

LES AMAS GLOBULAIRES

M13 Hér
500 000 étoiles
à 25000AL

(Photo Astro-club Pontarlier)

LES AMAS GLOBULAIRES (AG) : PLAN

L'APPORT DES AG EN ASTRONOMIE?

I. UN PEU D'HISTOIRE

II. QU'EST-CE QU'UN AG? = Caractériser les AG

III. ORIGINES/FORMATION

IV. DES OBJETS ÉTERNELS? Comment évoluent les AG?

UN PEU D'HISTOIRE

XVI^e siècle :

→ le 1^{er} AG, M22 Sgr, a été découvert en 1665 par Abraham IHLE (1627-1699), un astronome amateur allemand.

→ 1677: Edmond HALLEY découvre w Cen

→ tout au long du XVIII^e siècle découverte de nombreux AG : (Halley, De Cheseaux, C. Messier...)

→ jusqu'en 1782 on utilise le terme de « nébuleuse » car on ne connaît pas la nature exacte de ces objets

→ William HERSCHEL en 1782 les baptise « amas globulaire »

→ 1866: 1^{er} spectre de M13 Her par William HUGGINS

→ 1892 : 1^{ère} photographie par Isaac ROBERT de M15 Peg

→ 1913 : 1^{ère} synthèse sur les AG par Sydney Chapman

QU'EST-CE QU'UN AG?

M92 Her
150 000 étoiles
à 27000AL

(Photo Astro-club Pontarlier)

Un gigantesque amas sphérique
d'étoiles (*globulus* : petit globe, boule)...

...liées par la gravité...

...avec une plus forte concentration
d'étoiles en son centre.

Typiquement:

des centaines de milliers d'étoiles,
masse moyenne de $3 \times 10^5 M_{\odot}$,
Ø qq dizaines d'AL (40 à 60),
en rotation sur eux-mêmes; mouvement orbital,
ne possèdent plus de gaz interstellaire,
étoiles ont le même âge, sont à la même distance,
même nuage de gaz originel....

MAIS...

...MAIS

des peu massifs : Palomar 5 Ser : $1,34 \times 10^4 M_{\odot}$
 $\emptyset = 23 \text{ pc (76 AL)}$

des monstres: NGC 5139 (w Cen) : $3,94 \times 10^6 M_{\odot}$,
 $\emptyset = 77,6 \text{ pc (253 AL)}$

des pauvres : Palomar 13 Ser : \approx qq milliers d'étoiles

des richards : NGC 5139 (w Cen) : 10 M d'étoiles

des voisins : M4 Sco à 2,2 kpc/☉ (7200AL)

des lointains : Arp-Madore 1 Hor à 118,6kpc
(390 000AL/GNM: 157000AL)

Une population très différenciée:

- 274 variables \in M3 CVn

- un « cimetière » stellaire dans NGC 6397 Ara :
NB, ÉN, TN...



9 NGC 6144

NGC 6171

NGC 6205

NGC 6218

NGC 6229

NGC 6235

NGC 6254

NG

3 N

NG

AU FINAL
UNE GRANDE DIVERSITÉ

2 NGC 6355

NGC 6356

NGC 6362

NGC 6366

NGC 6380

NGC 6388

NGC 6397

NG

COMBIEN D'AG DANS LA VL?

≈ 168 AG en mars 2023

<https://people.smp.uq.edu.au/HolgerBaumgardt/globular/>

DIFFICULTÉ:
TROUVER DES AG, NOTAMMENT VERS LE
CENTRE GALACTIQUE (EFFET
D'EXTINCTION).

EX. DERRIÈRE LE RSN DES VOILES:
FERRERO 54 TROUVÉ EN 2019
PAR UN AMATEUR (Laurent Ferrero),
CONFIRMÉ EN 2022.

<http://splendeursducielprofond.eclablog.fr/un-nouvel-amas-globulaire-galactique-ferrero-54-a214112373>



DES AG DANS D'AUTRES GALAXIES?

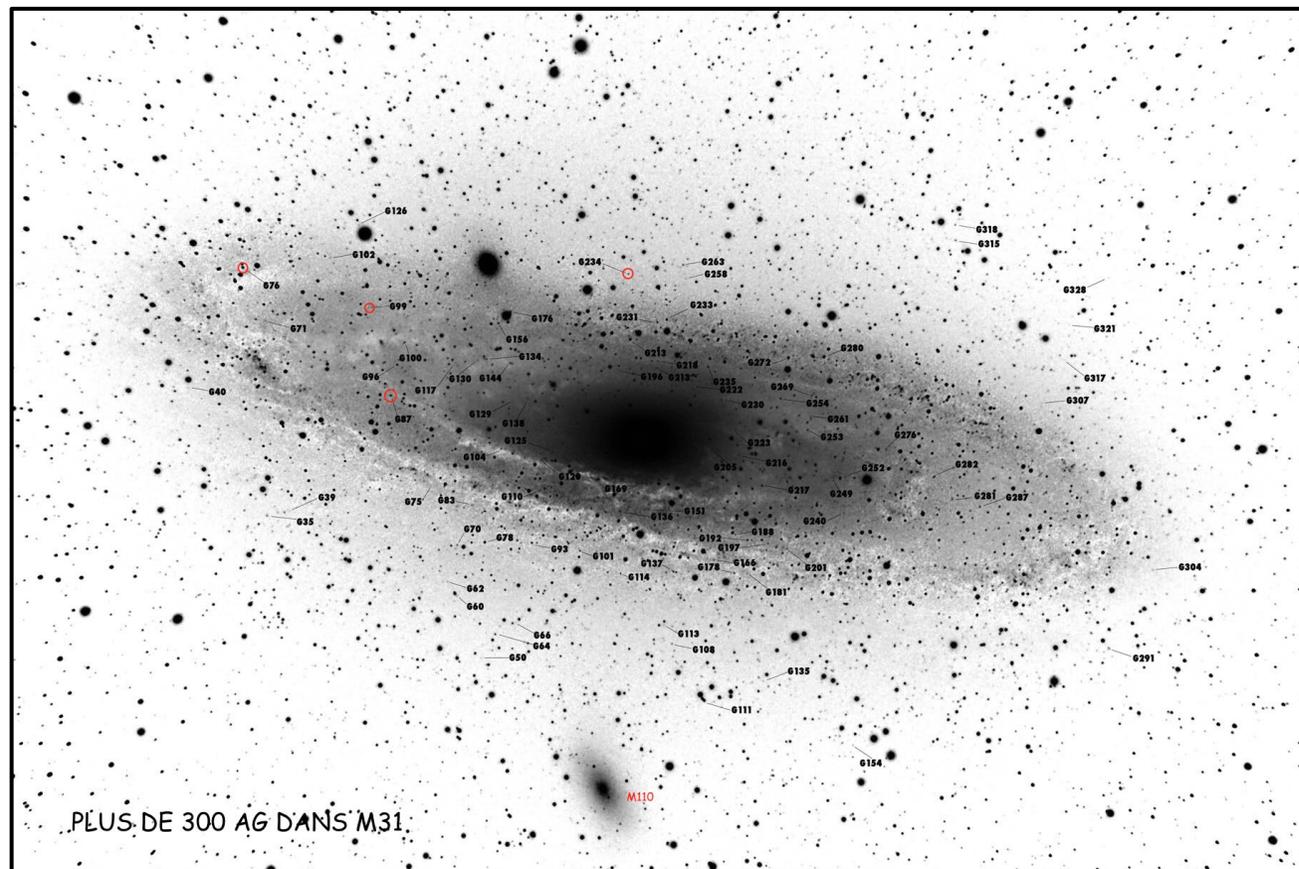
INTIMEMENT LIÉS AUX GALAXIES:

