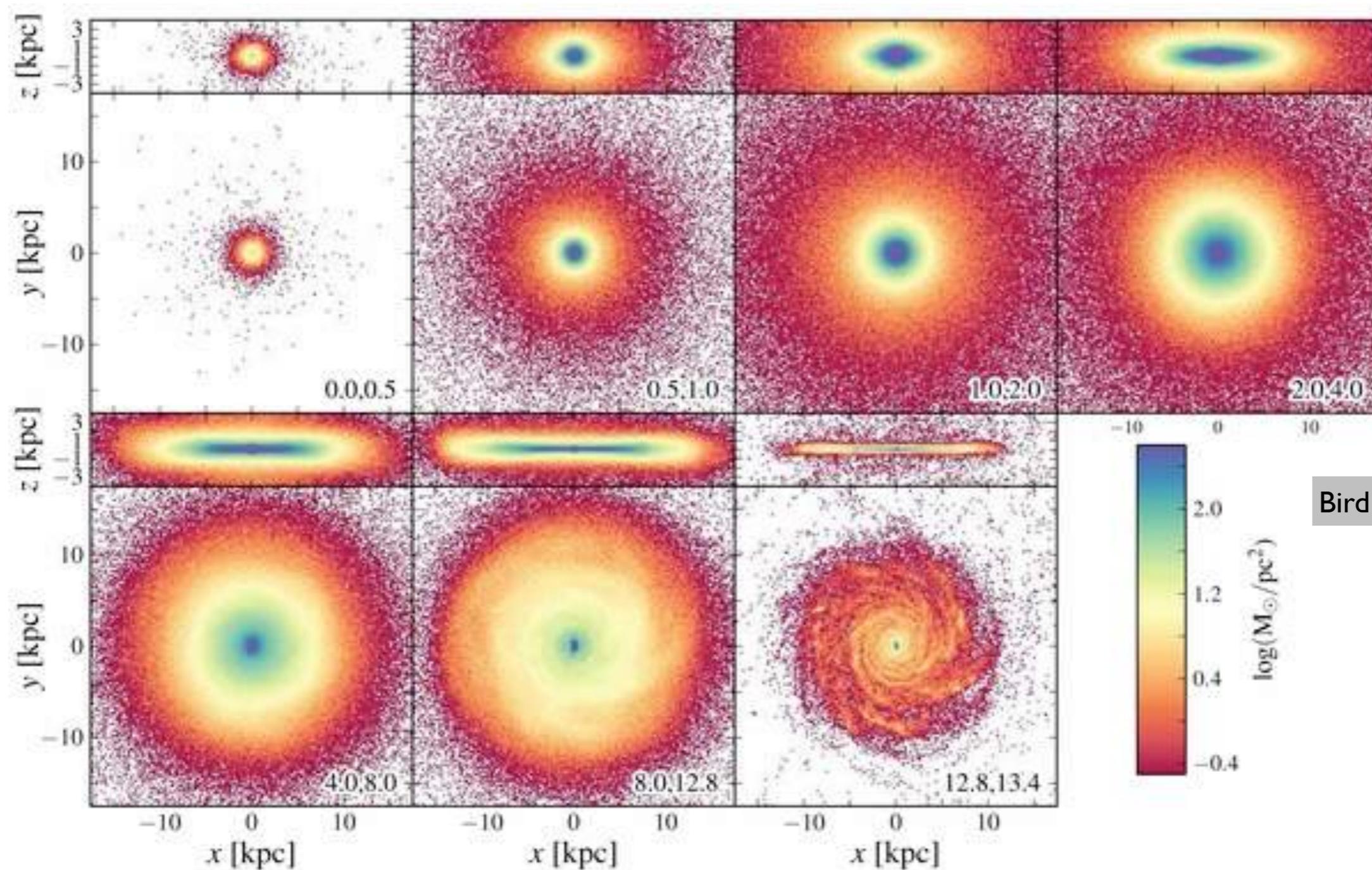
Formation du disque épais par fusion de sous-halos riches en gaz à haut redshift ( $t > 8$  Gyr). Dans ce scénario, **les étoiles du disque épais se forment à partir du gaz turbulent et distribué dans une configuration épaisse.**

Èpoque de fusions riches en gaz



**Formation d'une galaxie spirale avec un disque épais par fusions riches en gaz à haut redshift** – Brook et al. 2004, 2005

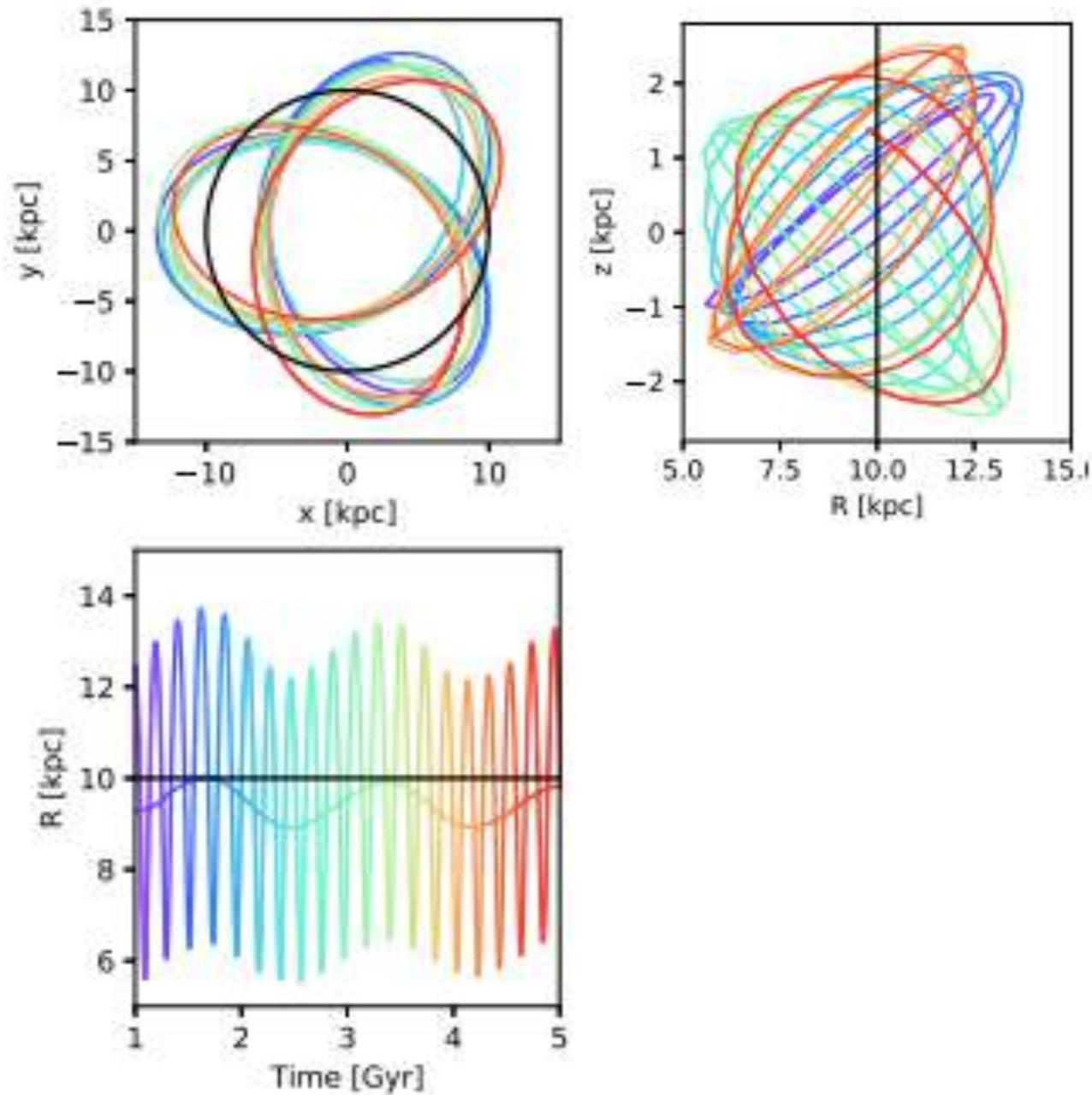
# LE DISQUE ÉPAIS : RÉCHAUFFEMENT OU REFROIDISSEMENT CINÉMATIQUE ?



Bird et al 2013

Dans ce scénario, les étoiles les plus âgées ont naturellement une configuration plus épaisse

# LE DISQUE ÉPAIS : COMMENT CONTRAINDRE SON MÉCANISME DE FORMATION ?



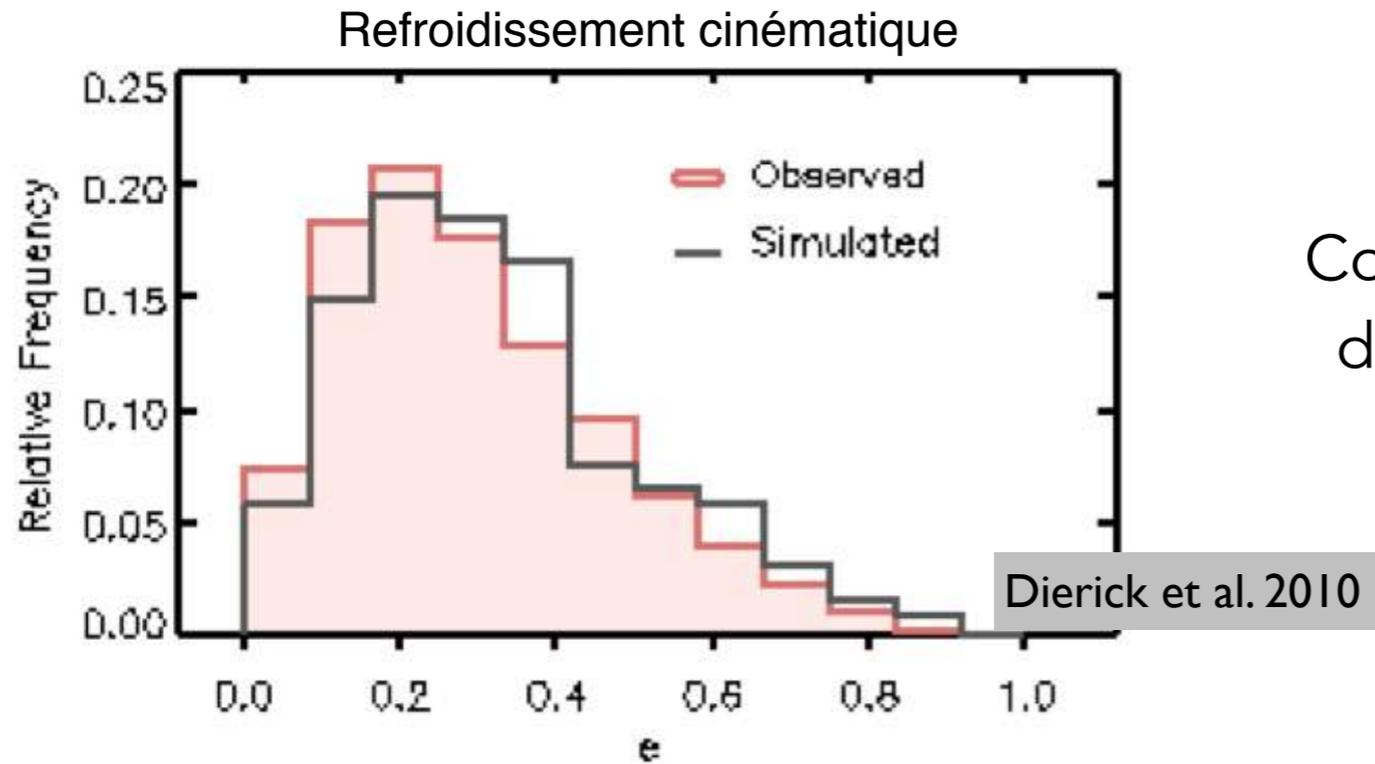
*Apocentre de l'orbite*

$$e = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}}$$

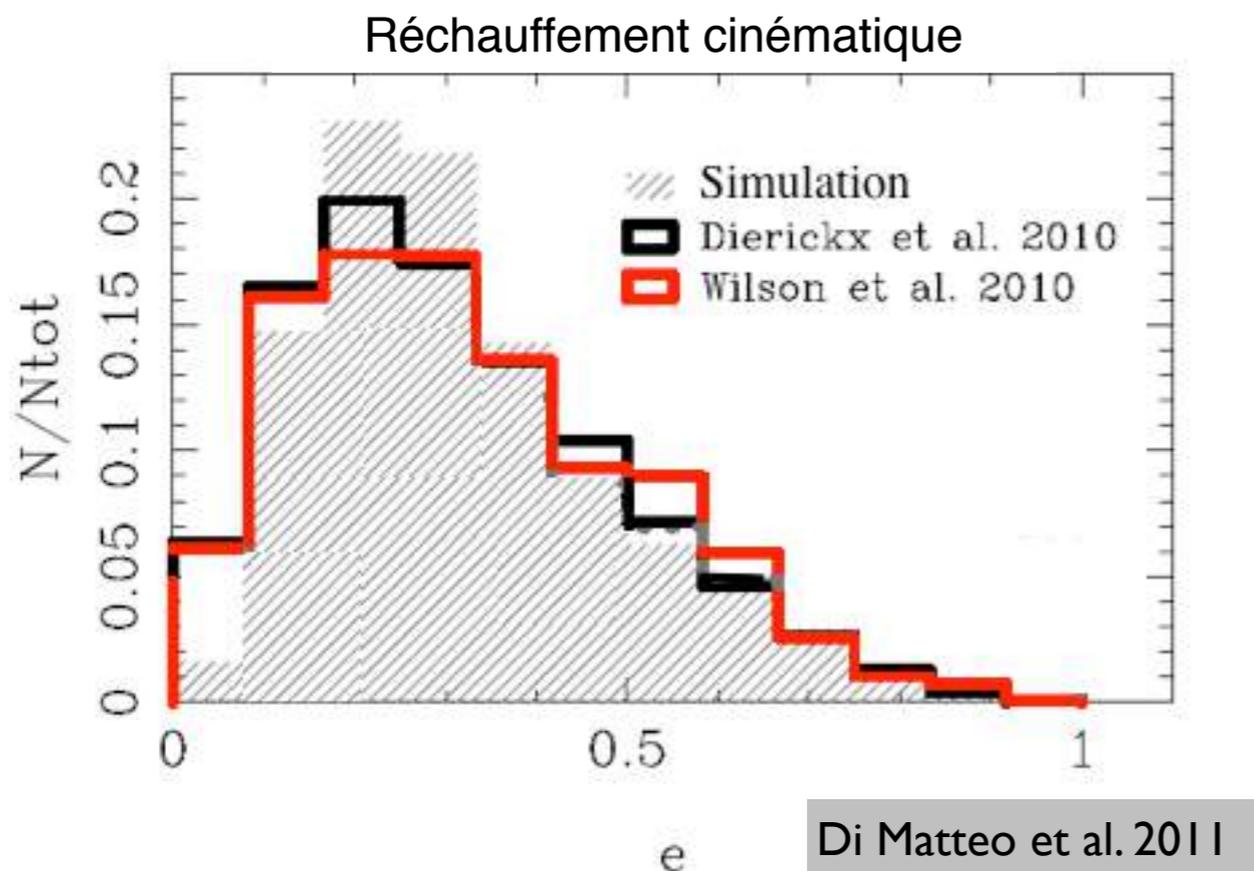
*Pericentre de l'orbite*

Possibilité d'utiliser la distribution des **excentricités** des étoiles du disque épais pour contraindre le mécanisme de sa formation