→ TOUTES LES GALAXIES EN POSSÈDENT

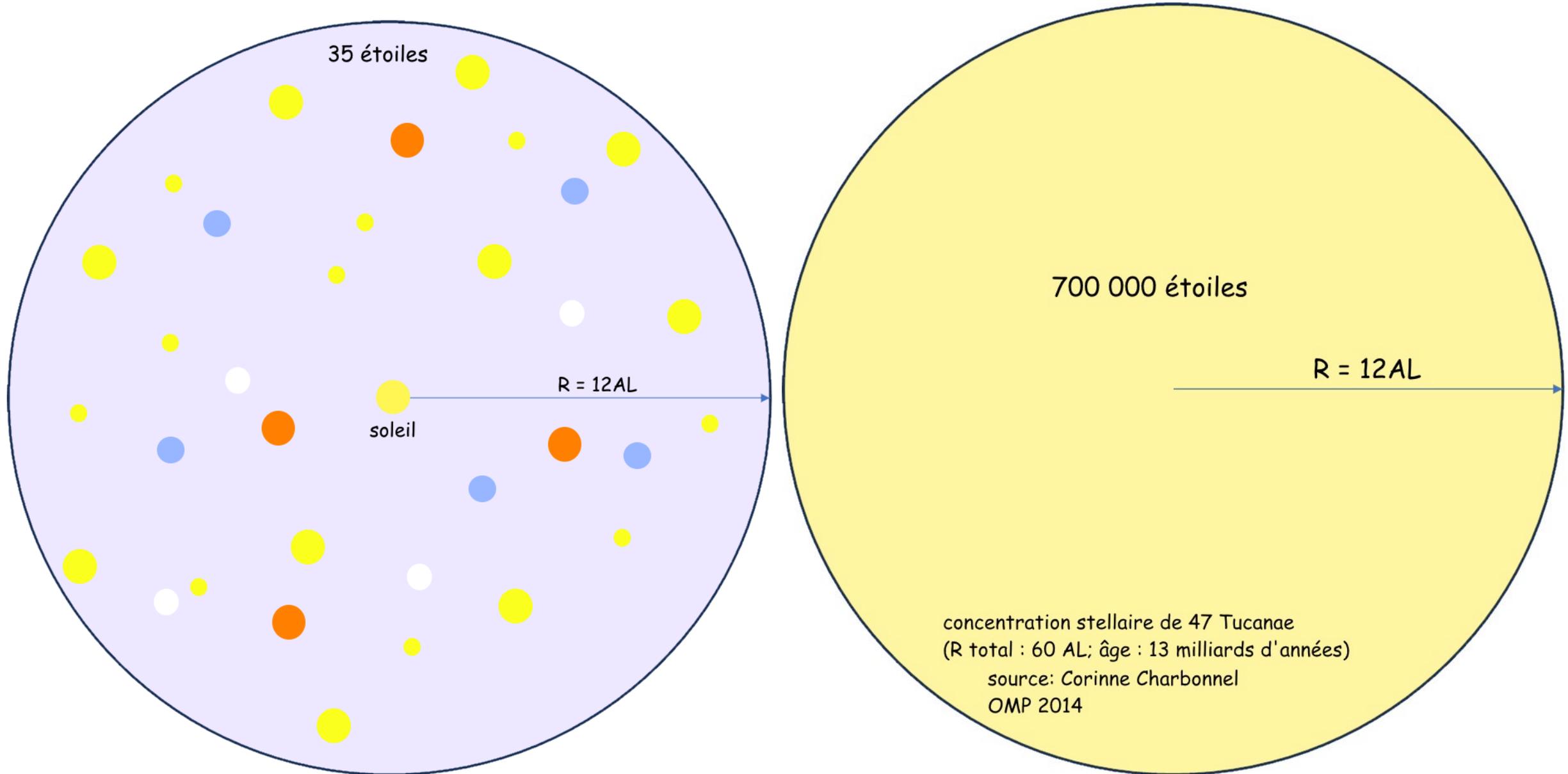
→ LES ÉLLIPTIQUES EN PARTICULIER

DEUX EXEMPLES :

M 87, aussi dénommé Virgo A, est une galaxie elliptique supergéante située dans la constellation de la Vierge; elle possède environ de 12 à 15 000 AG!



DES DENSITÉS D'ÉTOILES TRÈS VARIÉES MAIS QUI PEUVENT ÊTRE ÉNORMES



NGC 6397 Ara (Caldwell 86) à
7800AL:

Les étoiles sont séparées
par quelques semaines-lumière

<https://esahubble.org/images/opo0321a/>

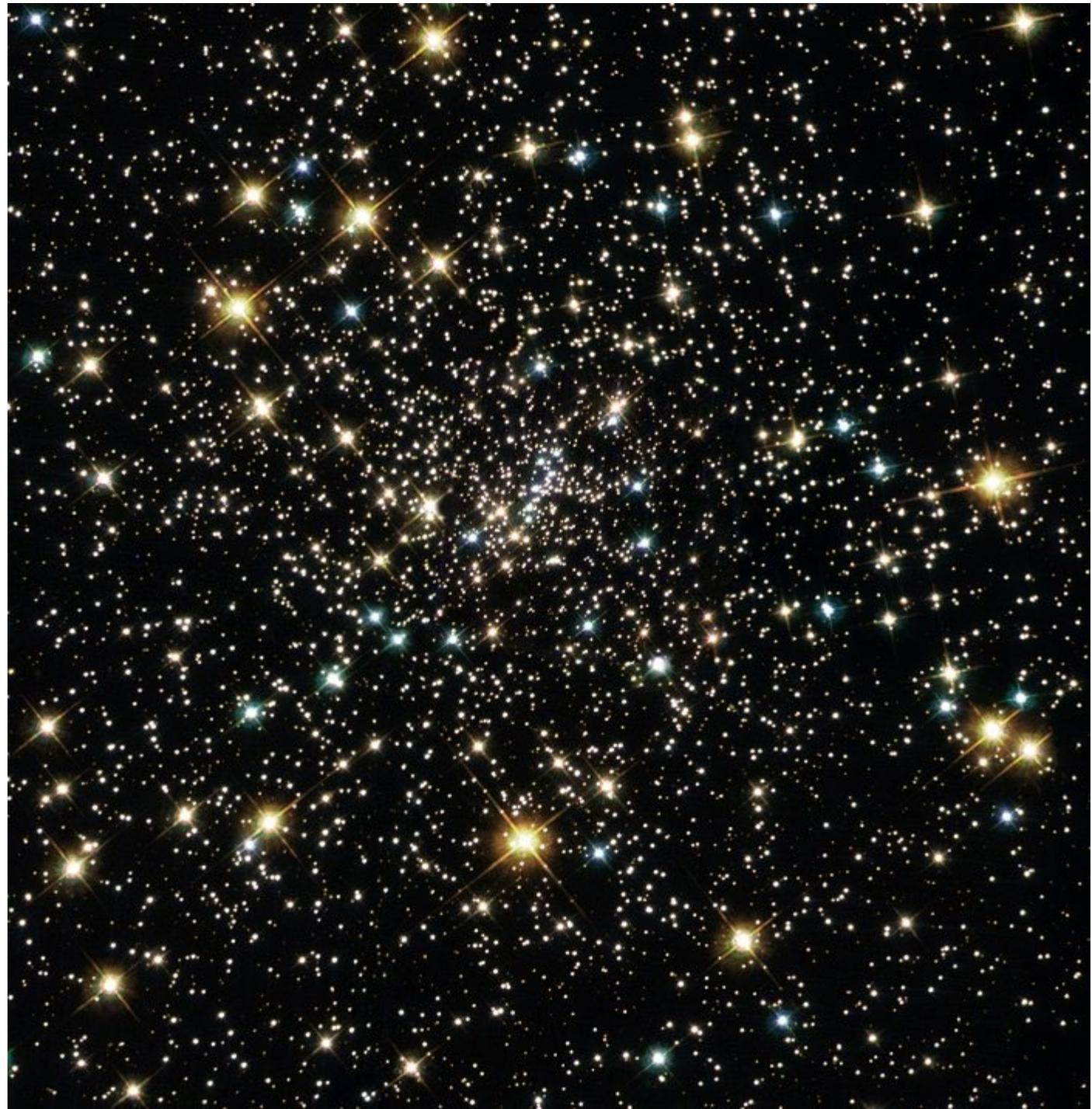
COMPARAISON:

limite externe du nuage d'Oort
(limite gravitationnelle du soleil):

≈ 100 000 UA du soleil

soit 100 000 × 150 000 000km
(1UA)

= 15000 000 000 000 km ≈ 1,5AL



COMMENT EXPLIQUER DE TELLES DENSITÉS?

- effondrement gravitationnel originel pour 20% des AG
- équilibre viriel

un simple calcul permet de vérifier que

$$\frac{d}{dt} (m \vec{r} \cdot \vec{v}) = \frac{d}{dt} \left(m \vec{r} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{1}{2} m \vec{r} \cdot \vec{r} \right) \quad (21)$$

en injectant ce dernier remaniement dans (20) et en utilisant le théorème d'Euler appliqué à l'énergie cinétique (cf. équation (17)), cette relation devient

$$\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{1}{2} m \vec{r} \cdot \vec{r} \right) = 2K - \vec{r} \cdot \frac{dU}{d\vec{r}} \quad (22)$$

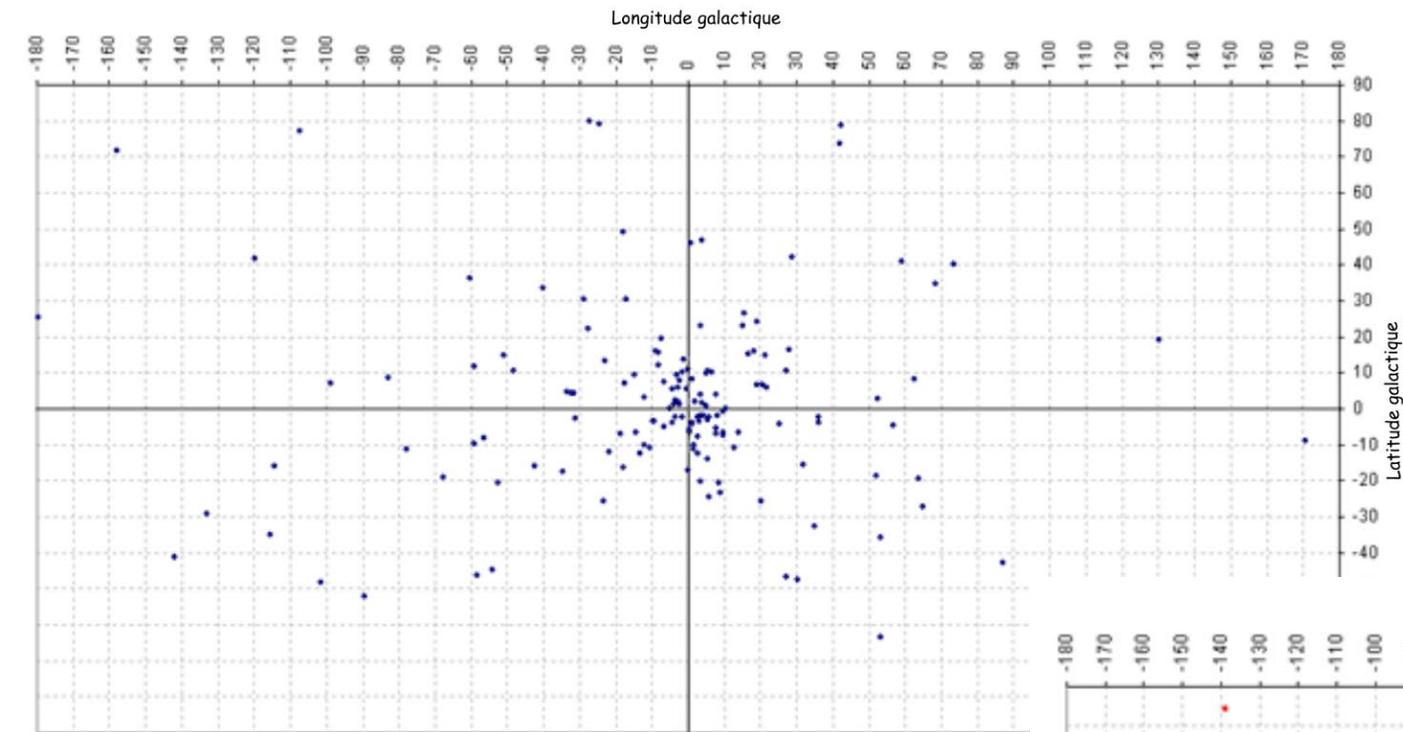
Si l'énergie potentielle est une fonction homogène de degré α de la position \vec{r} alors le théorème d'Euler stipule que

$$\vec{r} \cdot \frac{dU}{d\vec{r}} = \alpha U \quad (23)$$

sous cette hypothèse, nous obtenons le théorème du viriel

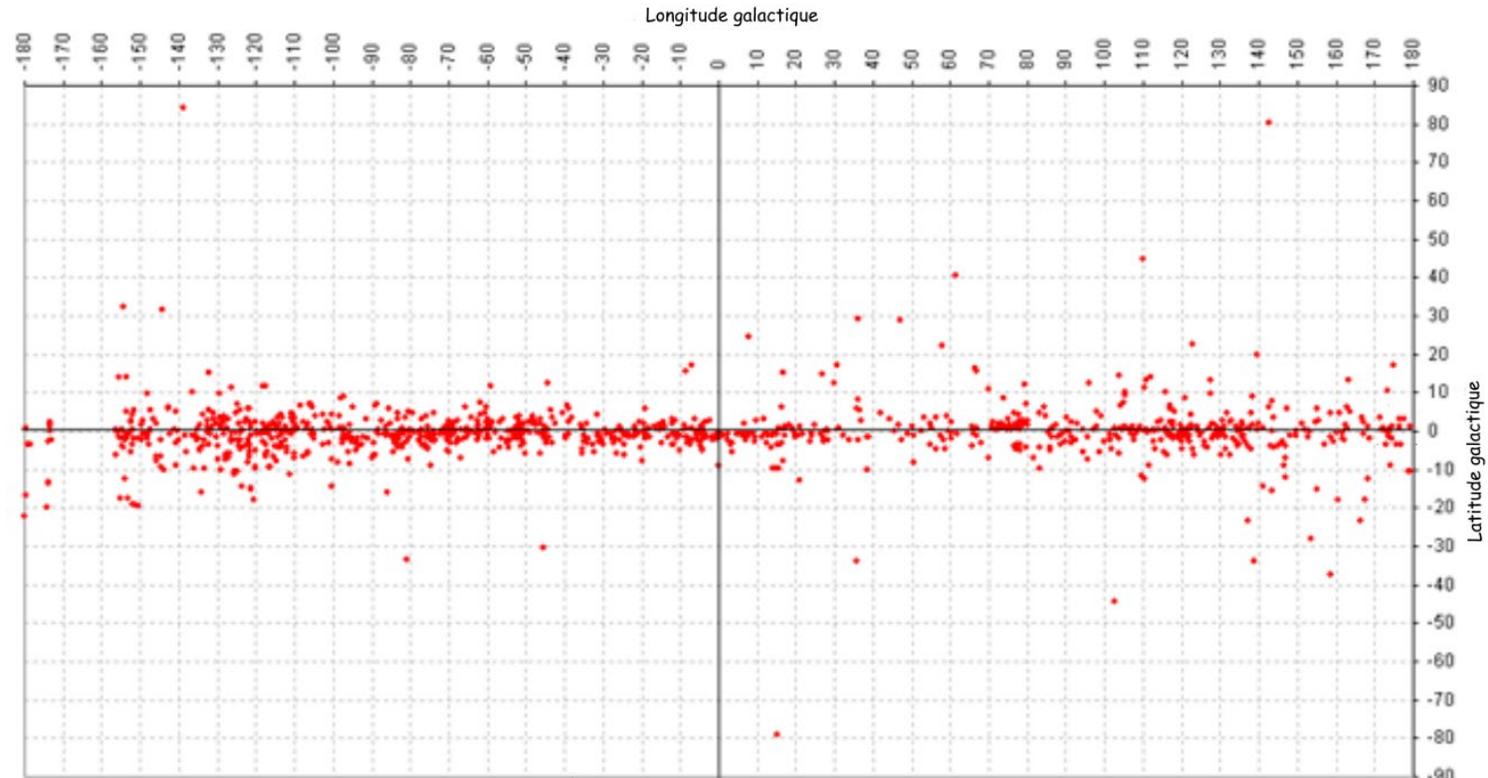
$$2K - \alpha U = \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{1}{2} m \vec{r} \cdot \vec{r} \right) \quad (24)$$

UNE RÉPARTITION SPATIALE SPÉCIFIQUE DANS LA VL



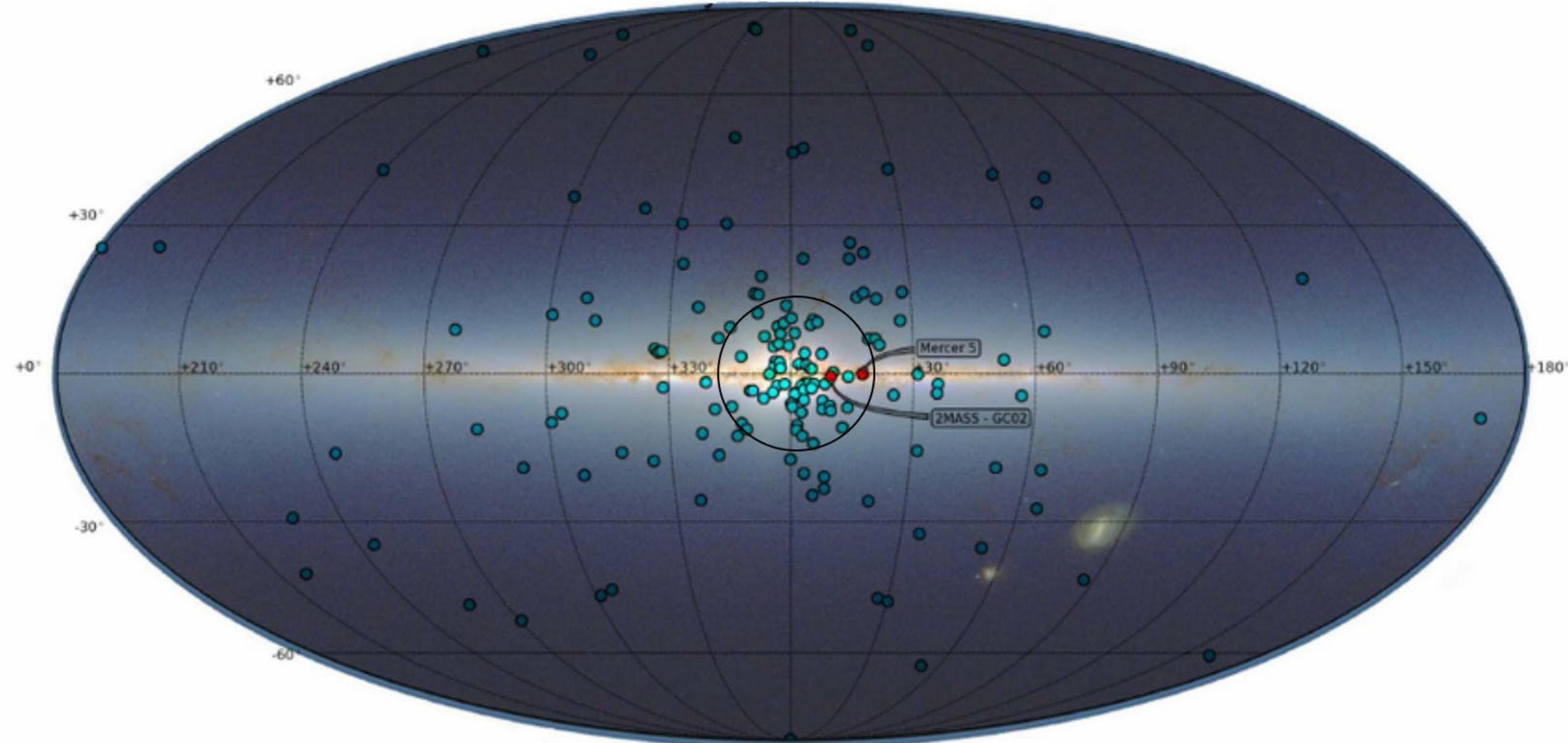
<https://robert-space.fr/astonomie/voie-lactee.htm>