# LE DISQUE ÉPAIS : COMMENT CONTRAINDRE SON MÉCANISME DE FORMATION ?

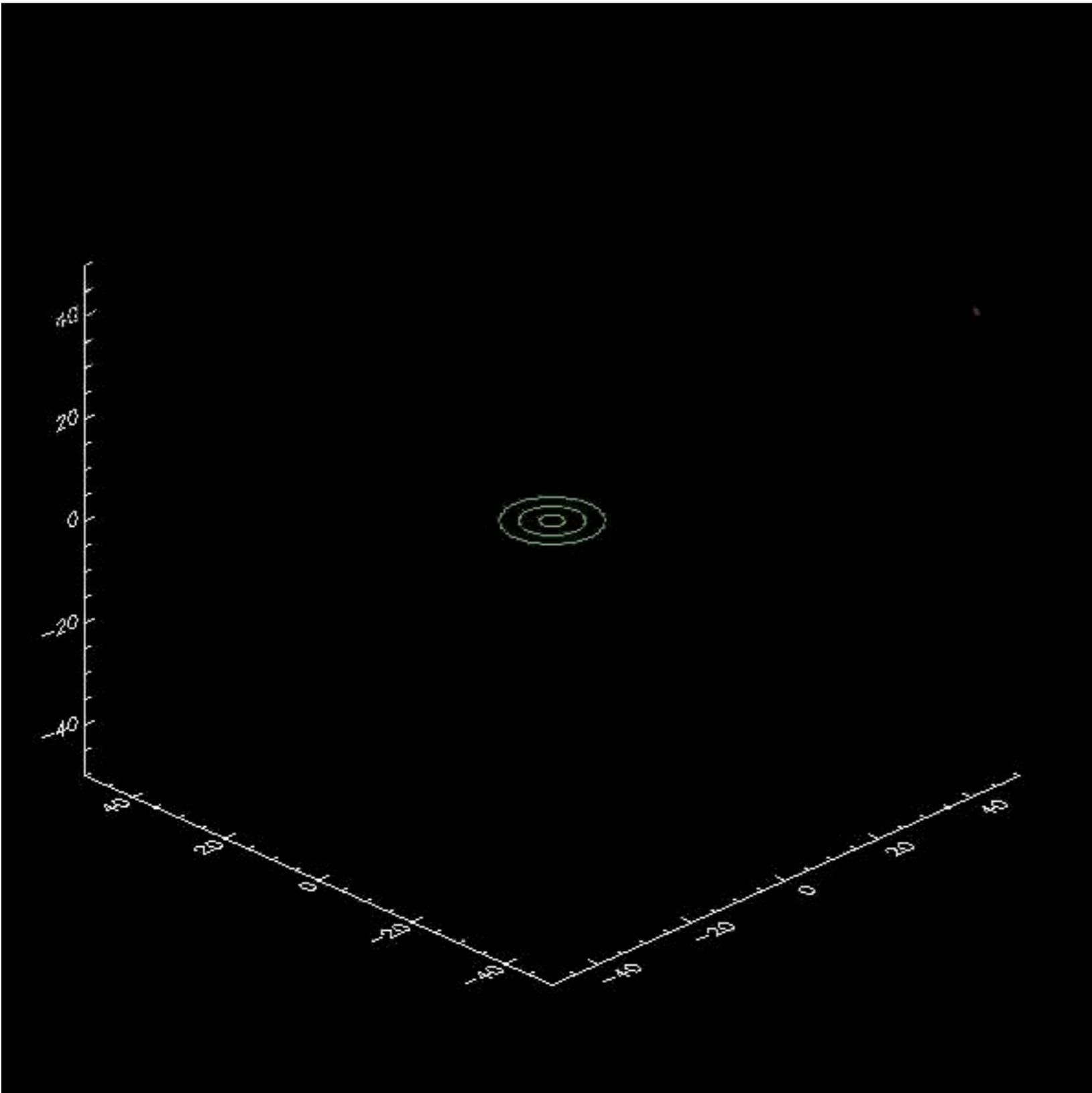


Comparaison des distributions des étoiles de disque épais formé par de différents modèles évolutifs aux données observationnelles (SDSS, RAVE)



La distribution des excentricités des étoiles du disque épais au voisinage solaire est en accord aussi bien avec un scénario de formation du disque épais par réchauffement d'un disque mince qu'avec un scénario de refroidissement d'un disque turbulent

# LA CINÉMATIQUE POUR RECHERCHER LES ACCRÉTIONS PASSÉES



Comment retrouver  
ces anciens  
satellites, une fois  
dispersés dans la  
Voie Lactée et  
mélangés aux  
étoiles de champs ?

# LA CINÉMATIQUE POUR RECHERCHER LES ACCRÉTIONS PASSÉES: LES ESPACES DES INTEGRALES DU MOUVEMENT

TEMPS INITIAL

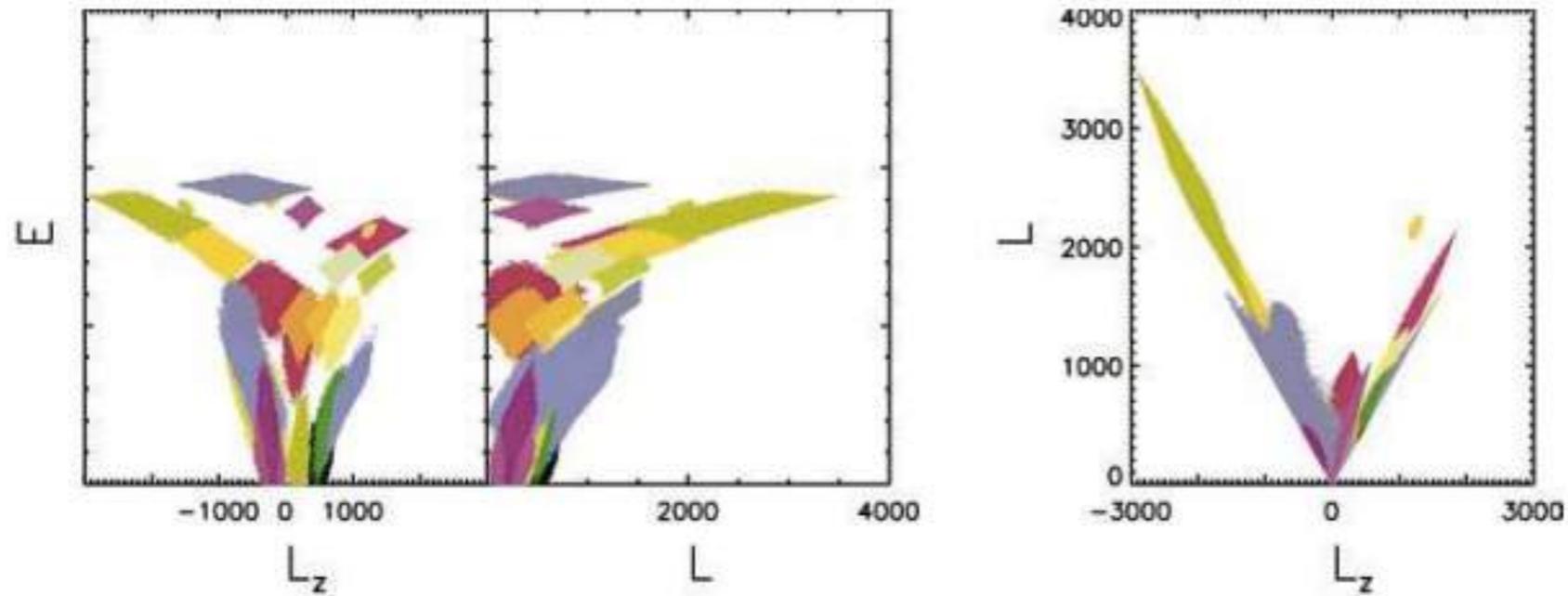
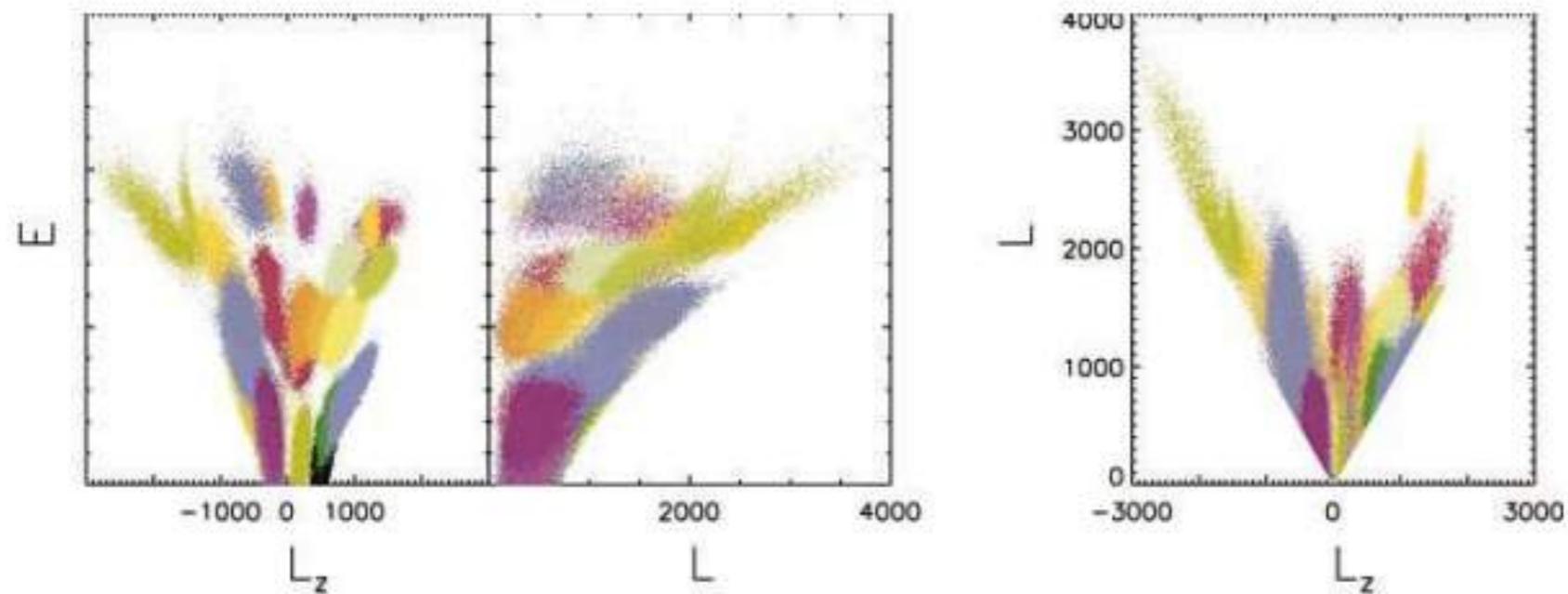


Figure 3. Initial distribution of particles in the integrals of motion space. The different colours represent different satellites.

TEMPS FINAL

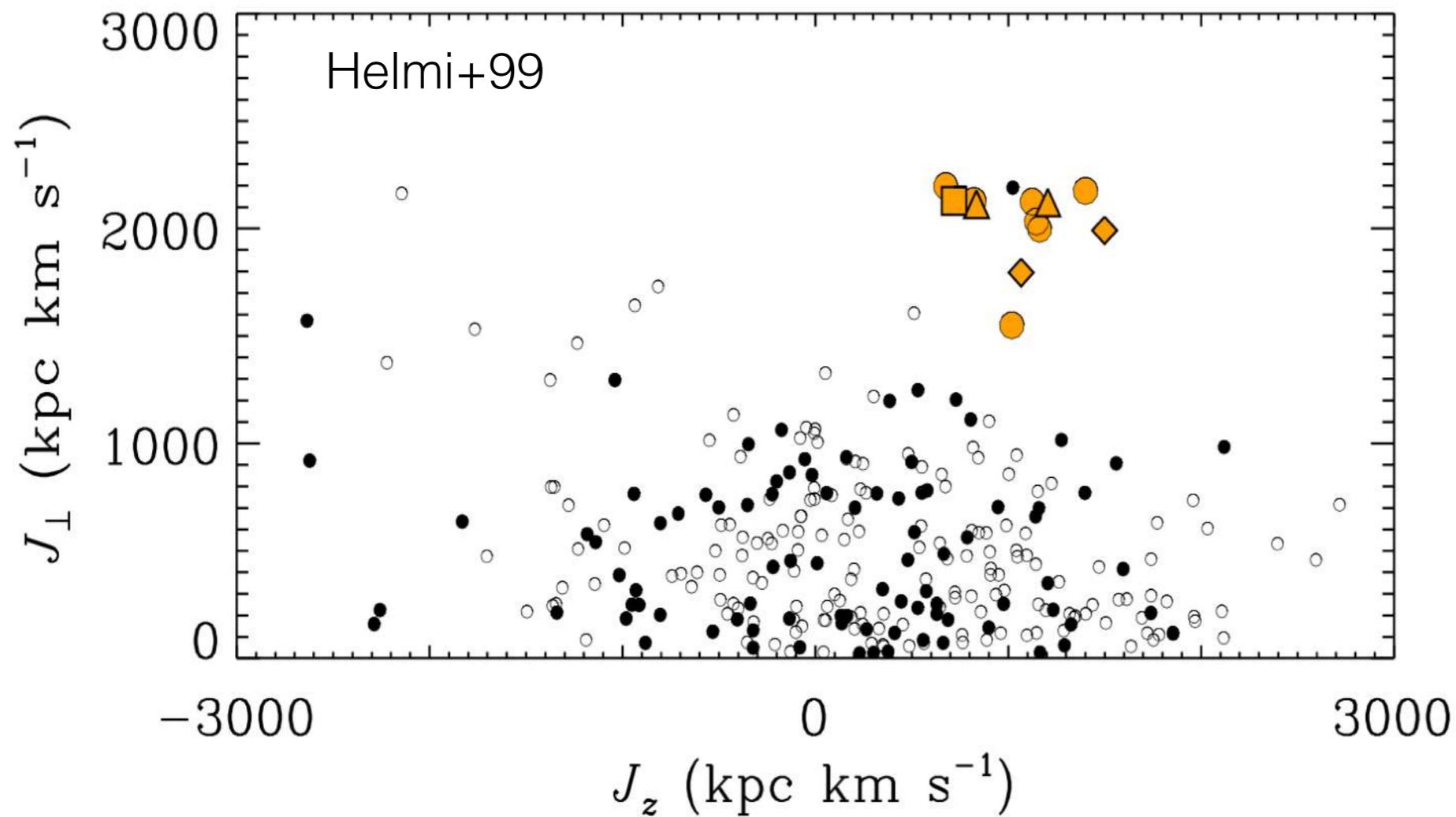


Helmi & de Zeeuw  
2000 :

Les surdensités dans l'espace des intégrales du mouvements sont maintenues, même une fois le satellite complètement déchiré par effets de marée

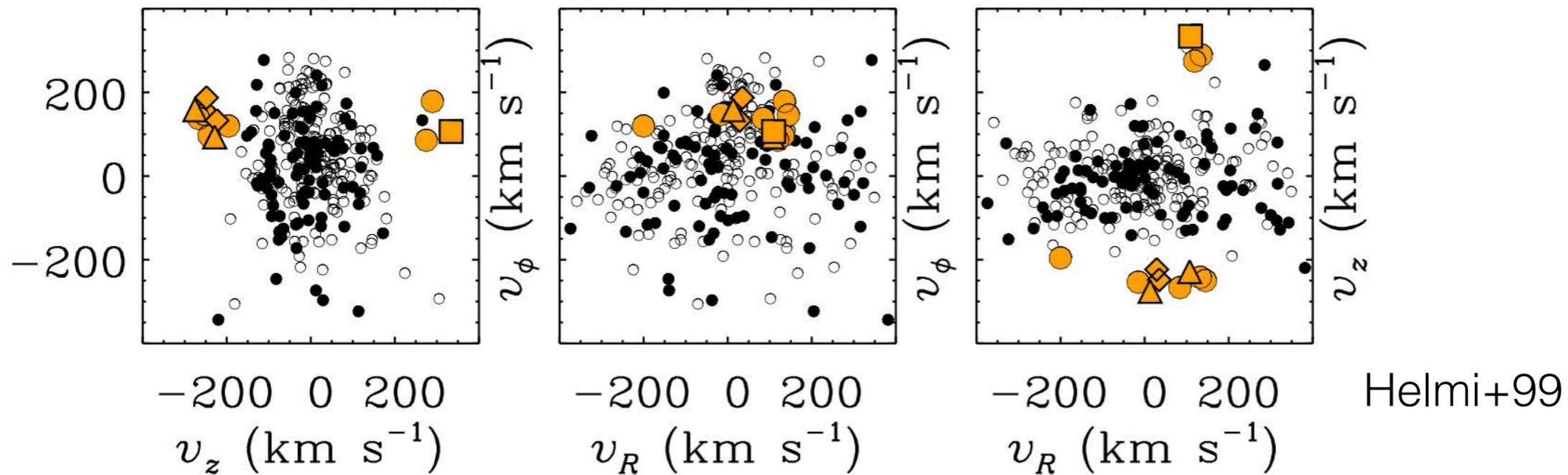
voir revue de Martin Smith, 2016  
"Kinematically Detected Halo Streams"