RÉPARTITION DES AG DANS LA VL



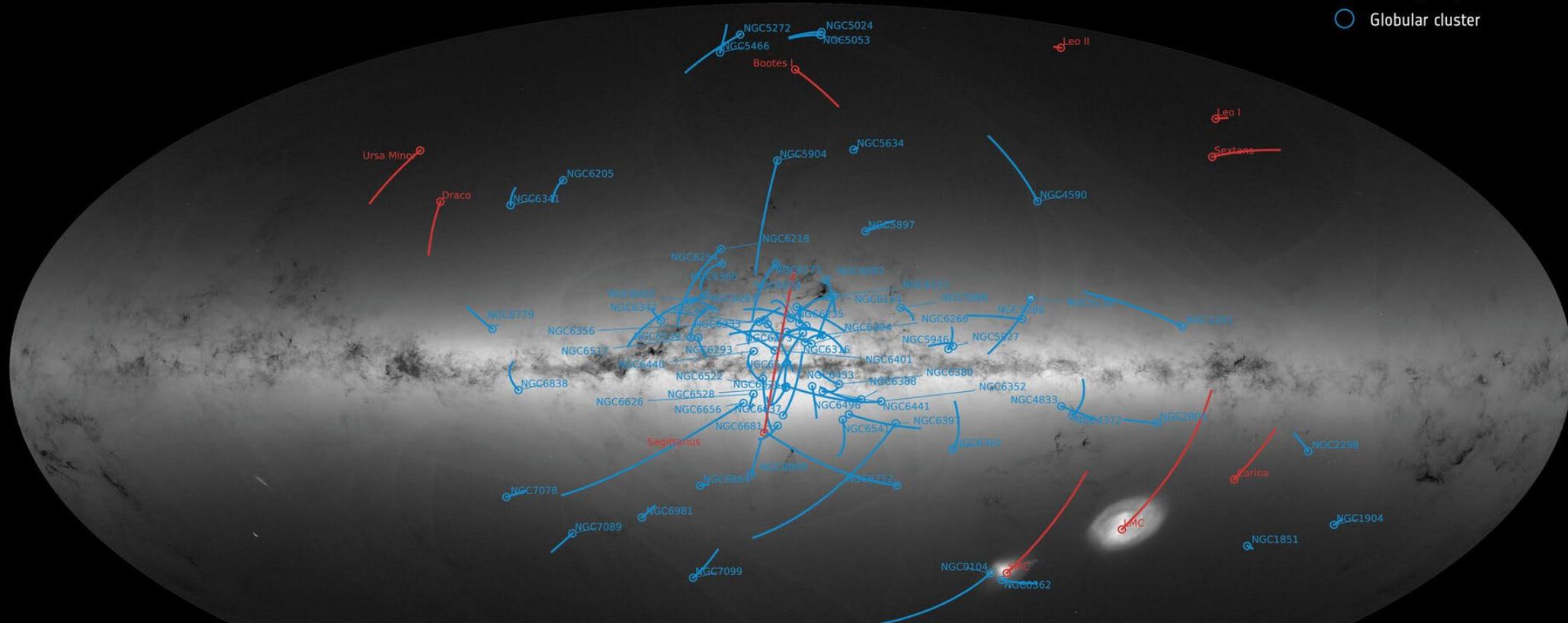
RÉPARTITION DES AO DANS LA VL

DISTRIBUTION DES AG DANS LA VL



ORBITES DE 75 AG ET DE 12 GALAXIES NAINES PROCHES À PARTIR DE DONNÉES DE GAIA 2DR (2018)

- Dwarf galaxy
- Globular cluster



Durée moyenne d'une orbite : 100 Ms d'années, passage dans le disque tous les 50Ms d'années

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/04/Gaia_s_globular_clusters_and_dwarf_galaxies_with_orbits

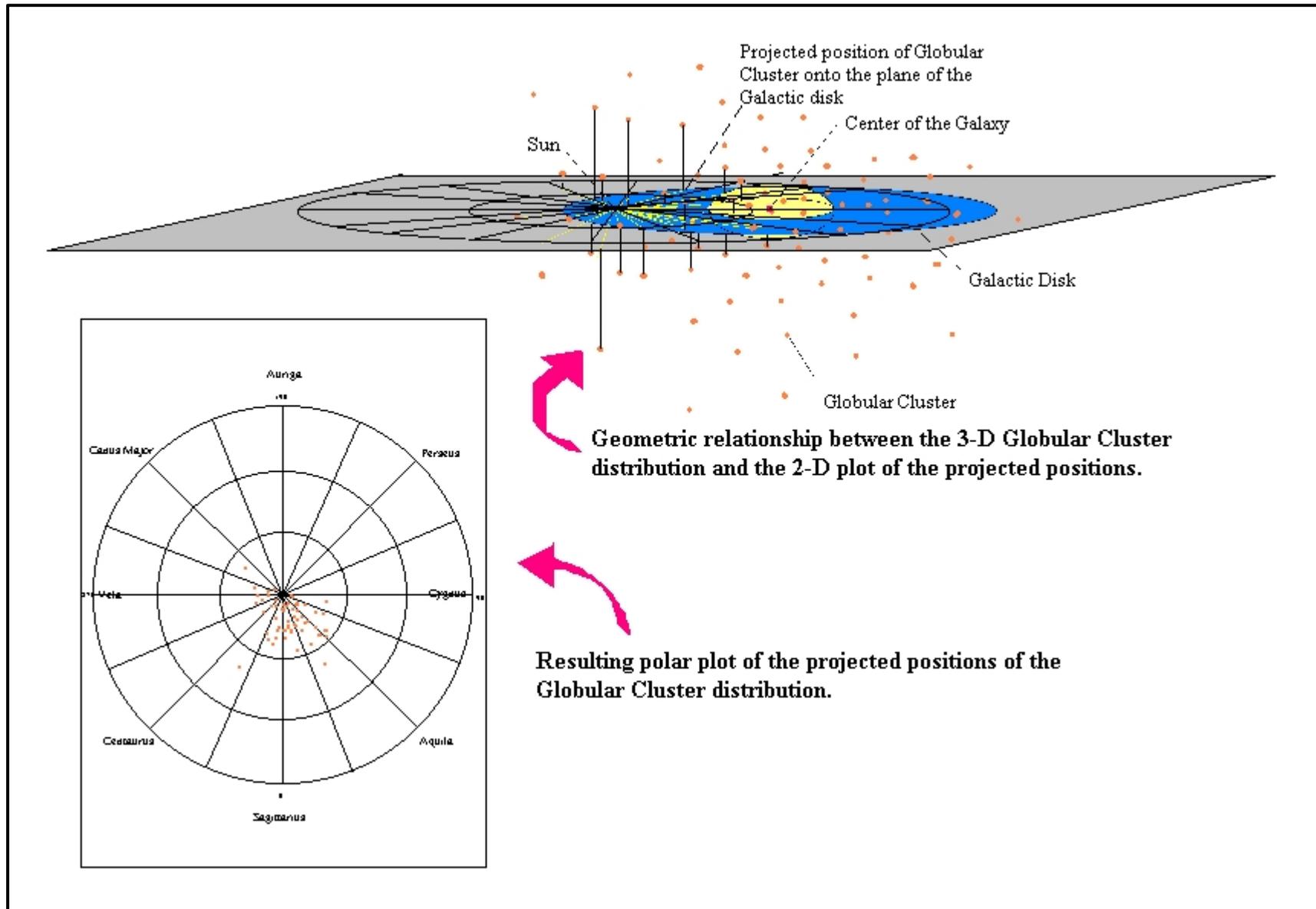
COMMENT EXPLIQUER UNE TELLE RÉPARTITION DANS LA VL?

RÉPARTITION LIÉE À LA FORMATION DES AG ET DE LA VL

les AG se trouvent aujourd'hui principalement dans le halo galactique parce que ces anciens systèmes ont été expulsés des régions relativement tôt, suite à « l'aplatissement » de la VL (avec formation des disques) et ont donc subi moins de perturbations gravitationnelles depuis.

https://www-astronomy-com.translate.goog/science/why-are-open-clusters-and-globular-clusters-found-in-different-places/? x_tr_sl=en& x_tr_tl=fr& x_tr_hl=fr& x_tr_pto=rq& x_tr_hist=true

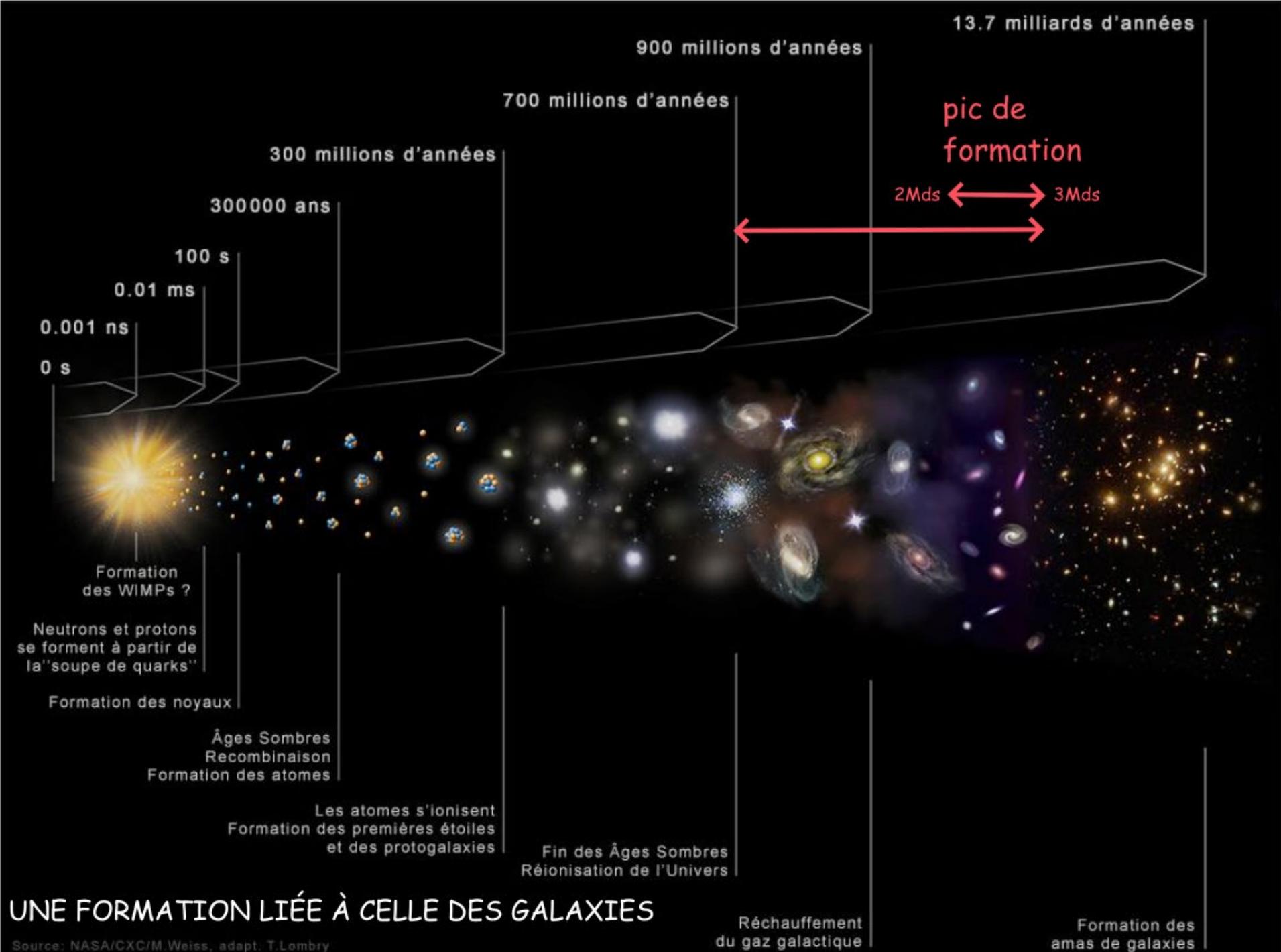
1^{er} APPORT: EN 1917, CETTE RÉPARTITION A PERMIS À SHAPLEY DE DÉTERMINER LA PLACE DU SOLEIL DANS LA GALAXIE





M22 Sgr (NGC 6656) en visible à ga. et en IR à dr.
M22 est un des plus vieux AG de la VL : 12,7 Mds d'années

L'ÂGE DES AG



UNE FORMATION LIÉE À CELLE DES GALAXIES

Source: NASA/CXC/M.Weiss, adapt: T.Lombry

COMMENT ESTIMER L'ÂGE D'UN AG?

- Impossible précisément → estimation
- Absence de gaz interstellaire dans l'AG
- Apparence du diagramme HR de l'AG: l'exemple de M3 CVn
- Métallicité des étoiles de l'AG

M3

indice de couleur B-V

M3 CVn (NGC 5272)

à 10180pc (33100AL)

M44 Can

Pas d'étoiles massives

m_v

12

14

16

18

20

B

A

F

G

K

CLASSE SPECTRALE

Hertzsprung-Russell Diagram for M44

Brightness (apparent magnitude)

6

8

10

12

14

16

Color index (B-R)

-1.5

-1.0

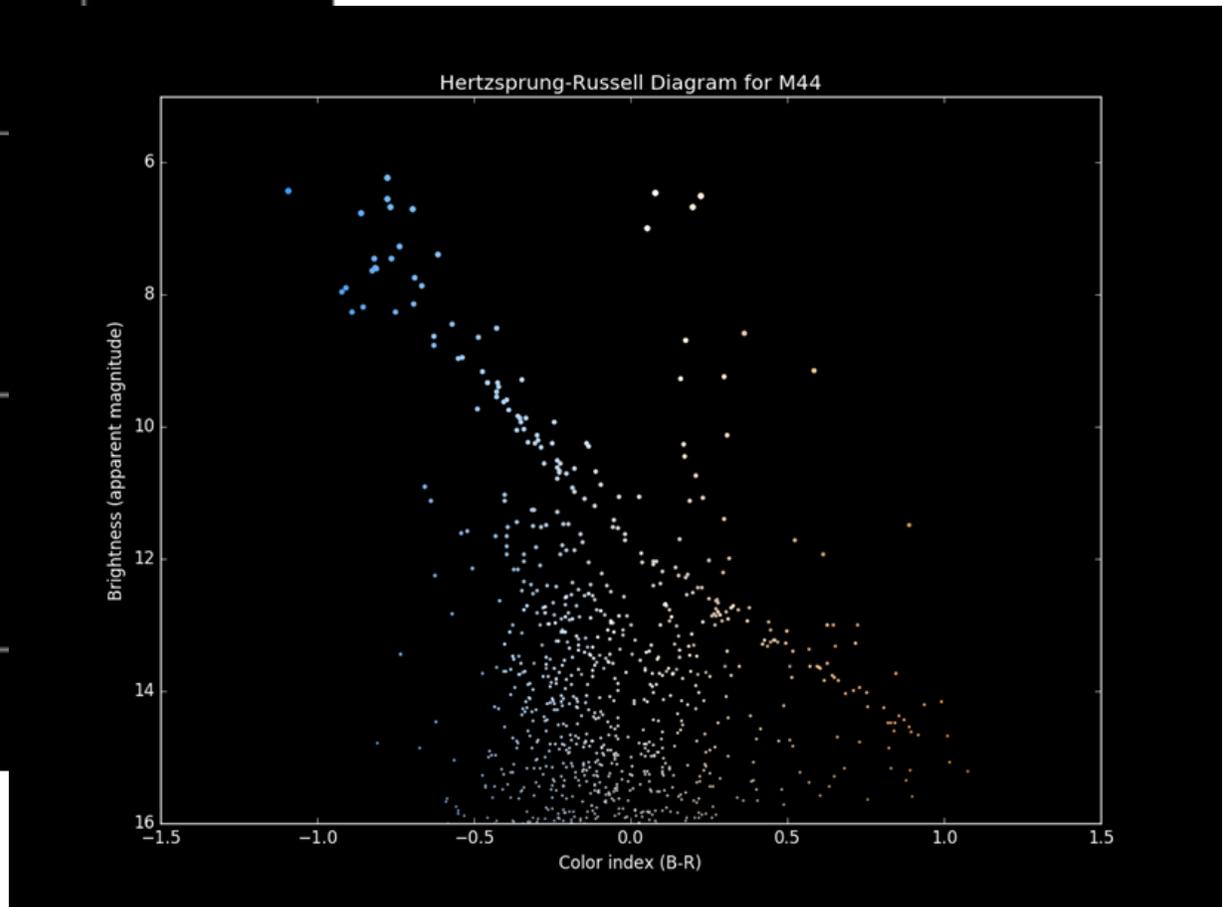
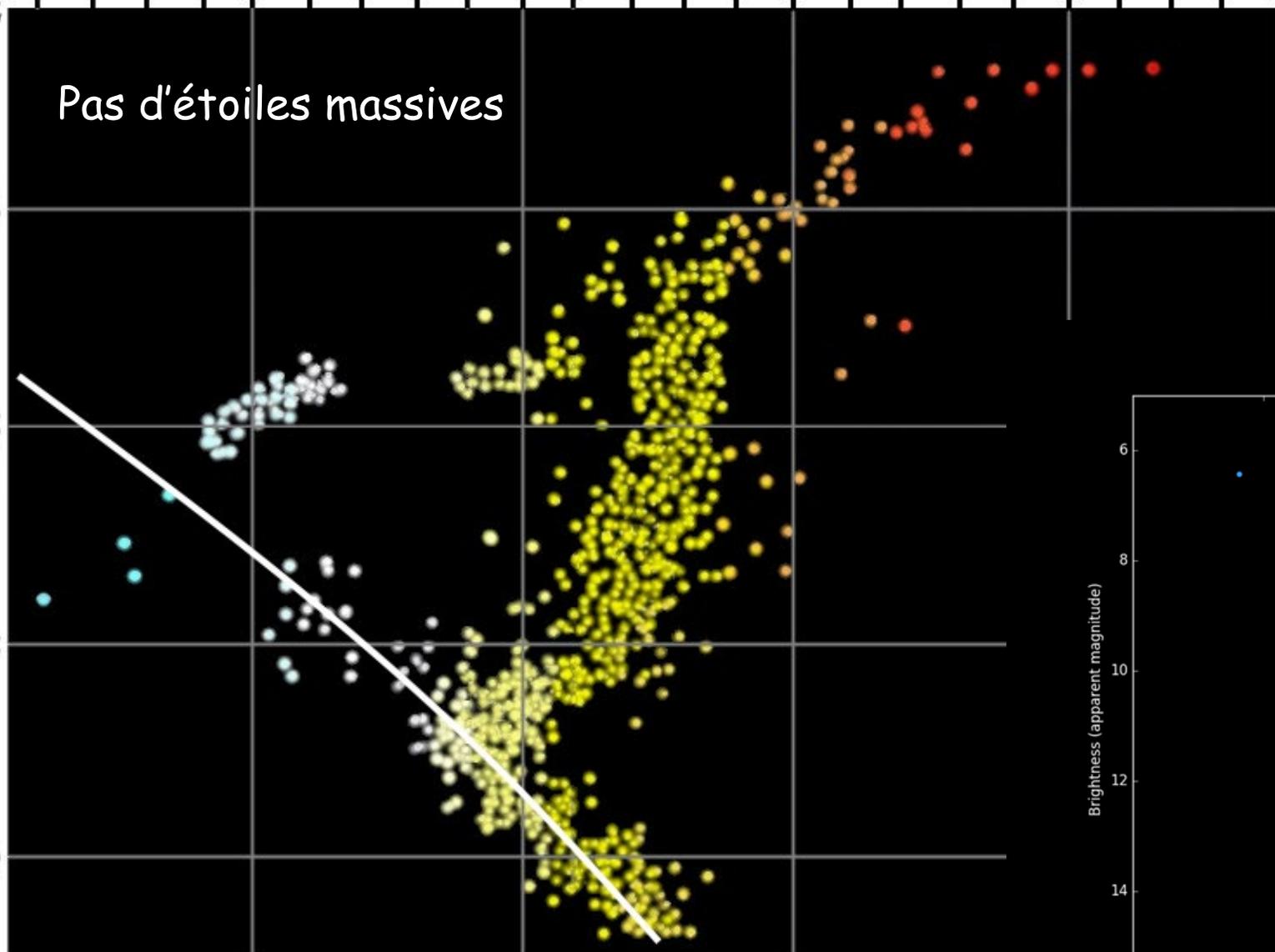
-0.5