# LA CINÉMATIQUE POUR RECHERCHER LES ACCRÉTIONS PASSÉES: LE *STREAM* DE HELMI



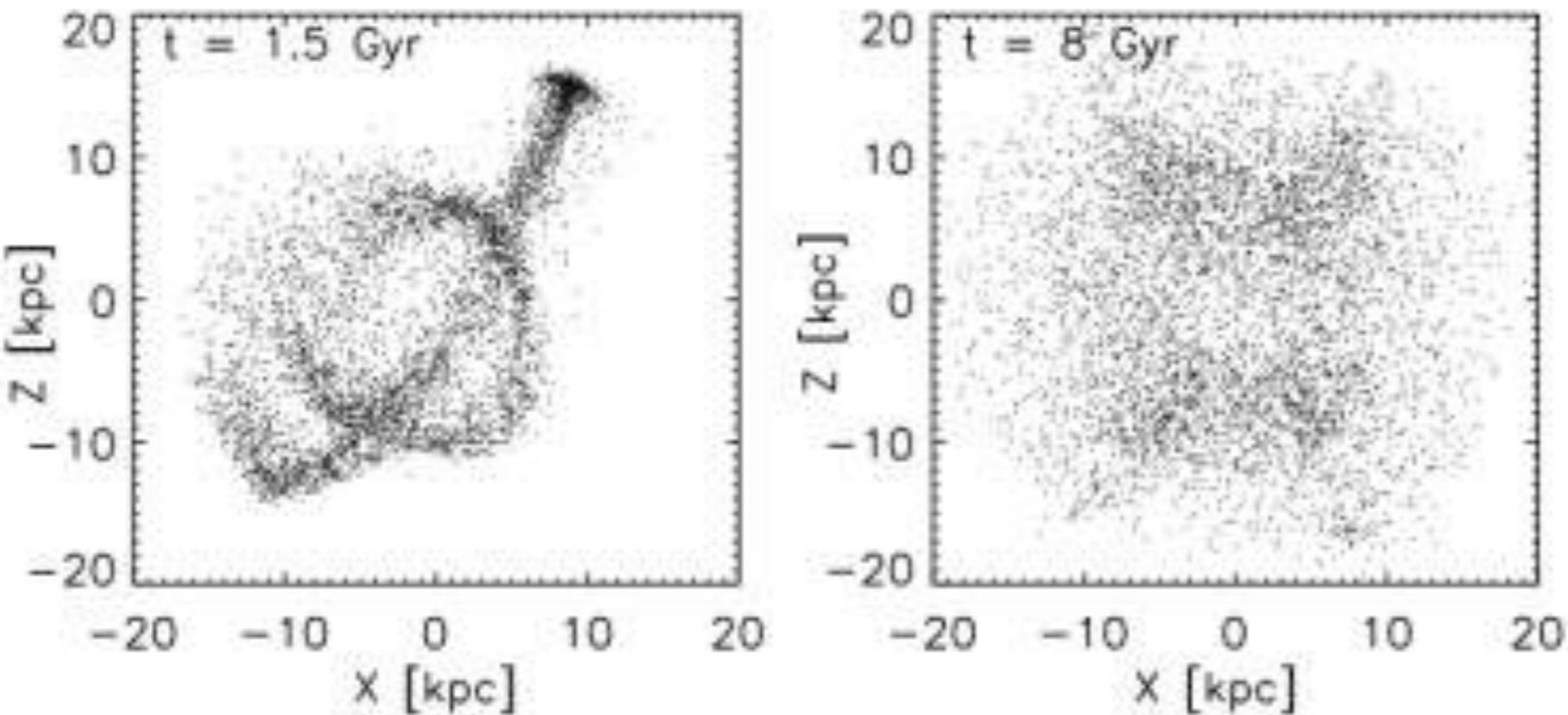
Surdensité  
d'étoiles au  
voisinage solaire  
dans l'espace  
du moment  
angulaire

# LA CINÉMATIQUE POUR RECHERCHER LES ACCRÉTIONS PASSÉES: LE *STREAM* DE HELMI



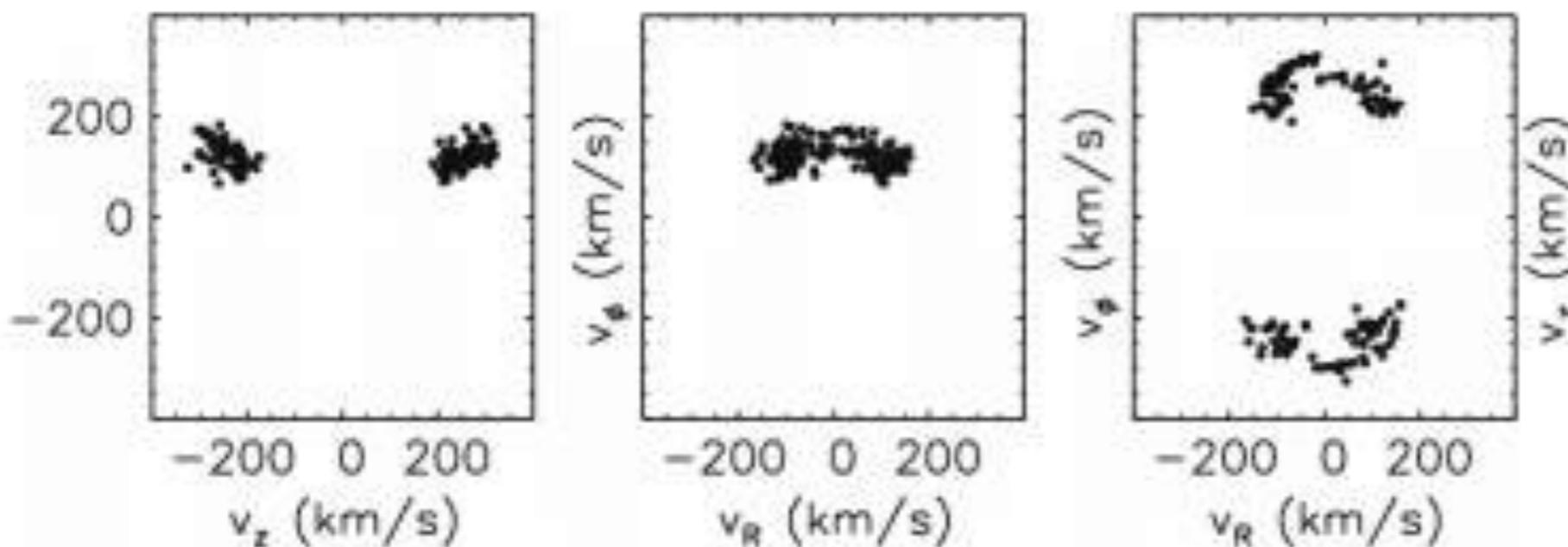
Vitesse des étoiles dans le *stream* de Helmi

# LA CINÉMATIQUE POUR RECHERCHER LES ACCRÉTIONS PASSÉES: LE *STREAM* DE HELMI

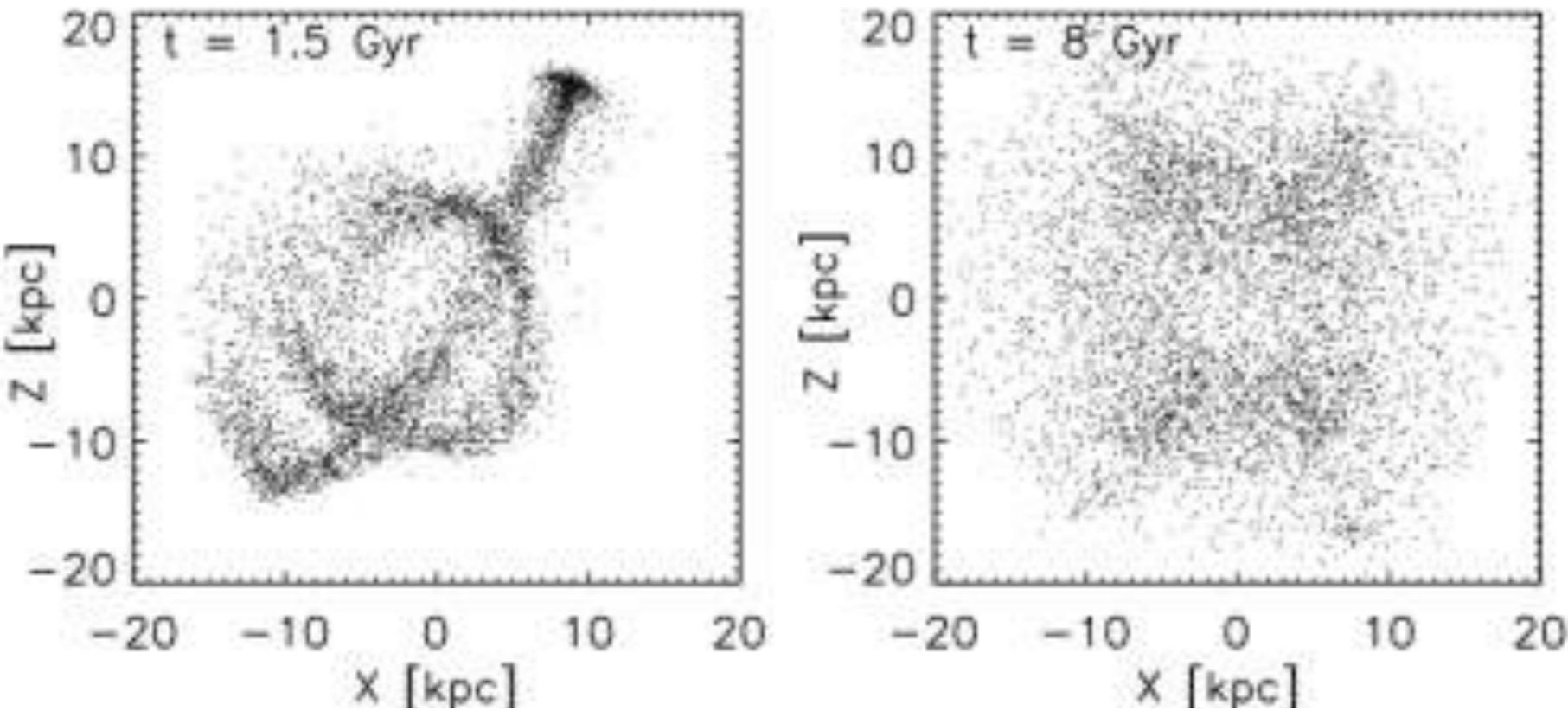


Helmi+99

Les étoiles du *stream* appartenaient à un satellite de masse  $\sim 10^8$  MSun accrété dans la VL il y a 8 Gyr environ.

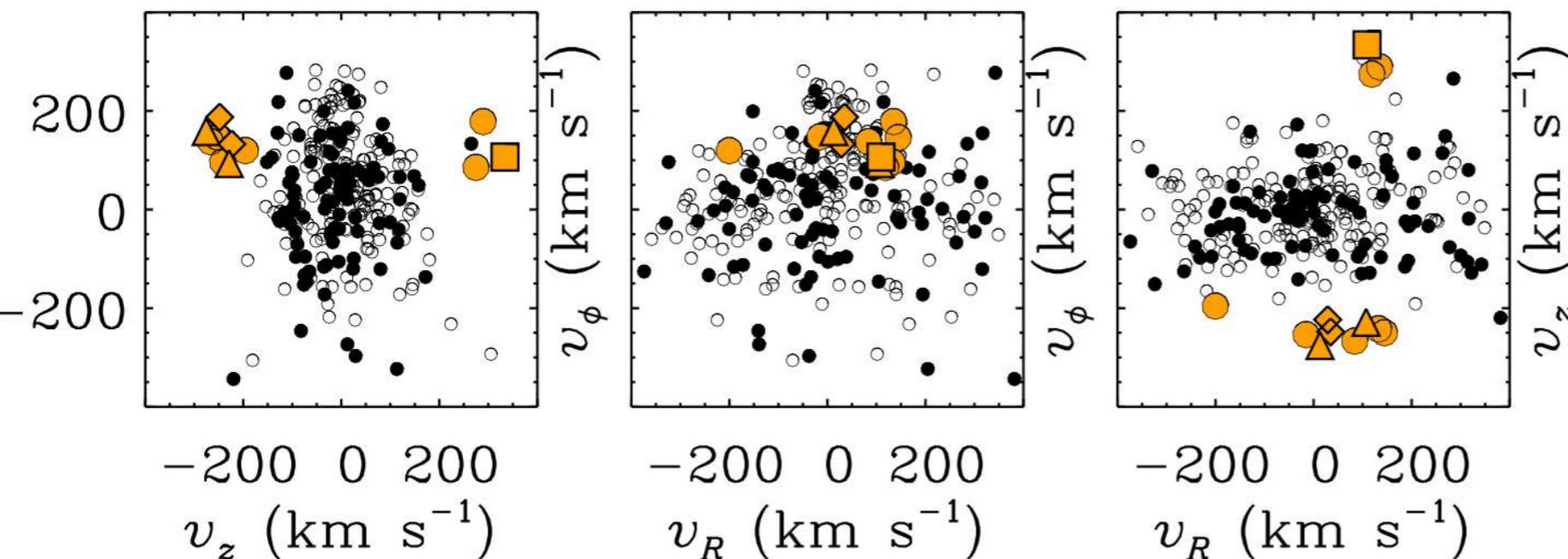


# LA CINÉMATIQUE POUR RECHERCHER LES ACCRÉTIONS PASSÉES: LE *STREAM* DE HELMI

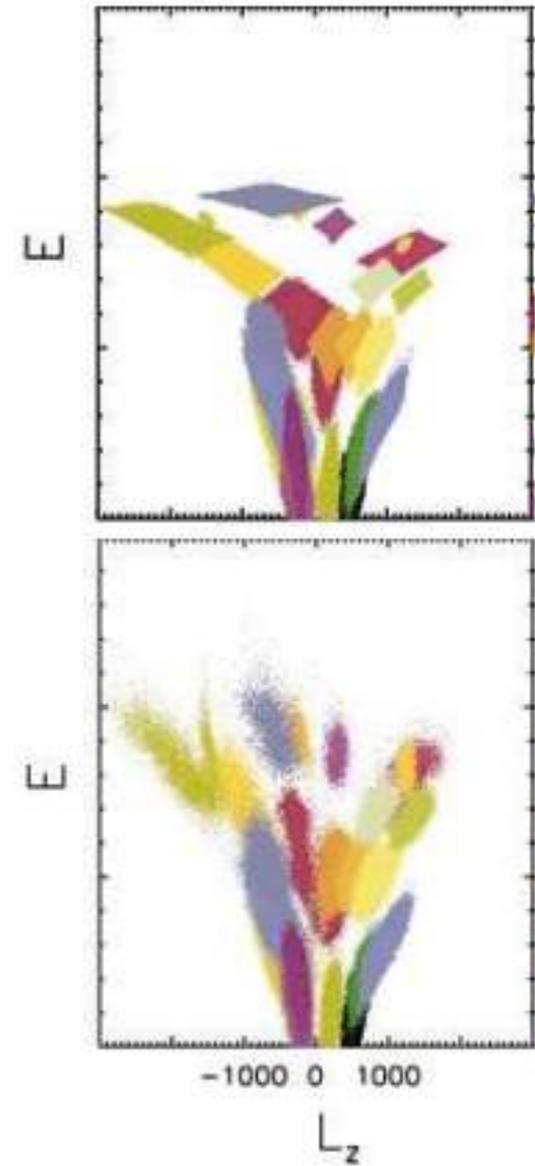


Helmi+99

Les étoiles du *stream* appartenaient à un satellite de masse  $\sim 10^8$  MSun accrété dans la VL il y a 8 Gyr environ.