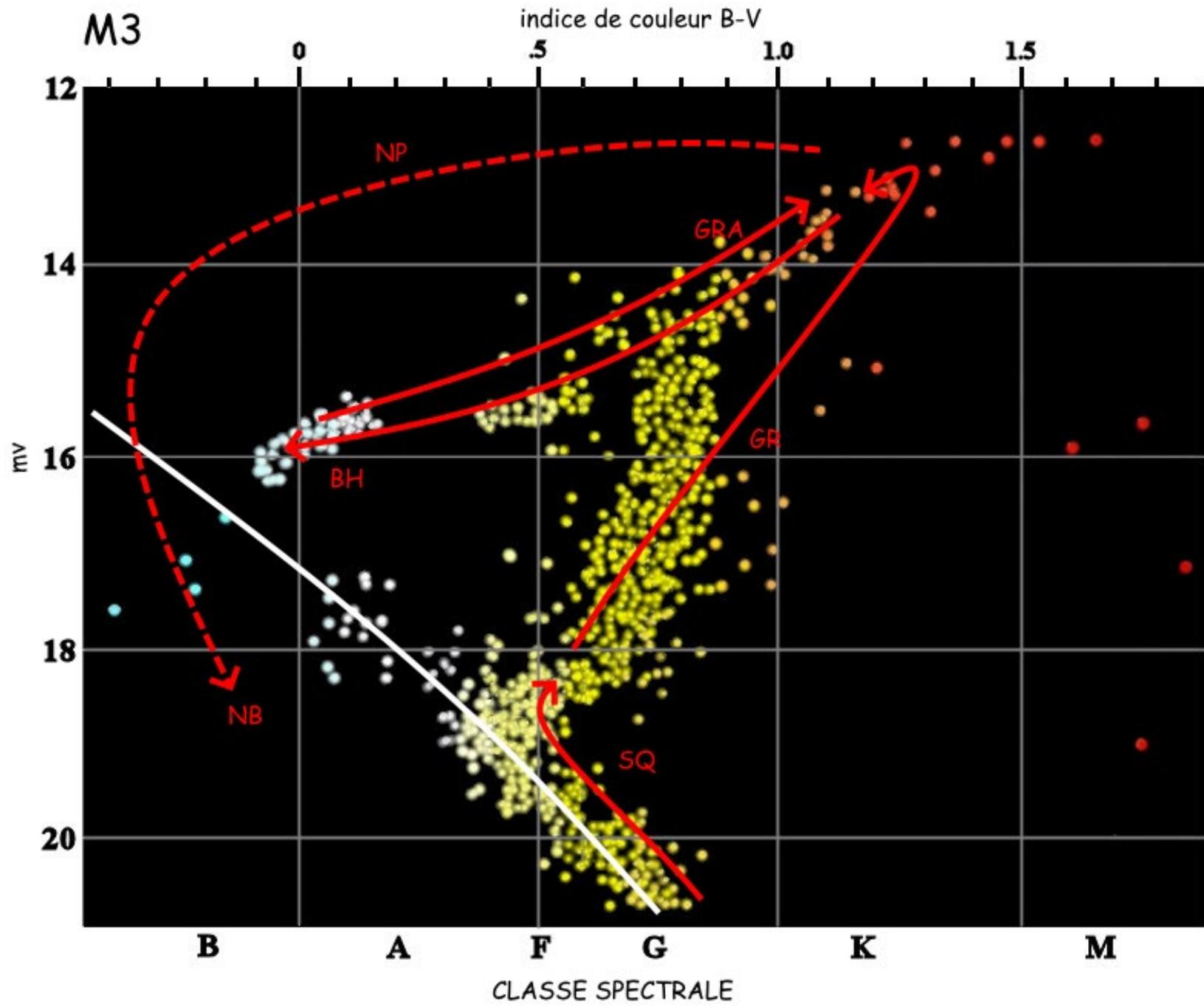
0.0

0.5

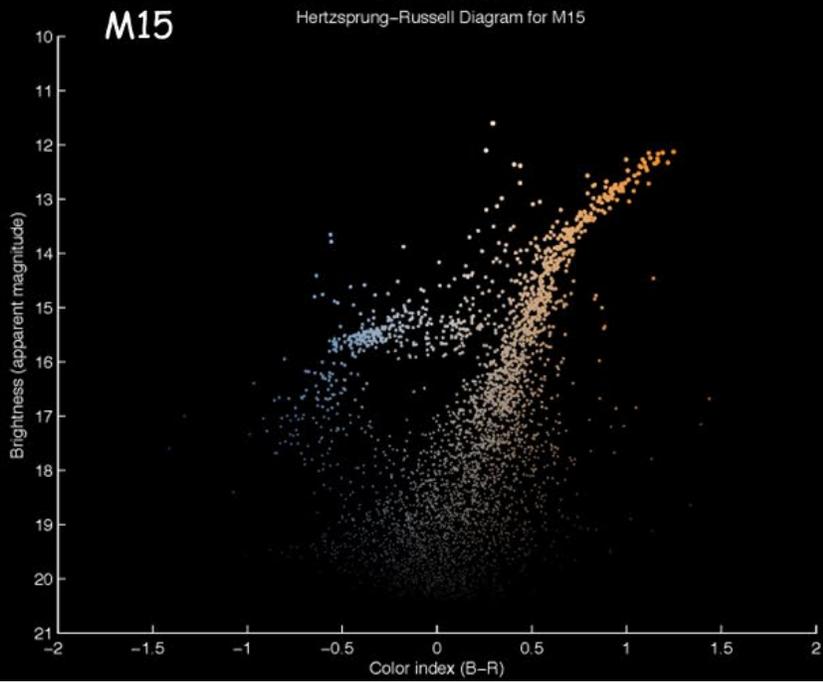
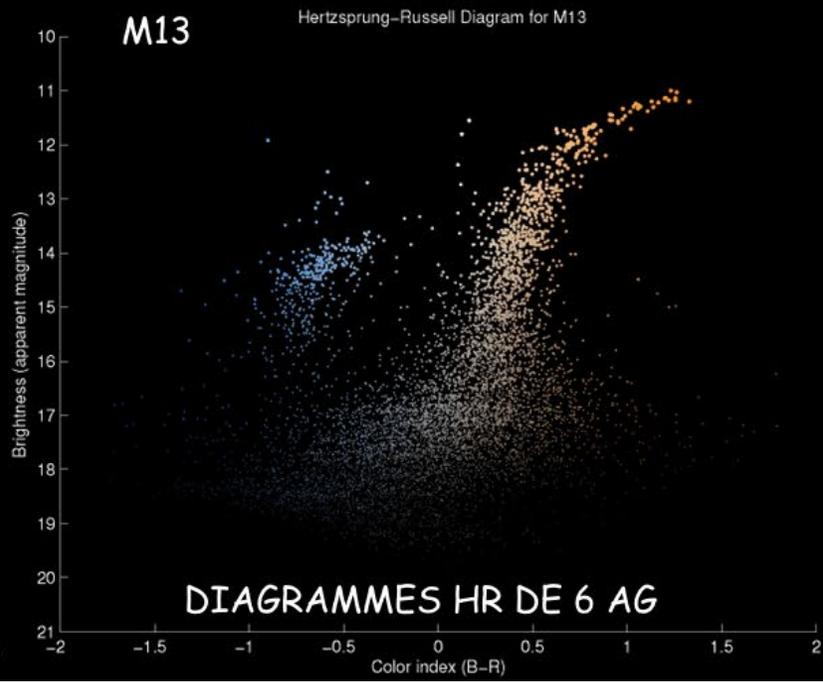
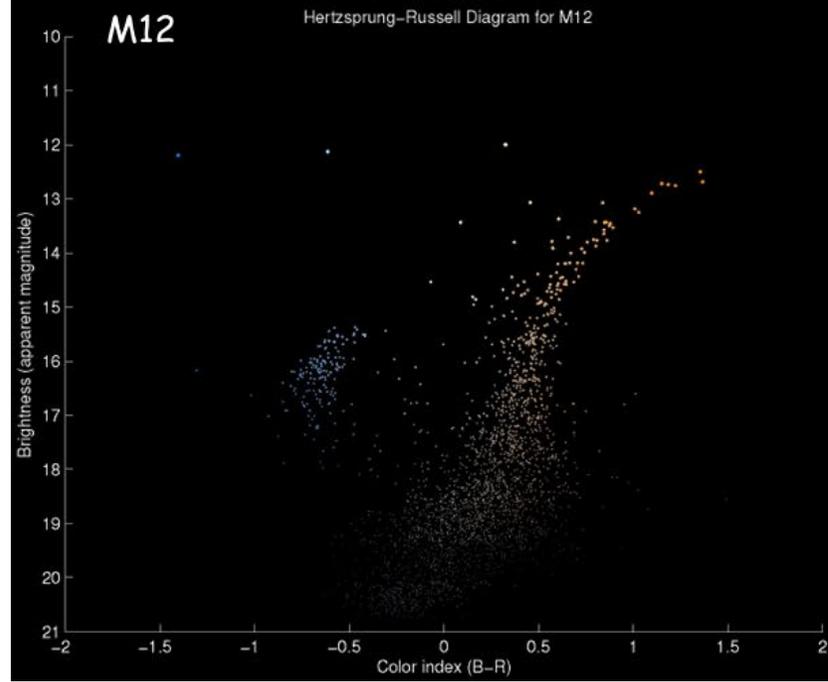
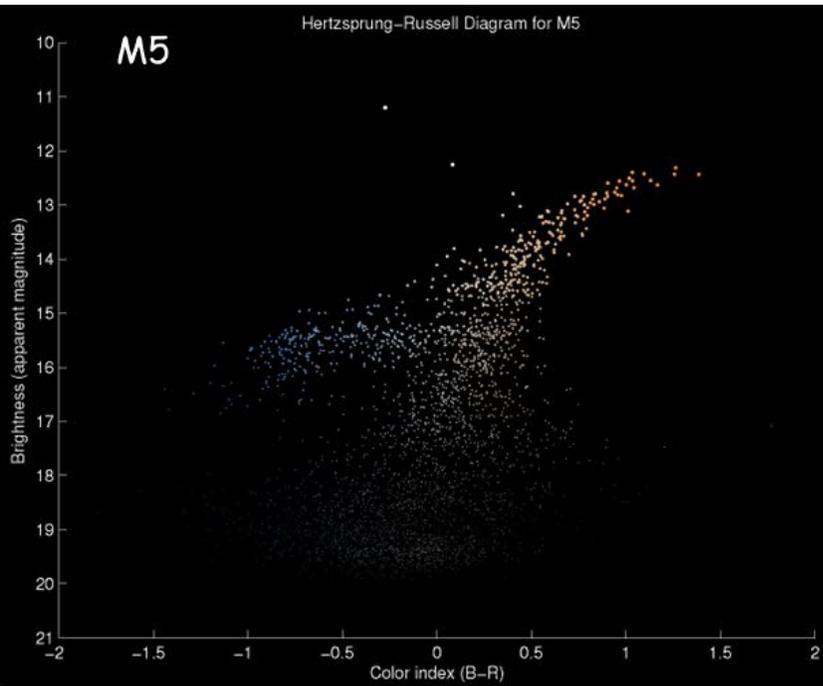
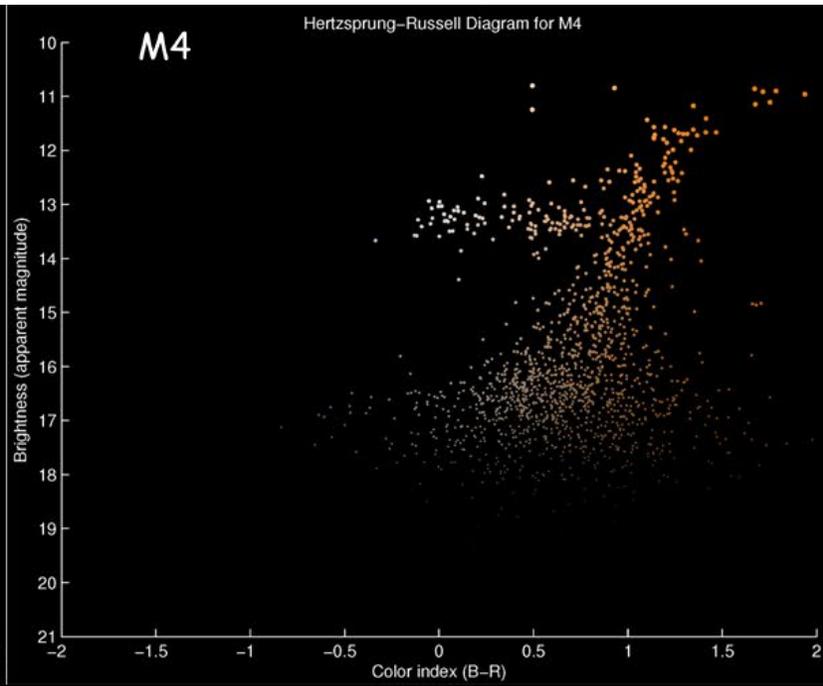
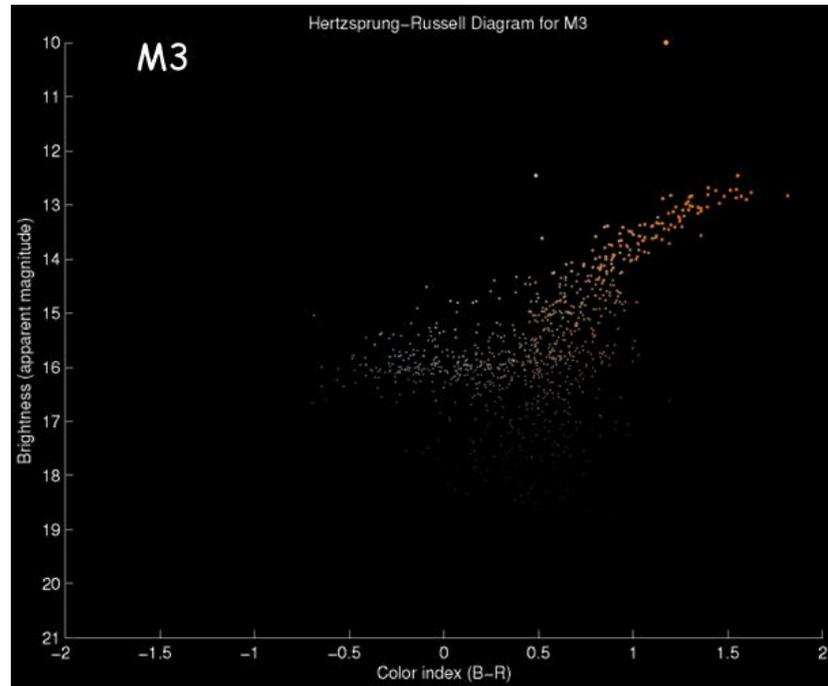
1.0