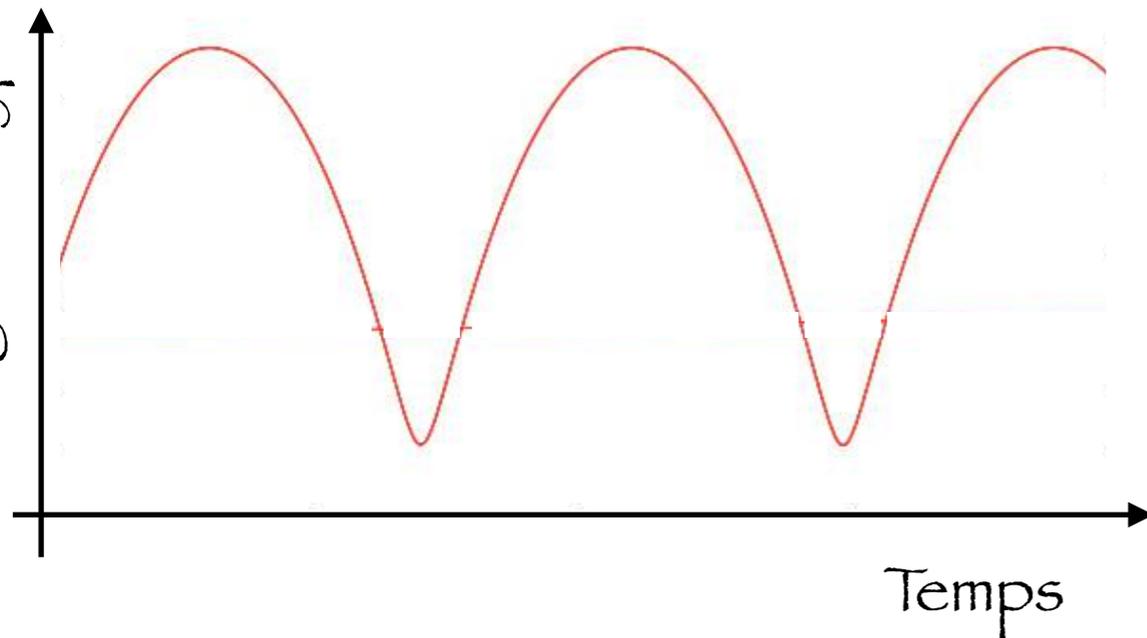


# LA CINÉMATIQUE POUR RECHERCHER LES ACCRÉTIONS PASSÉES: EFFETS DE LA FRICTION DYNAMIQUE



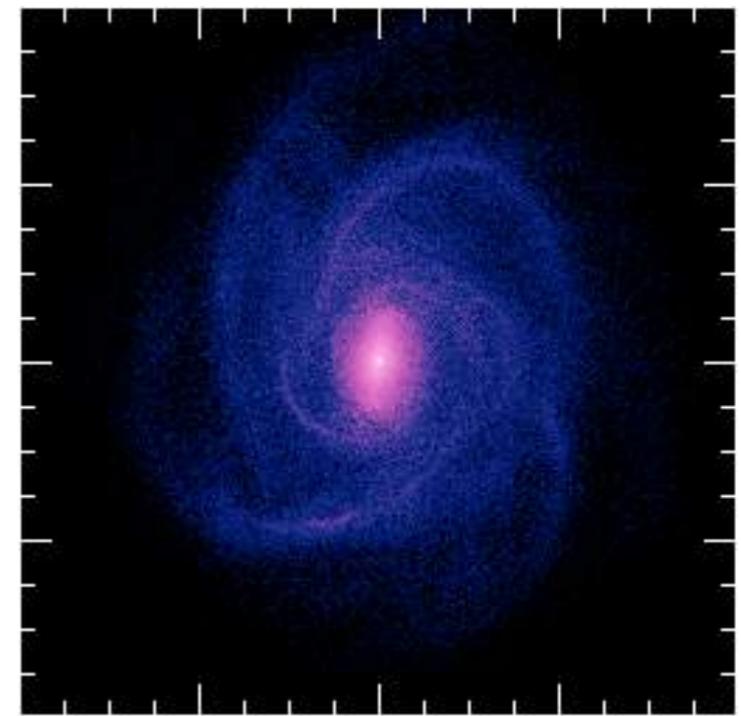
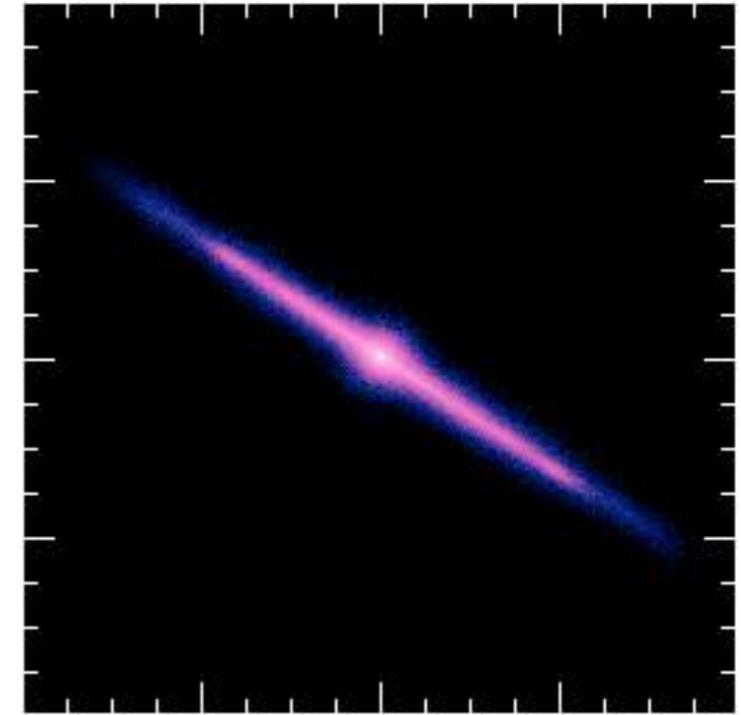
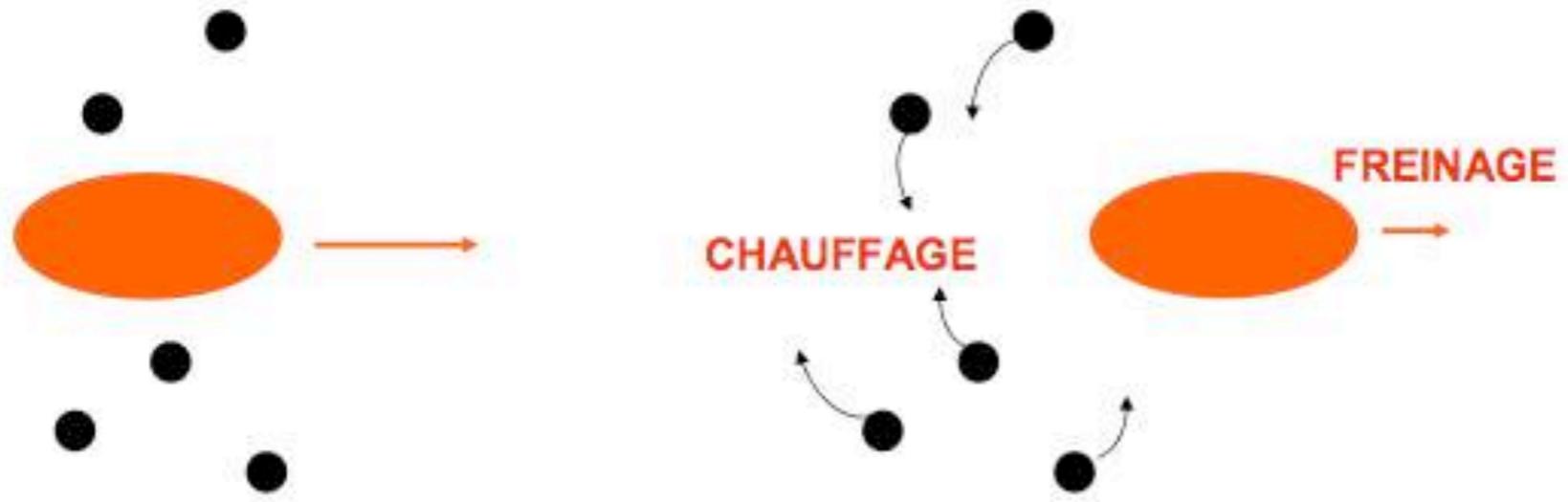
Distance entre le satellite

et la galaxie type VL



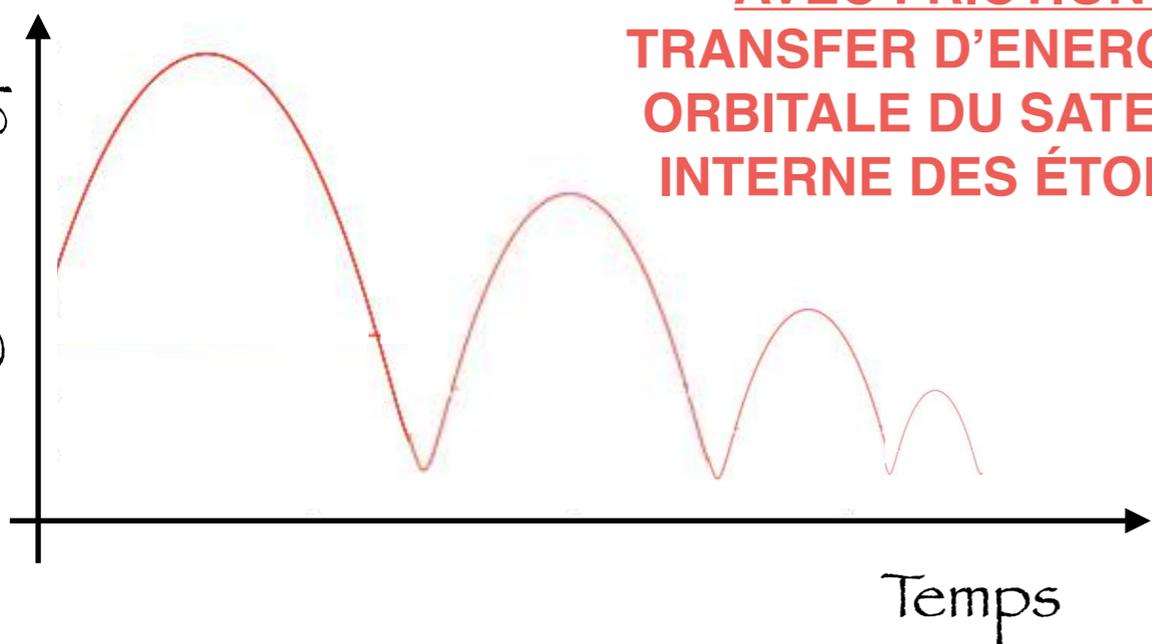
**SANS FRICTION DYNAMIQUE:  
PAS DE TRANSFERT D'ENERGIE.  
LE SATELLITE CONTINUE À OSCILLER ENTRE  
UN PERICENTRE ET UN APOCENTRE, À  
ENERGIE ORBITALE CONSTANTE.**

# LA CINÉMATIQUE POUR RECHERCHER LES ACCRÉTIONS PASSÉES: EFFETS DE LA FRICTION DYNAMIQUE



Distance entre le satellite

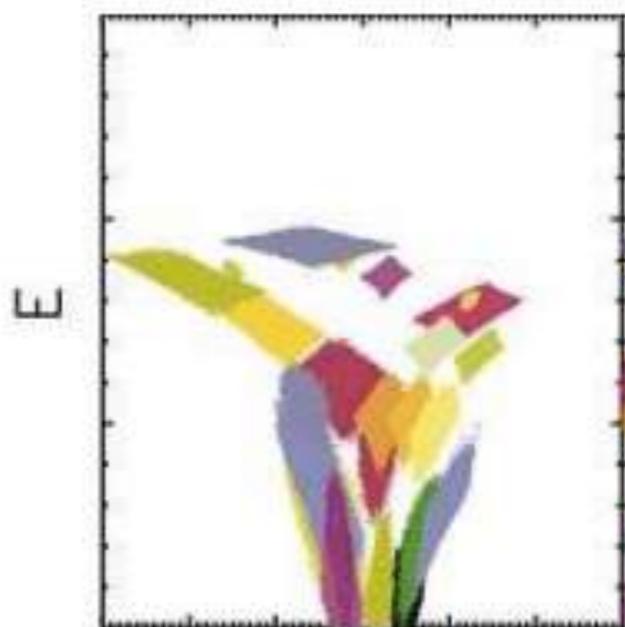
et la galaxie type VL



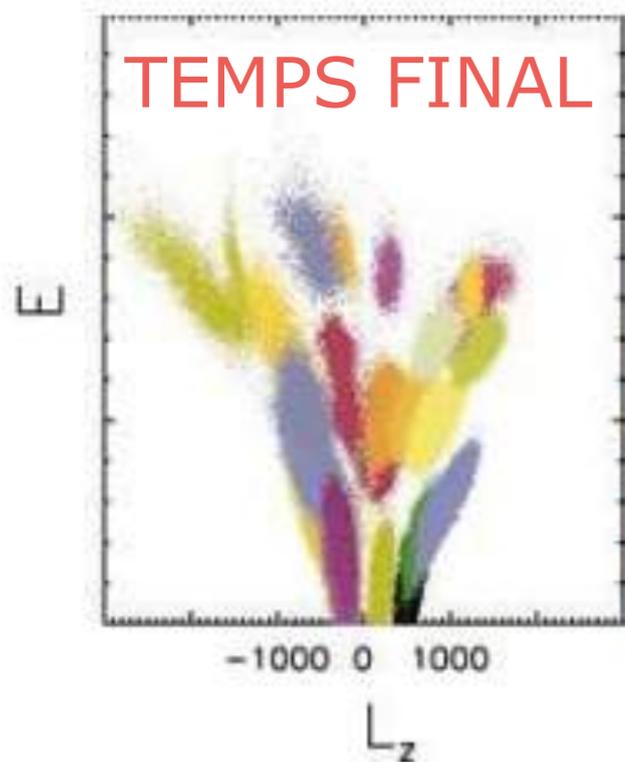
**AVEC FRICTION DYNAMIQUE :**  
**TRANSFER D'ENERGIE. DE L'ENERGIE**  
**ORBITALE DU SATELLITE À ENERGIE**  
**INTERNE DES ÉTOILES DE CHAMPS**

# LA CINÉMATIQUE POUR RECHERCHER LES ACCRÉTIIONS PASSÉES: EFFETS DE LA FRICTION DYNAMIQUE

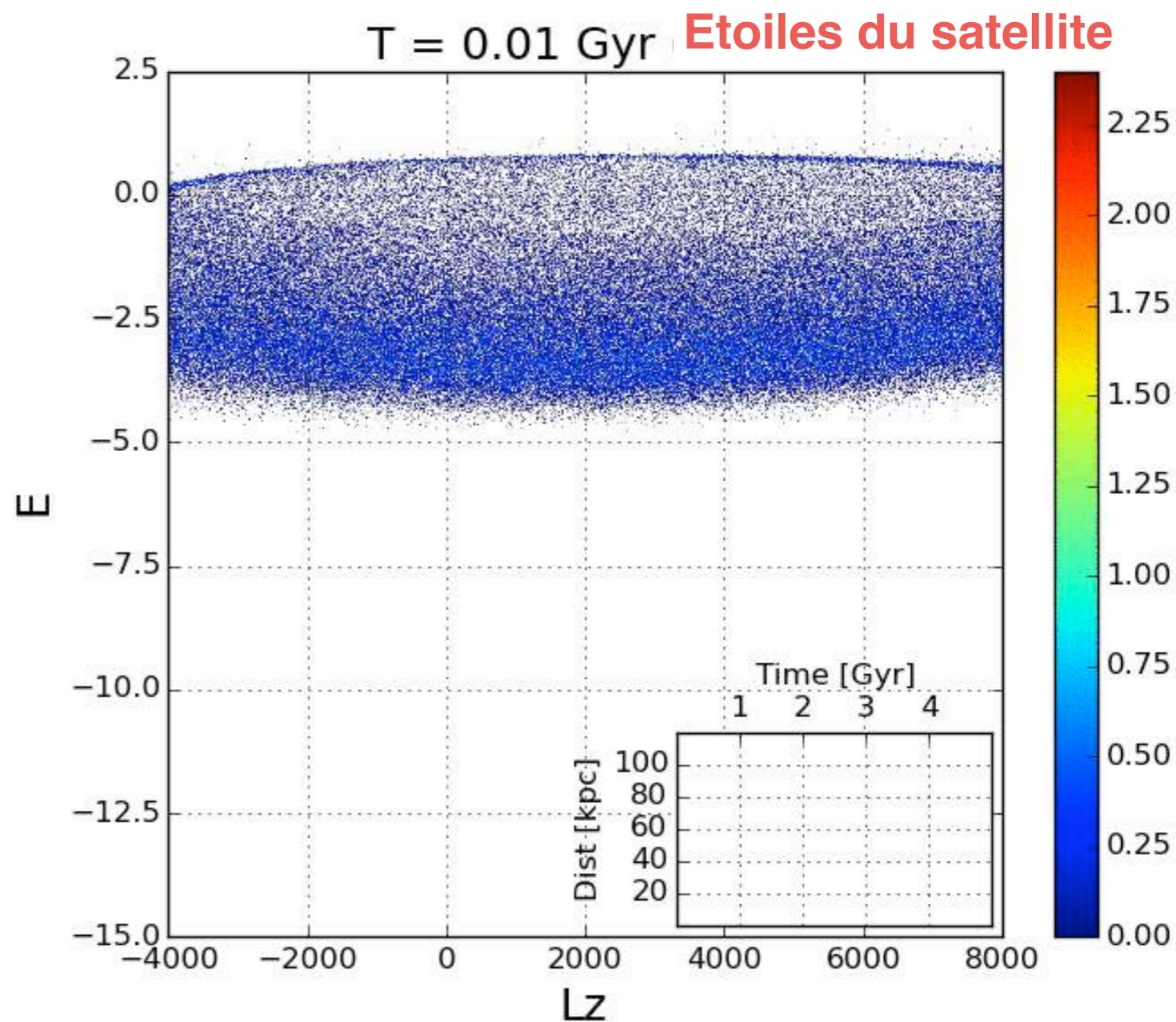
TEMPS INITIAL



TEMPS FINAL

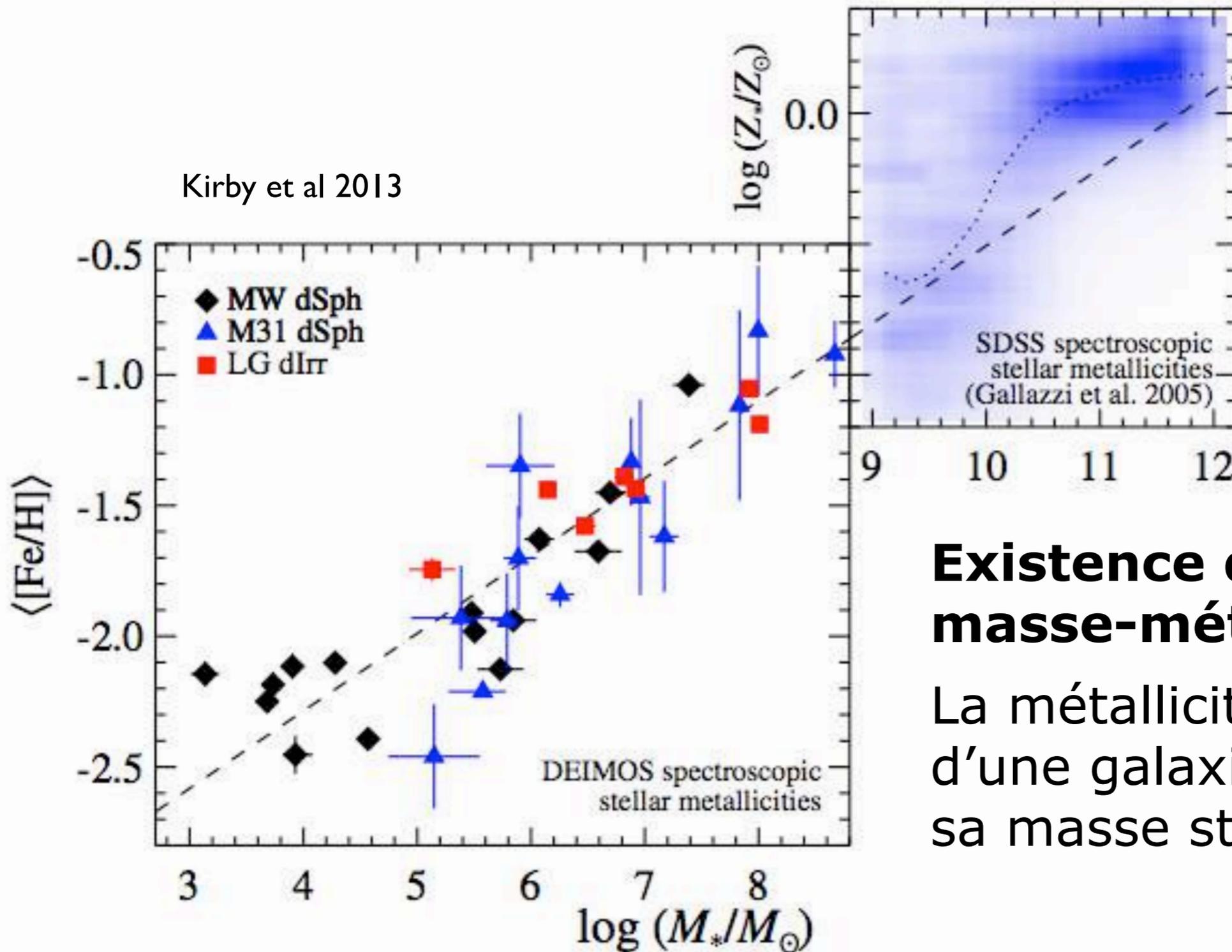


Helmi & de Zeeuw 2000



Credit : I. Jean-Baptiste, PhD Thesis

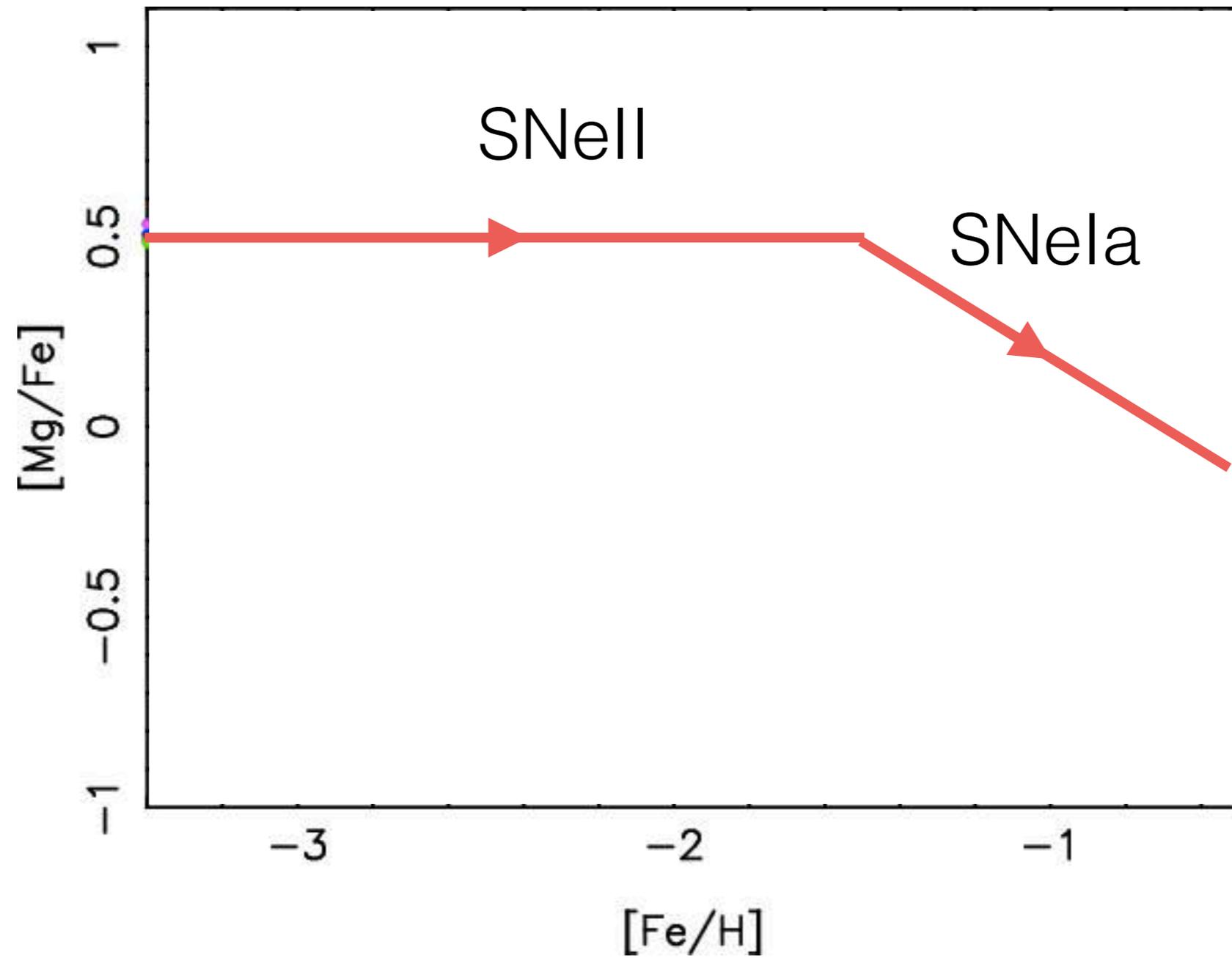
# ET SI ON UTILISAIT LES ABONDANCES CHIMIQUES ?



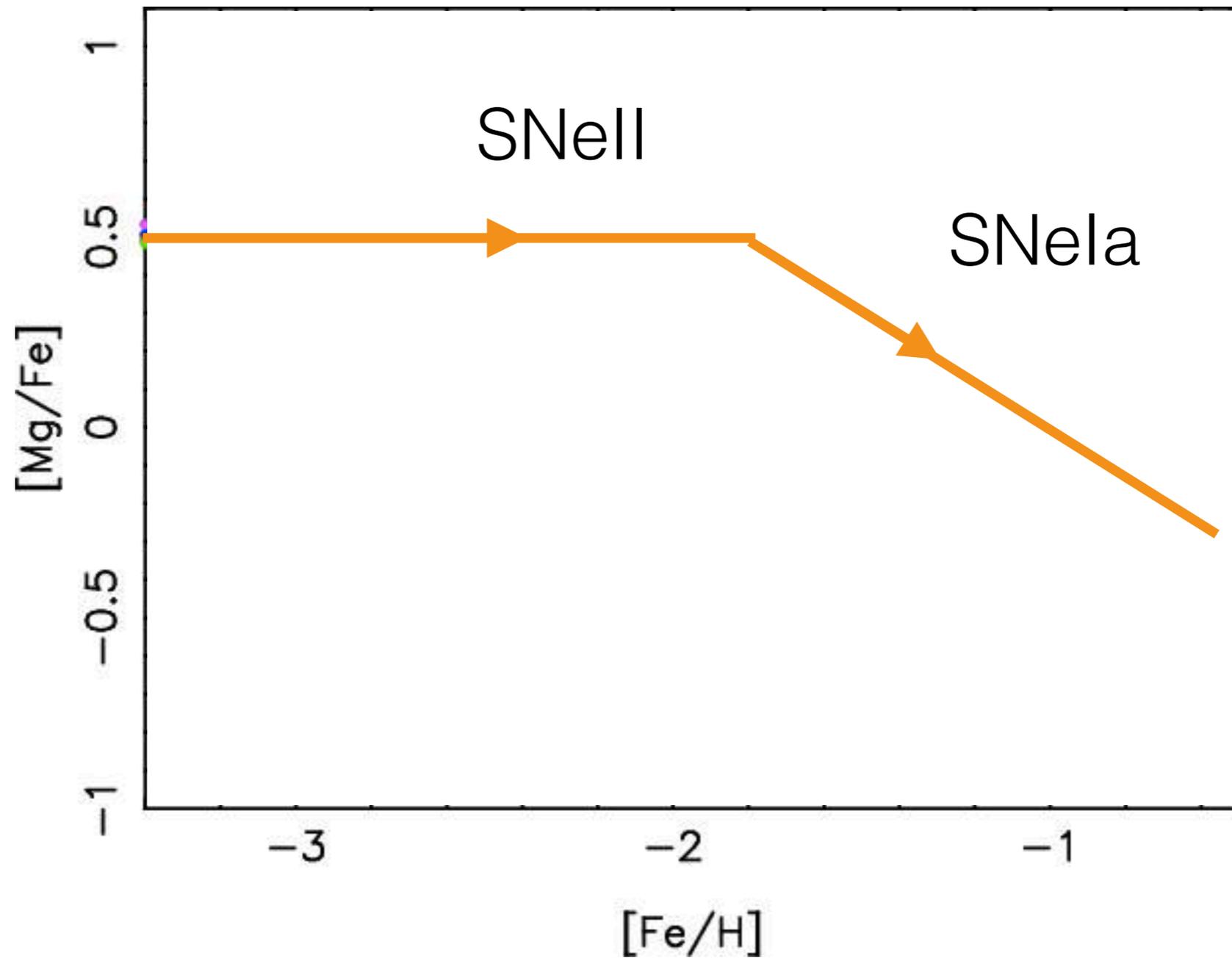
**Existence d'une relation masse-métallicité:**

La métallicité moyenne d'une galaxie corrèle avec sa masse stellaire

ET SI ON UTILISAIT LES ABONDANCES CHIMIQUES ?

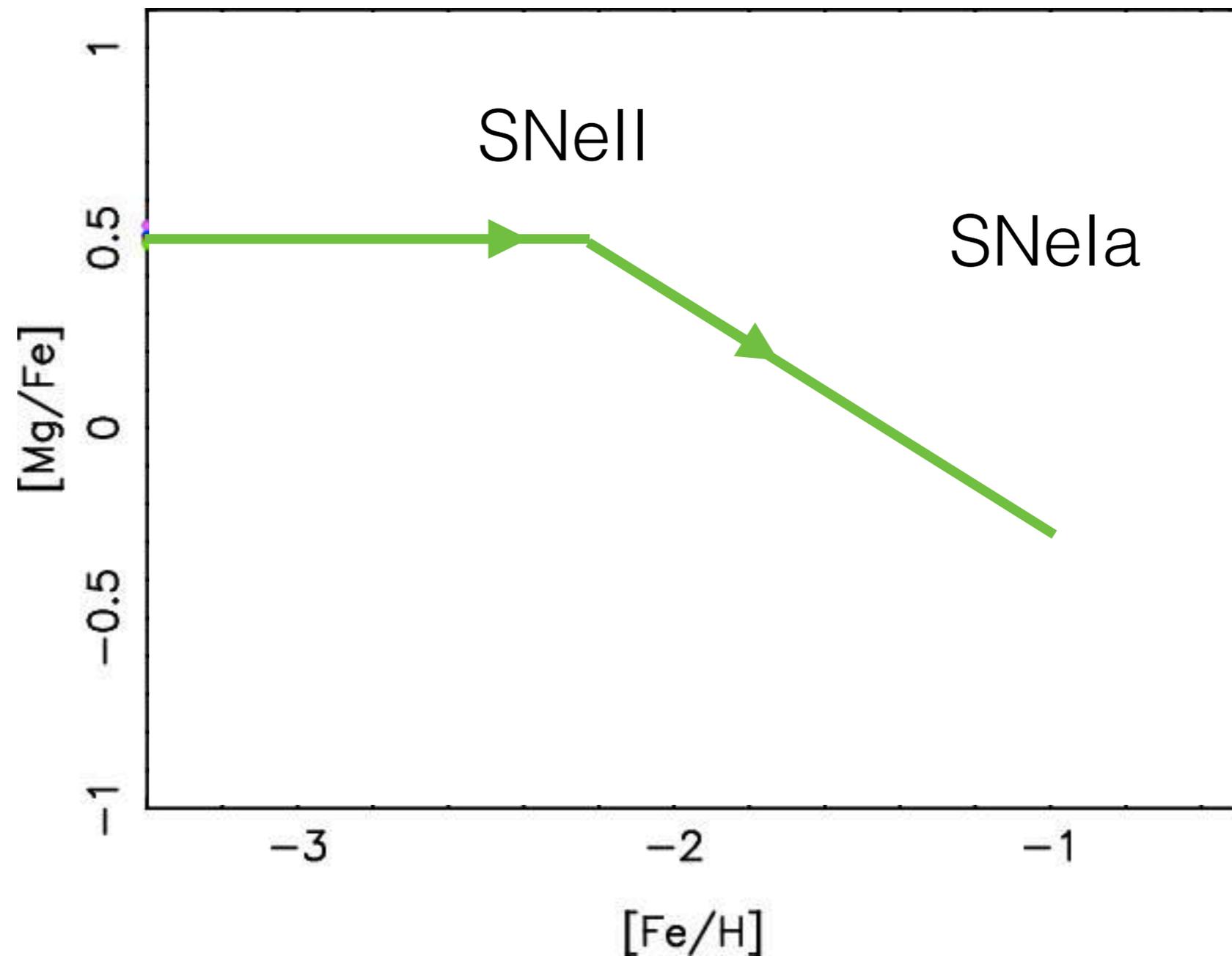


# ET SI ON UTILISAIT LES ABONDANCES CHIMIQUES ?



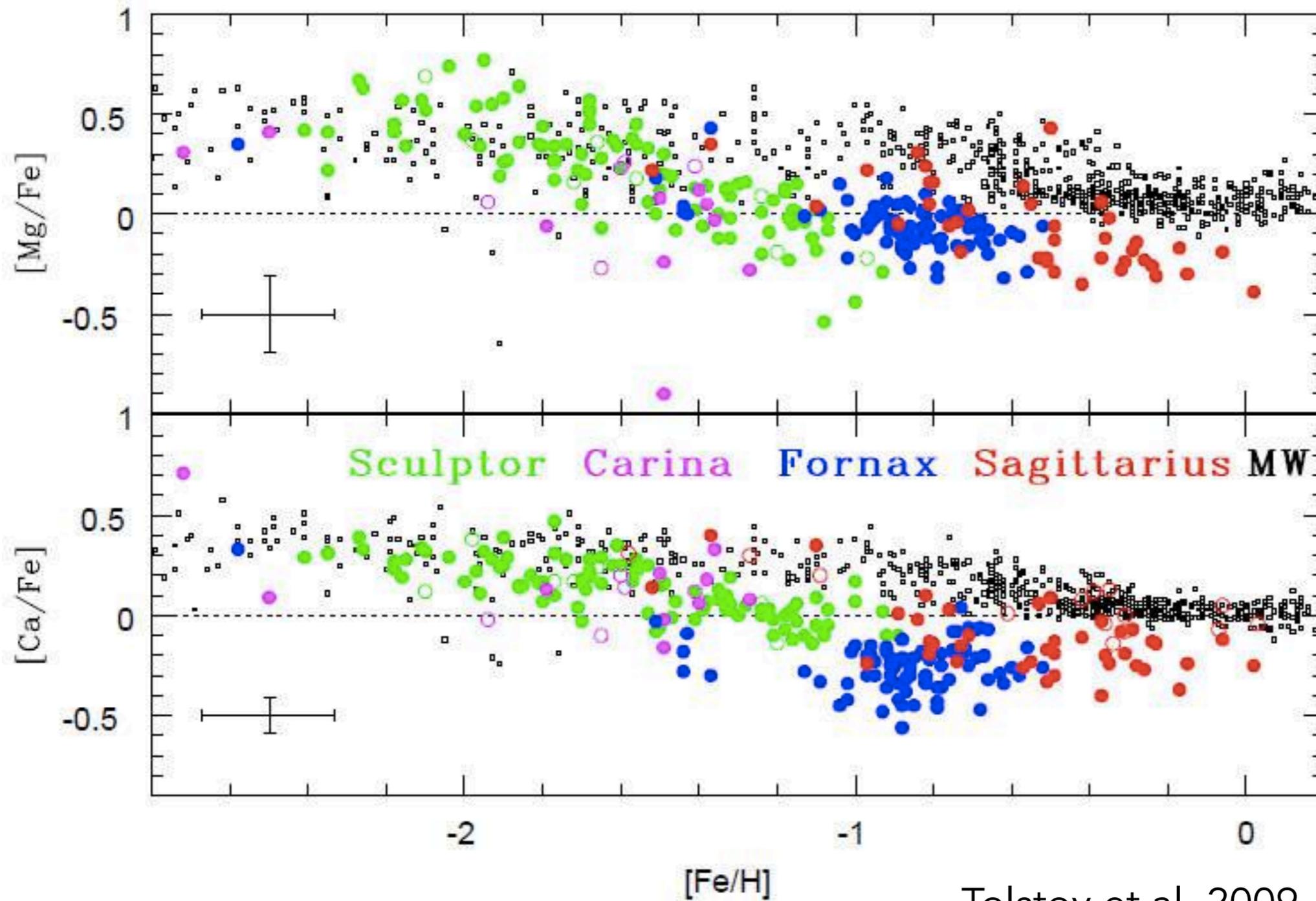
Moins une galaxie est massive, plus le genoux dans la relation se déplace vers des rapports  $[Fe/H]$  petits

# ET SI ON UTILISAIT LES ABONDANCES CHIMIQUES ?



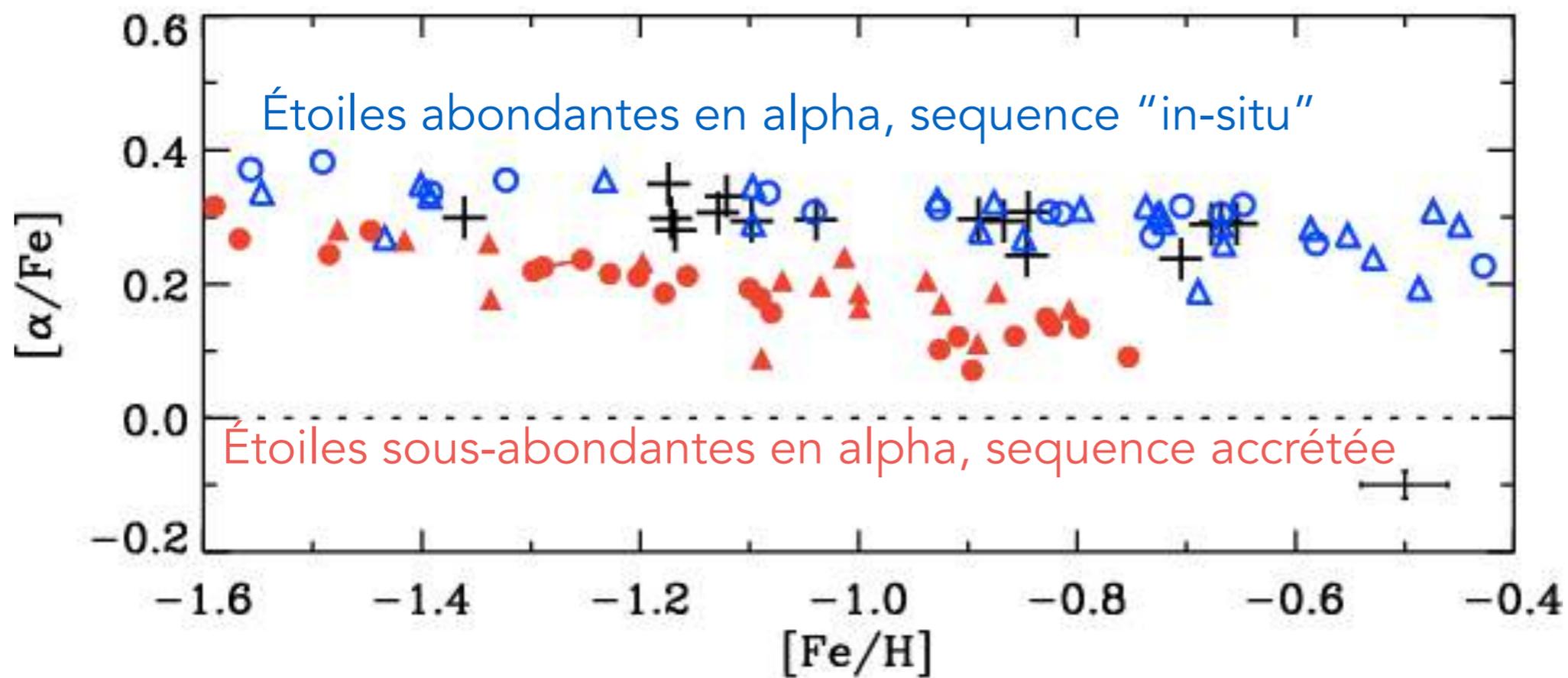
Moins une galaxie est massive, plus le genoux dans la relation se déplace vers des rapports  $[Fe/H]$  petits

# ET SI ON UTILISAIT LES ABONDANCES CHIMIQUES ?



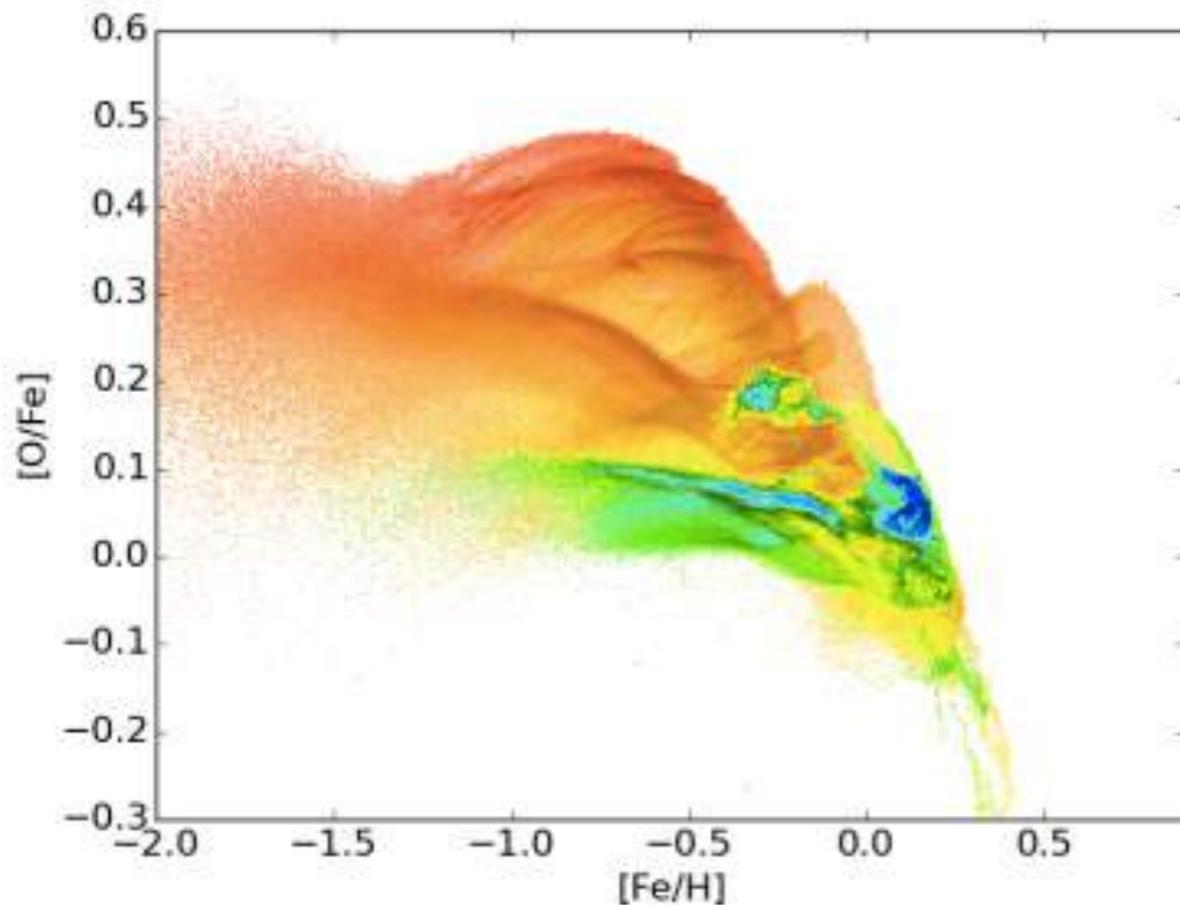
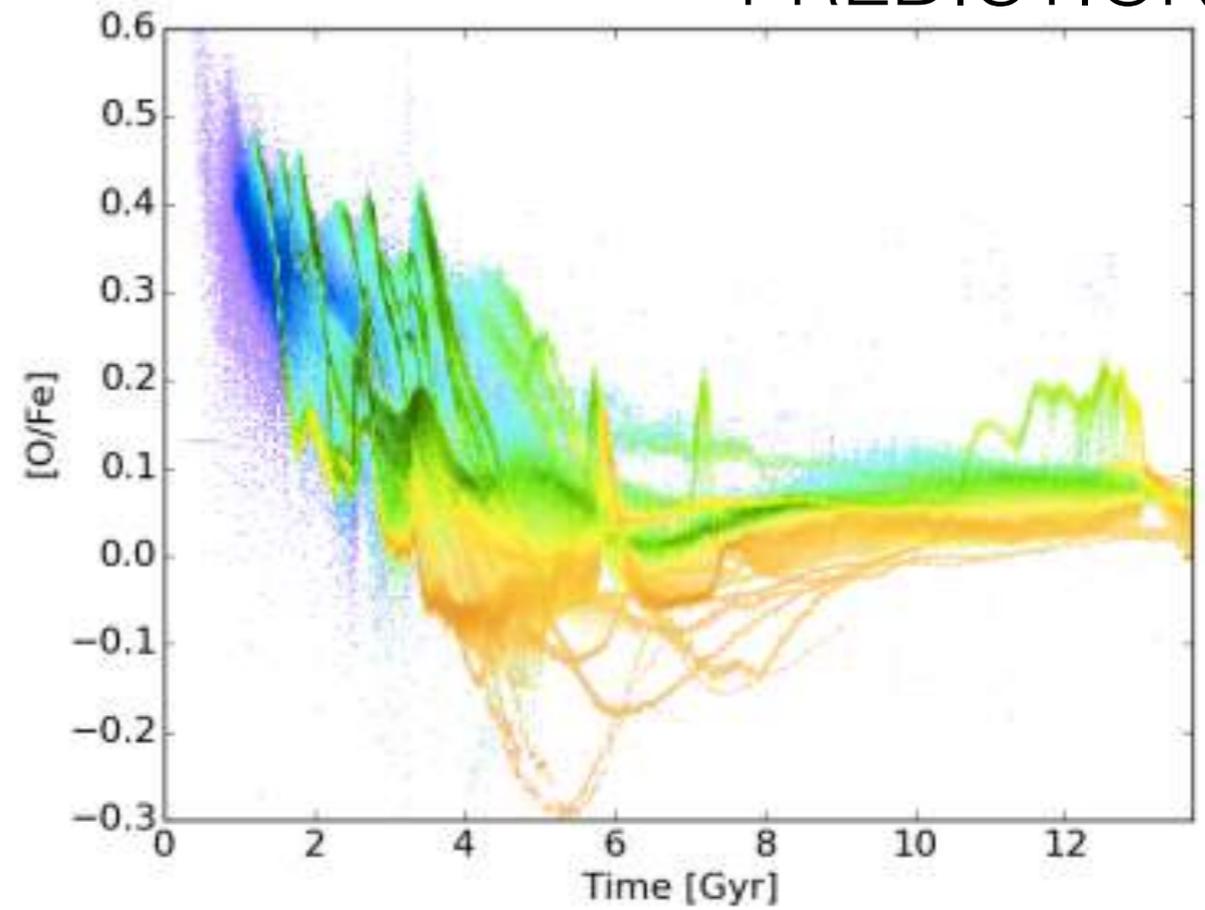
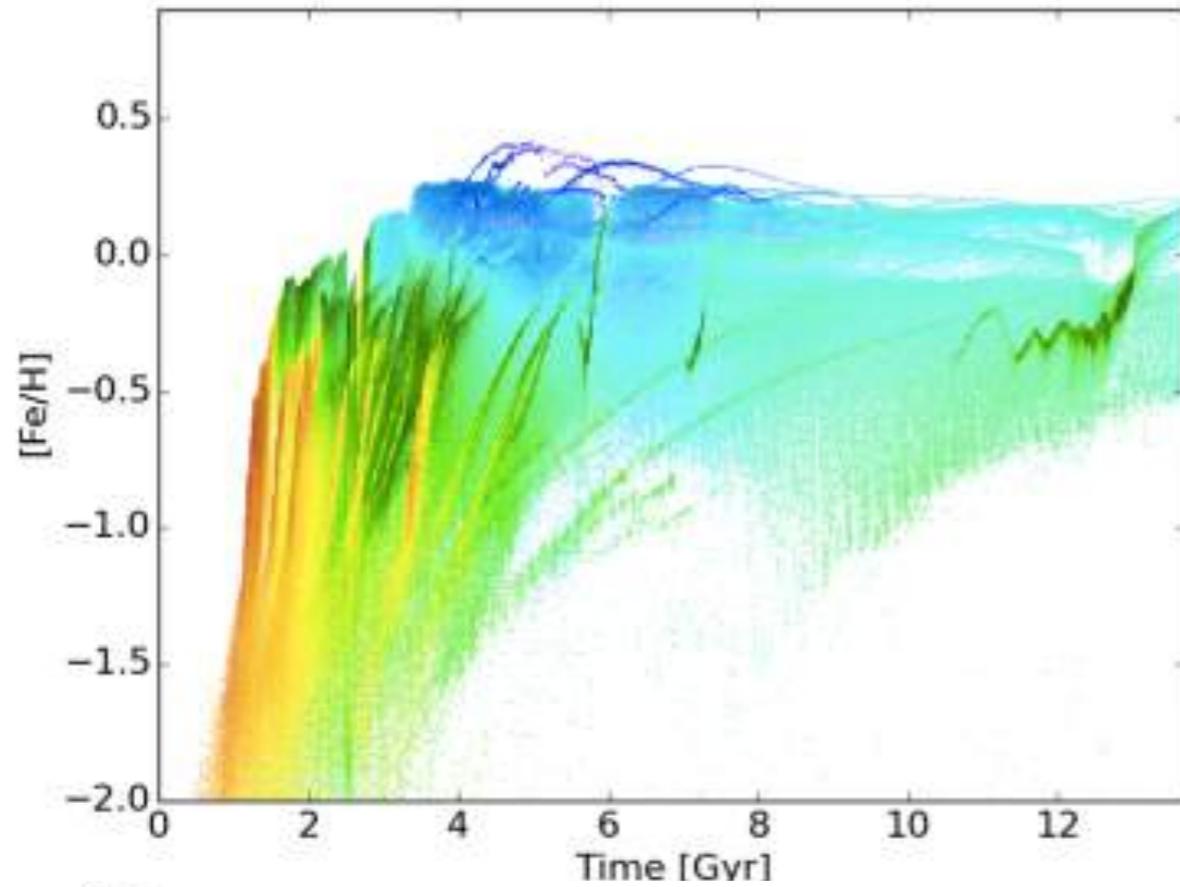
Tolstoy et al, 2009

VOISINAGE SOLAIRE :  
ÉVIDENCE D'ÉTOILES ACCRÉTÉES  
SUR LA BASE DE LEURS ABONDANCES CHIMIQUES



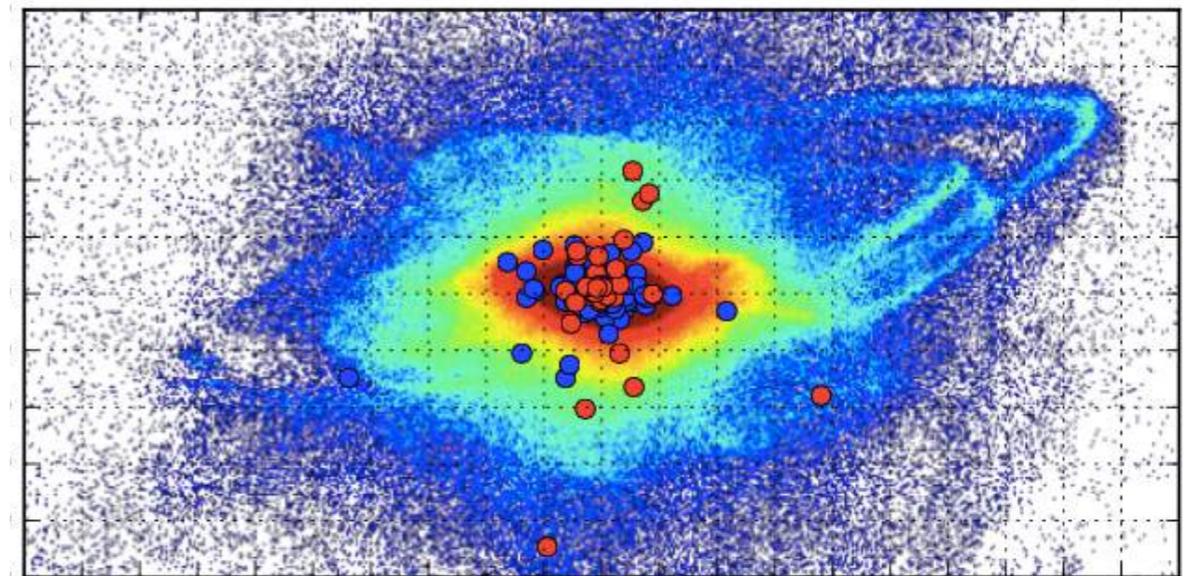
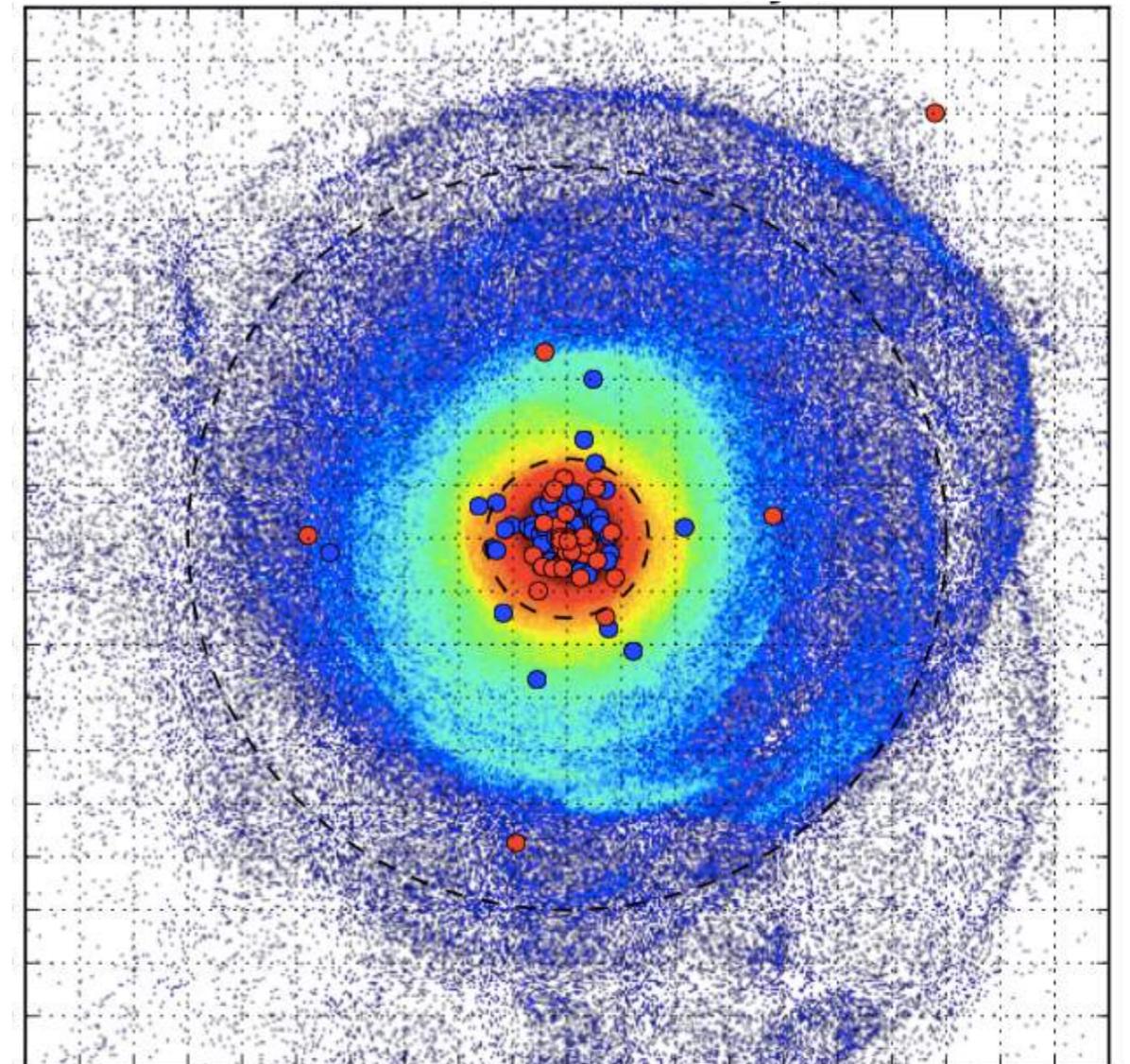
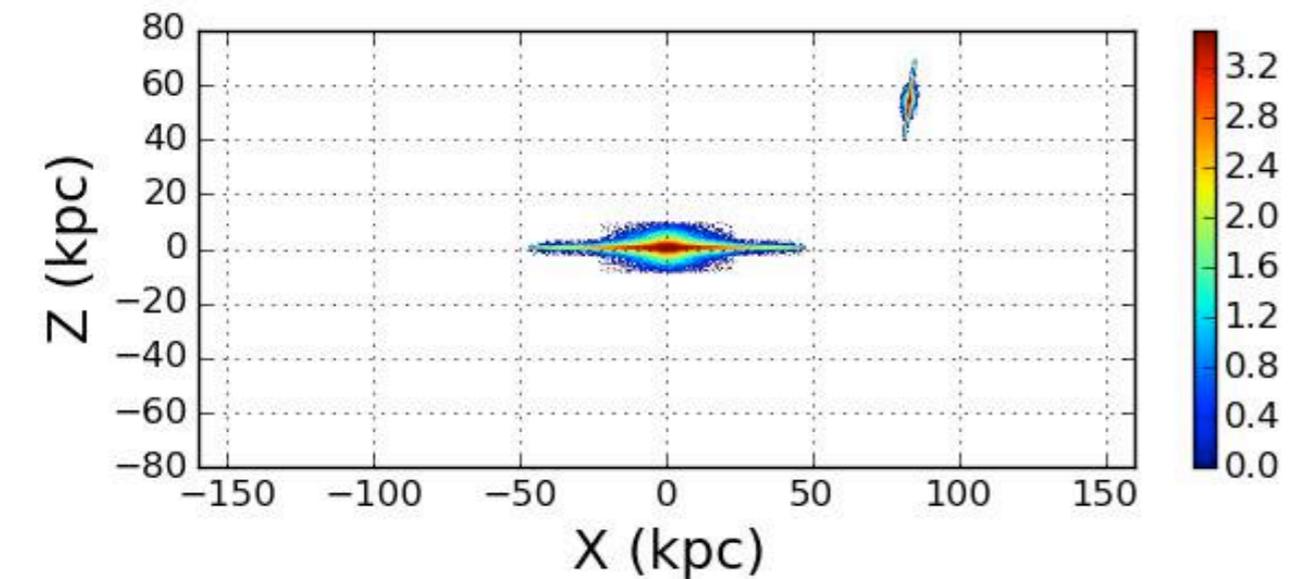
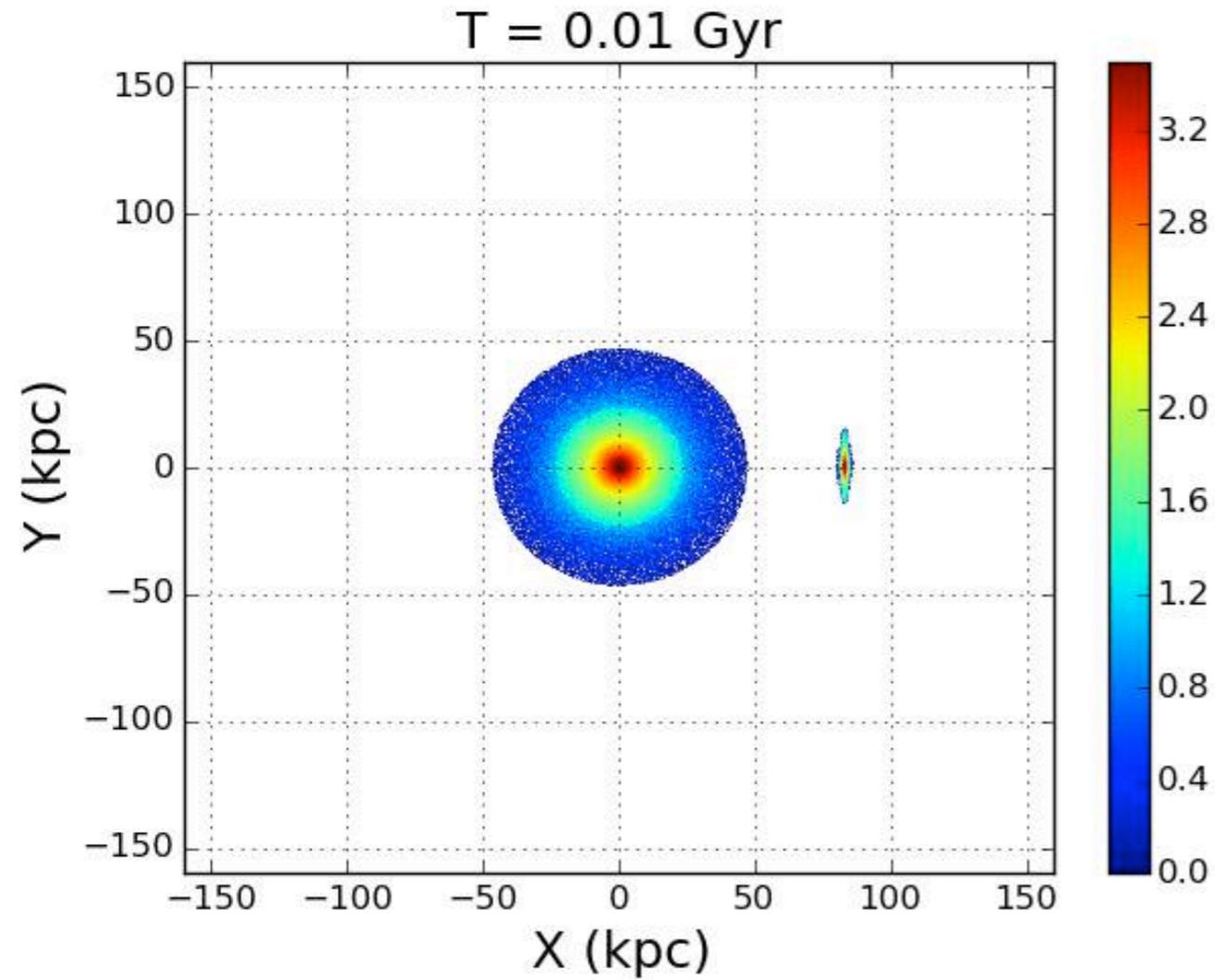
Nissen & Schuster, 2010

# ÉCHELLE GALACTIQUE: PRÉDICTIONS

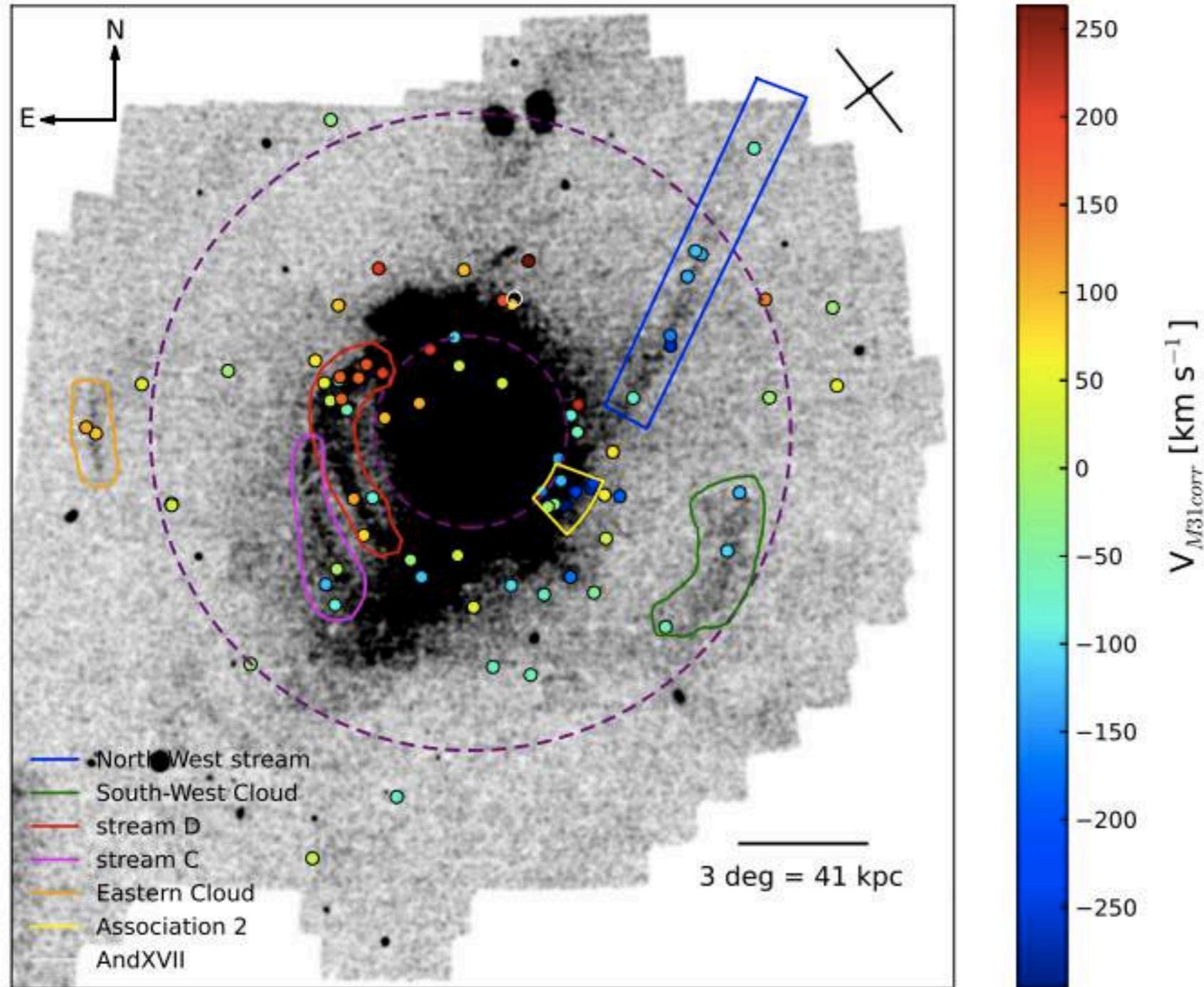


**Une variété de  
sequences chimiques**  
issues de l'accrétion de  
nombre de satellites au  
cours du temps, de  
Snaith et al, 2016

# ÉCHELLE GALACTIQUE: LES AMAS GLOBULAIRES COMME TRACEURS DES ACCRECTIONS

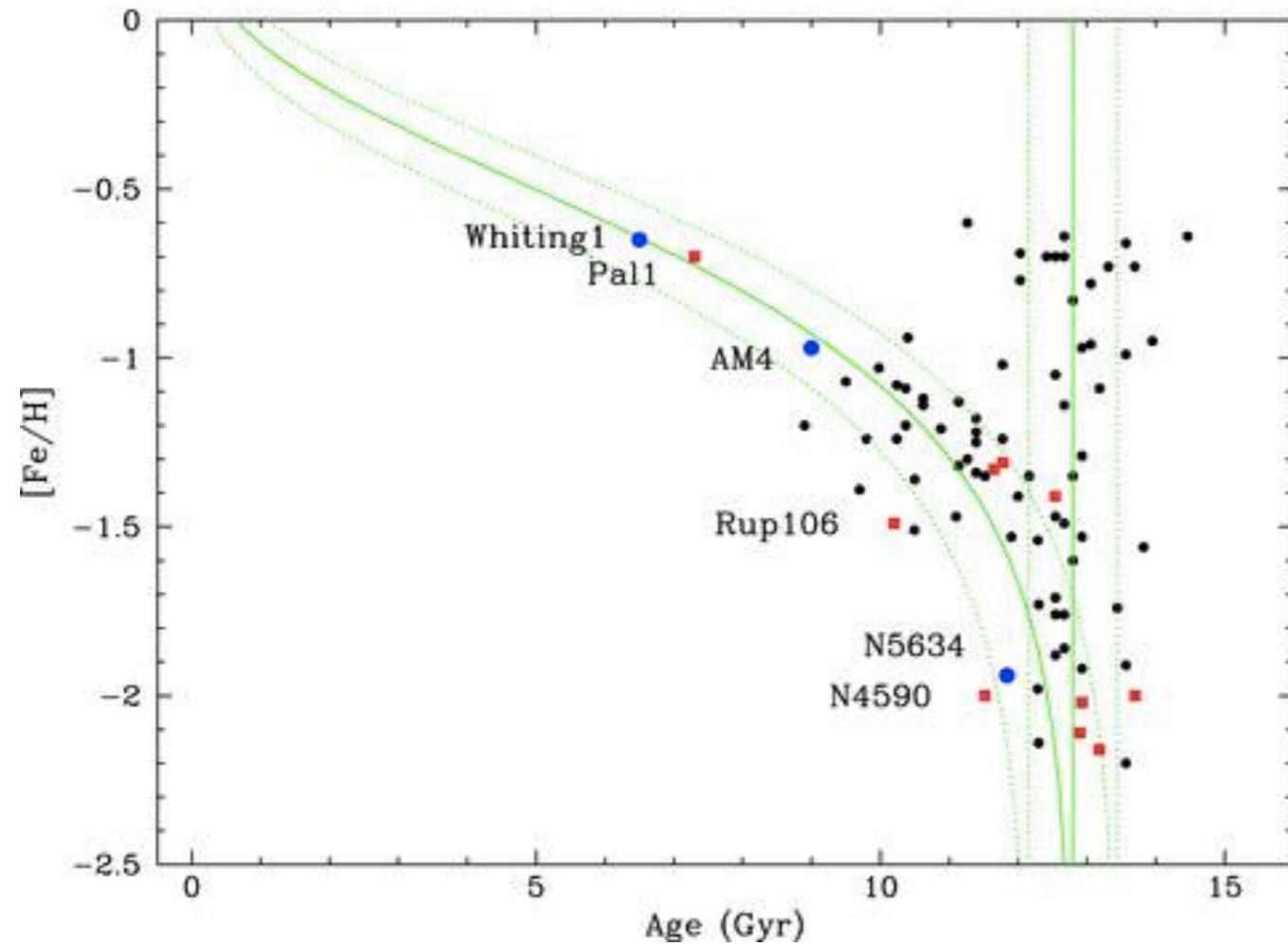


# ECHELLE GALACTIQUE: LES AMAS GLOBULAIRES COMME TRACEURS DES ACCRETIONS

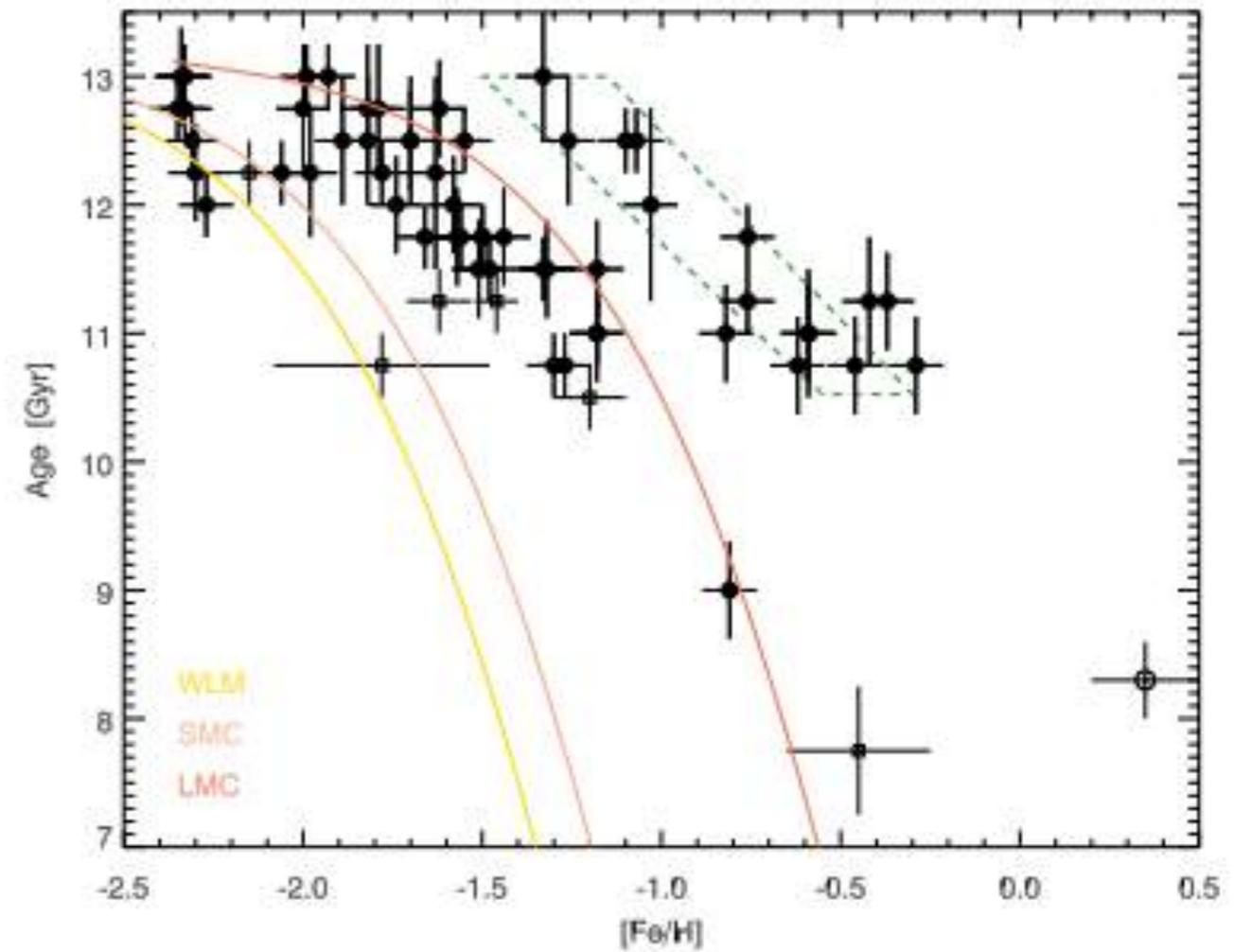


Amas globulaires et courants stellaires dans la galaxie d'Andromède, de Veljanoski et al, 2014

# ÉCHELLE GALACTIQUE: LES AMAS GLOBULAIRES COMME TRACEURS DES ACCRECTIONS



Forbes & Bridges, 2010



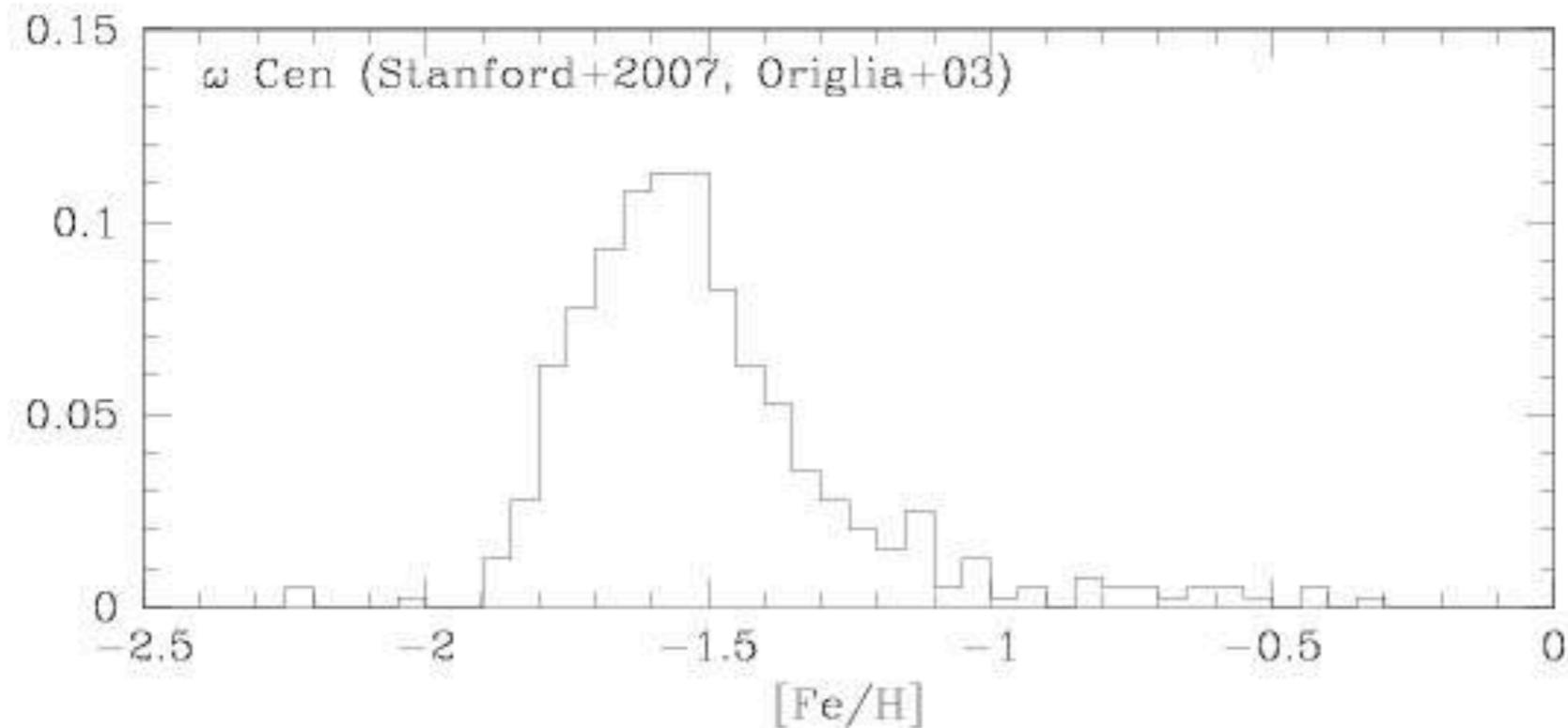
Leaman et al, 2013

Evidence de plusieurs amas globulaires aujourd'hui dans la Galaxie, qui ont une origine extra-galactique

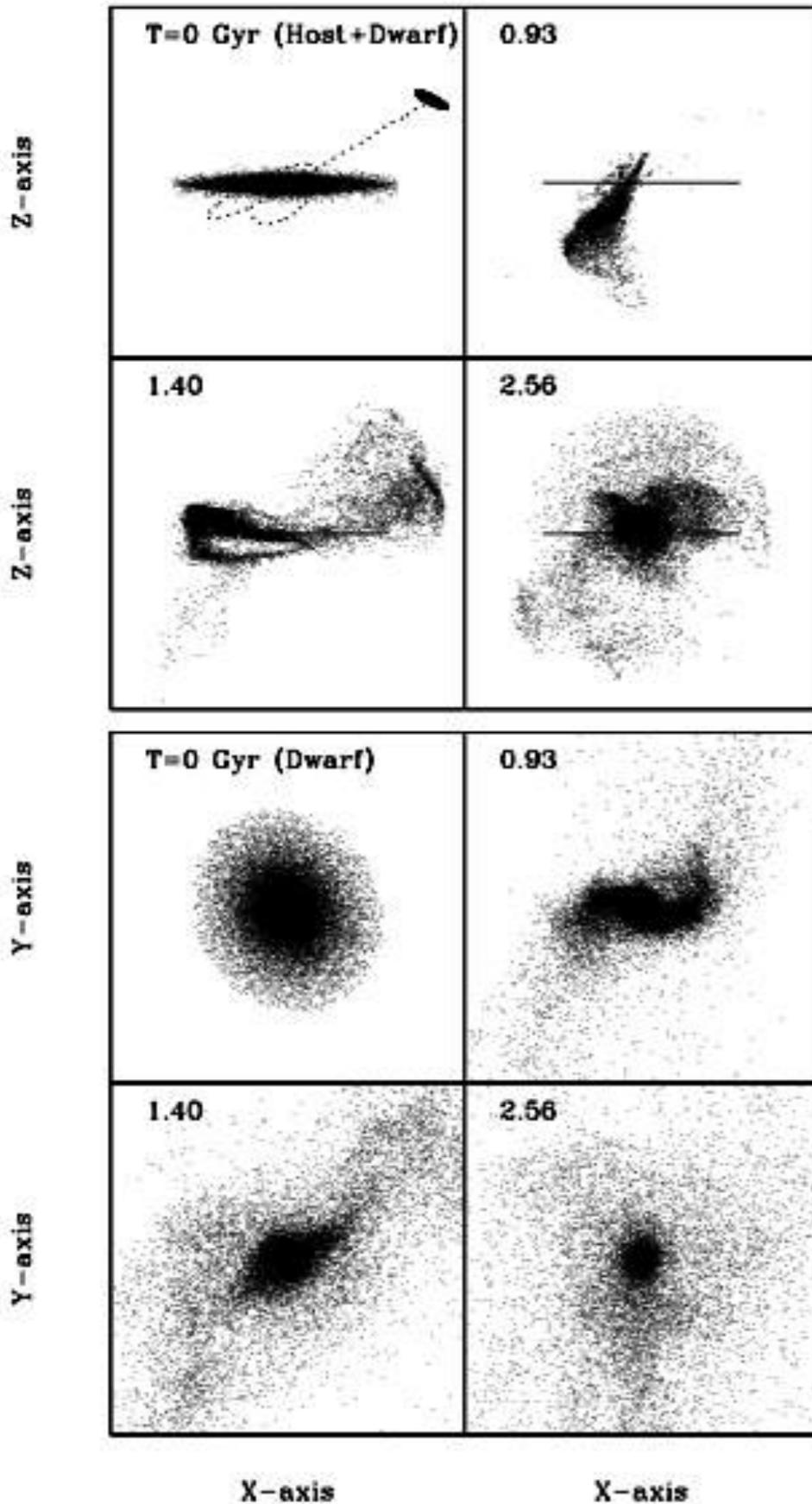
# LES AMAS GLOBULAIRES COMME TRACEURS DES ACCRETIONS: LE CAS D'OMEGA CENTAURI



- L'amas le plus massif parmi les amas globulaires de la Voie Lactée, avec une masse de  $\sim 4$  Millions  $M_{\text{sun}}$
- Son orbite est rétrograde
- A la différence de la plupart des amas globulaires galactiques, il a une distribution de métallicité très large



# LES AMAS GLOBULAIRES COMME TRACEURS DES ACCRETIONS: LE CAS D'OMEGA CENTAURI



- L'amas le plus massif parmi les amas globulaires de la Voie Lactée, avec une masse de  $\sim 4$  Millions  $M_{\text{sun}}$
- Son orbite est rétrograde
- A la différence de la plupart des amas globulaires galactiques, il a une distribution de métallicité très large

Noyau d'une galaxie naine accrétée il y a plusieurs milliards d'années ?

- L'étude de la Voie Lactée est fondamentale pour tester les prédictions des modèles cosmologiques, et pour comprendre les processus de formation et croissance en masse des galaxies à disque.
- Un certain nombre d'interactions en cours dans la Voie Lactée, qui pourraient expliquer certaines des caractéristiques de notre Galaxie et qui peuvent nous aider à comprendre son évolution future
- La recherche des briques fondamentales à partir desquelles notre Galaxie s'est formée est plus difficile : dégénérescence, échantillons encore limités en nombre et spatialement

Publication 2ème catalogue : avril 2018

## PROSPECTIVES

Parallaxes et mouvements propres pour 1 milliard d'étoiles dans la Galaxie, vitesses radiales pour ~une dizaine de millions.

Ces informations, couplées aux abondances chimiques pour quelques centaines de milliers d'étoiles issues de *survey* spectroscopiques - APOGEE, WEAVE, Galah, ..- constituent **une source sans précédent pour reconstruire l'histoire de formation de notre Galaxie et du Groupe Local.**