1.5





Une évolution typique
d'étoiles de
 $0,5M_{\odot} < M < 8-10 M_{\odot}$



DIAGRAMMES HR DE 6 AG

LES DONNÉES HR SONT CONFIRMÉES PAR LA MÉTALLICITÉ:

= la fraction de la masse qui n'est pas constituée d'hydrogène ou d'hélium;

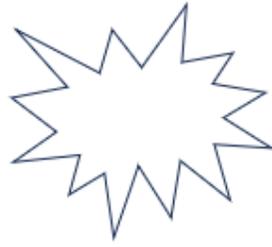
la métallicité, notée Z , d'un objet s'exprime par la comparaison avec celle du soleil:

→ plus Z est faible/ à celle du Soleil plus l'objet est âgé

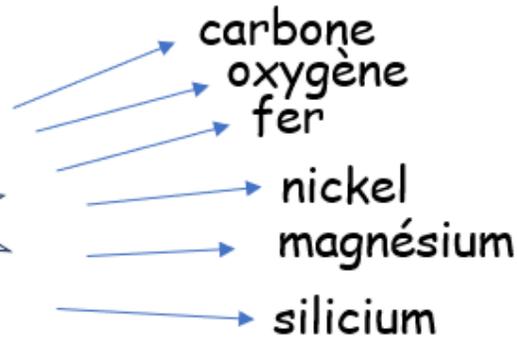
→ plus Z est élevée et tend vers celle du Soleil plus l'objet est jeune



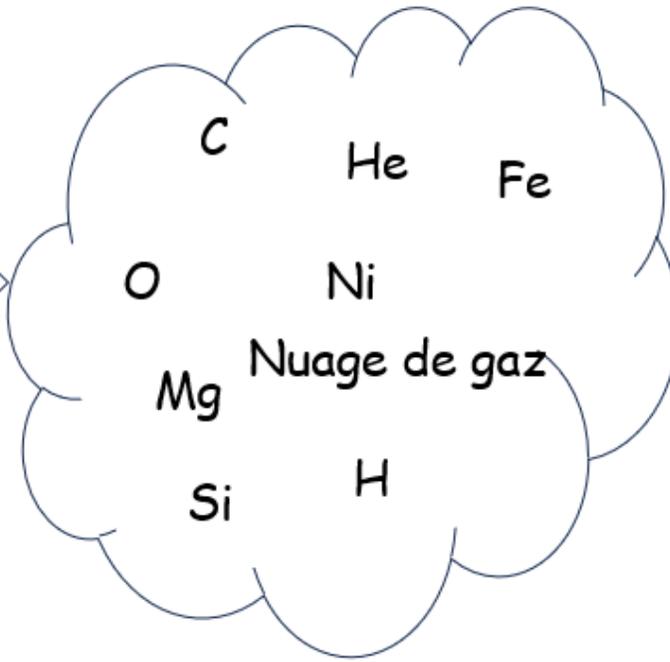
Étoile massive



SN



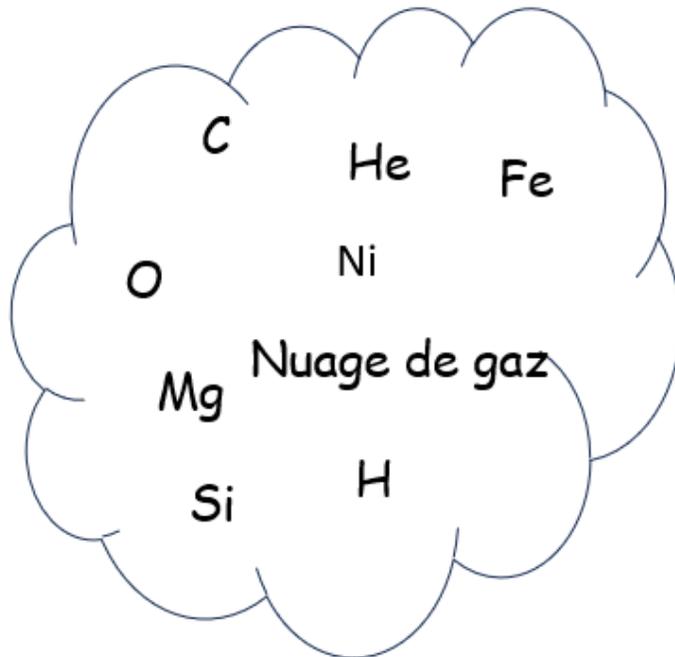
« métaux »



Âge de la VL : 13,6Mds d'années

Durée de vie d'une étoile massive:

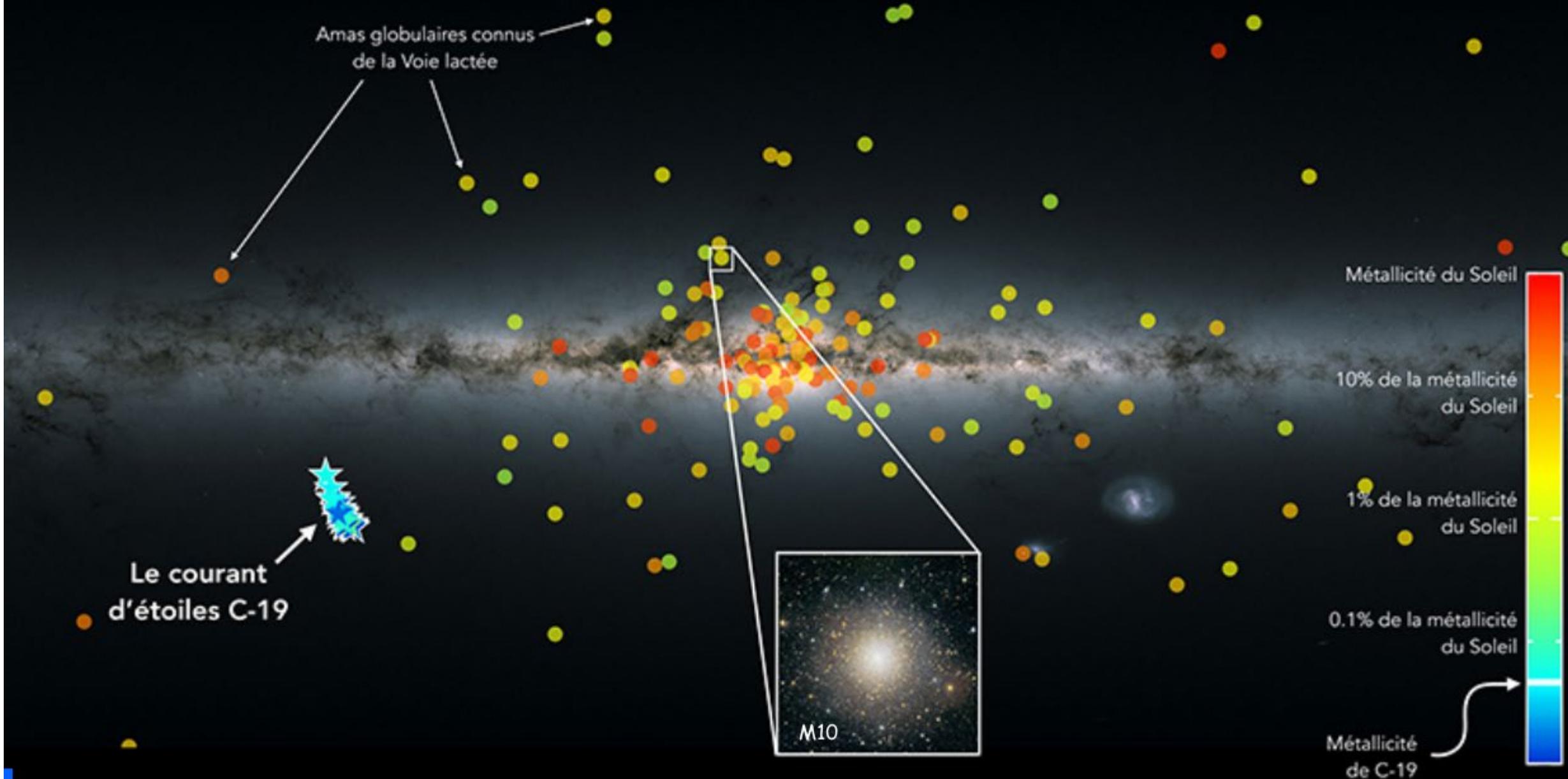
2Ms à 100Ms d'années → quelques SN/siècle actuellement dans la VL



Étoiles : H + He + C + Mg
+ Si + Ni + Mg + Fe

PLUS LA MÉTALLICITÉ D'UNE ÉTOILE EST ÉLEVÉE PLUS ELLE EST JEUNE

Distribution des AG superposée sur la carte de la VL construite à partir des données de la sonde Gaia.



LE BESTIAIRE CONFIRME L'ÂGE DES AG :

Pas d'étoiles massives O,B,A: des cadavres?

OUI : étoiles à neutrons/pulsars/TN stellaires et 1 intermédiaire (M15)

Étoiles F,G,K,M: SP/GR/BH/GRA + cadavres : NB nombreuses
1 seule nébuleuse planétaire à ce jour (M15 Peg): anomalie?
Trainardes bleues : anomalie expliquée

Étoiles variables RR Lyrae (2^{ème} apport = calcul de distance des galaxies);

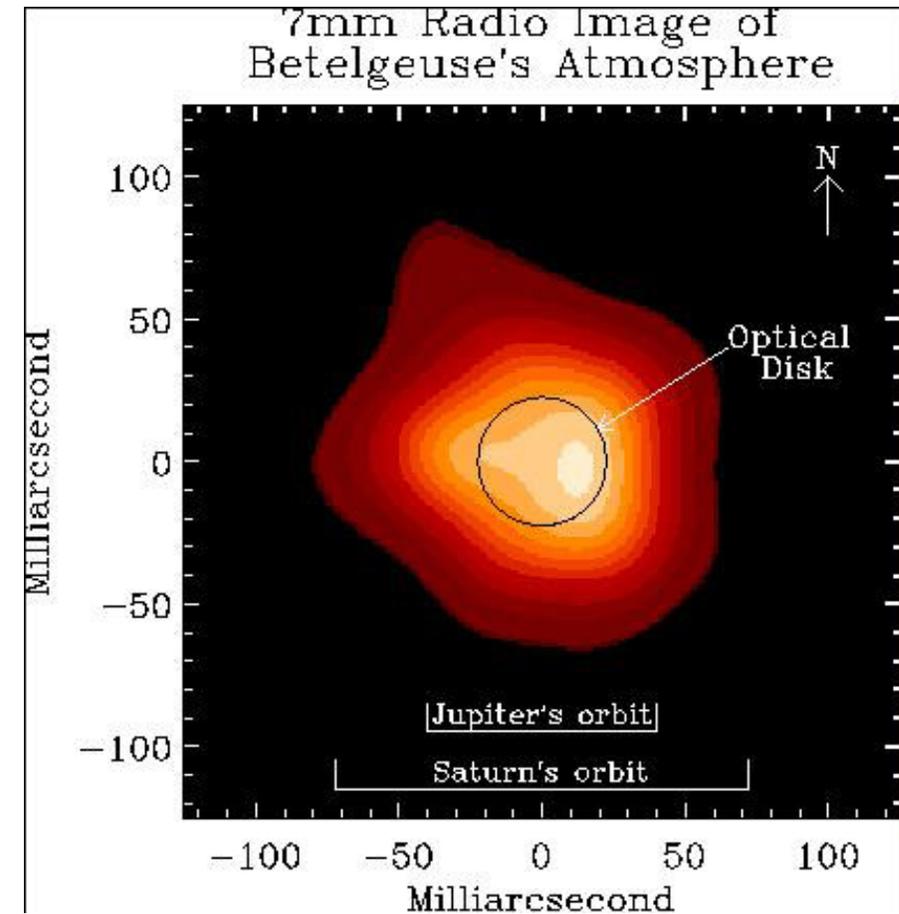
binaires

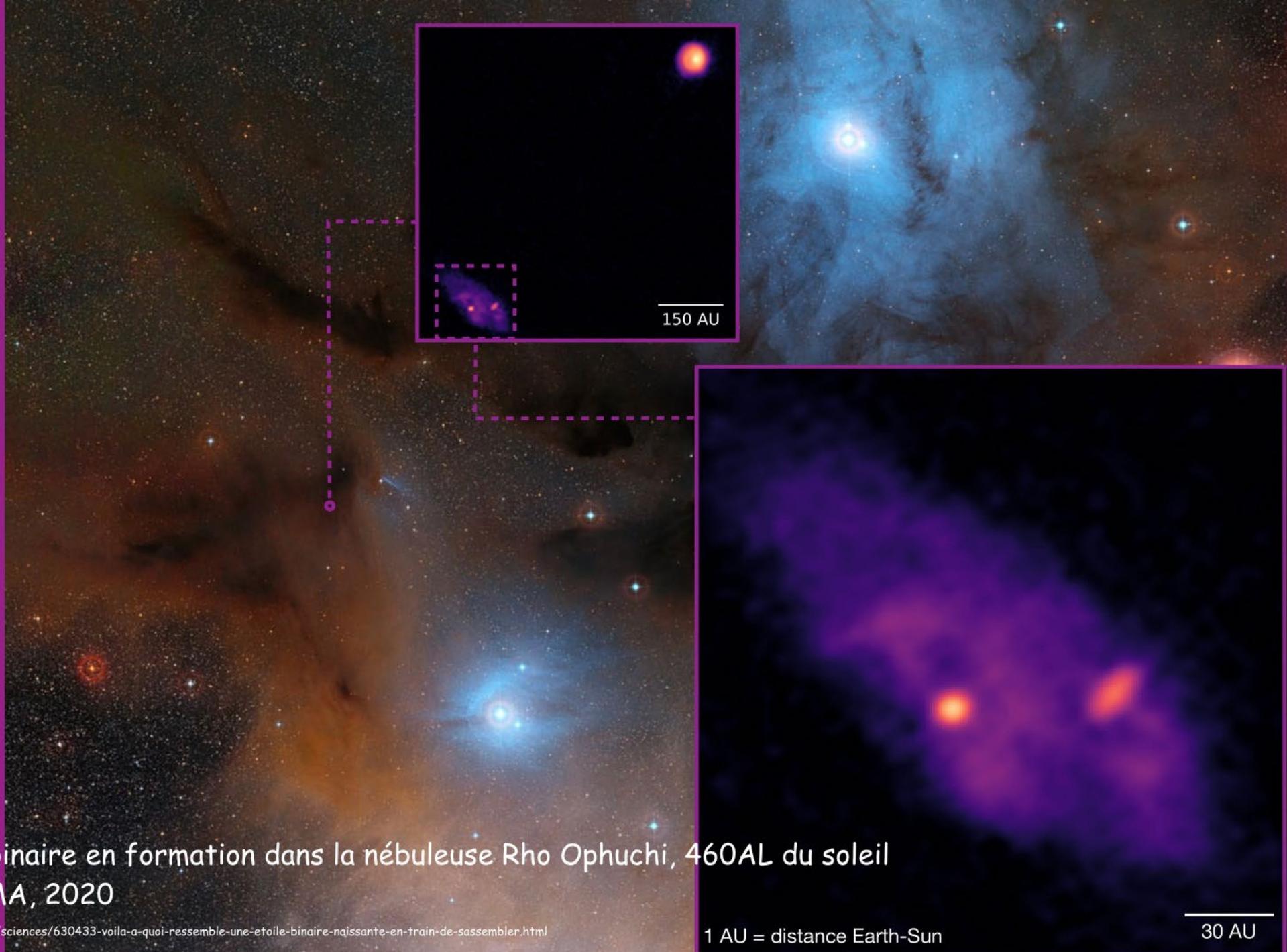
1 exoplanète détectée à ce jour

BESTIAIRE DES AG:

→ pas d'étoiles massives

→ tous les stades d'évolution des étoiles de M entre 0,5 et $8 M_{\odot}$: séquence principale, GR, GRA, NB





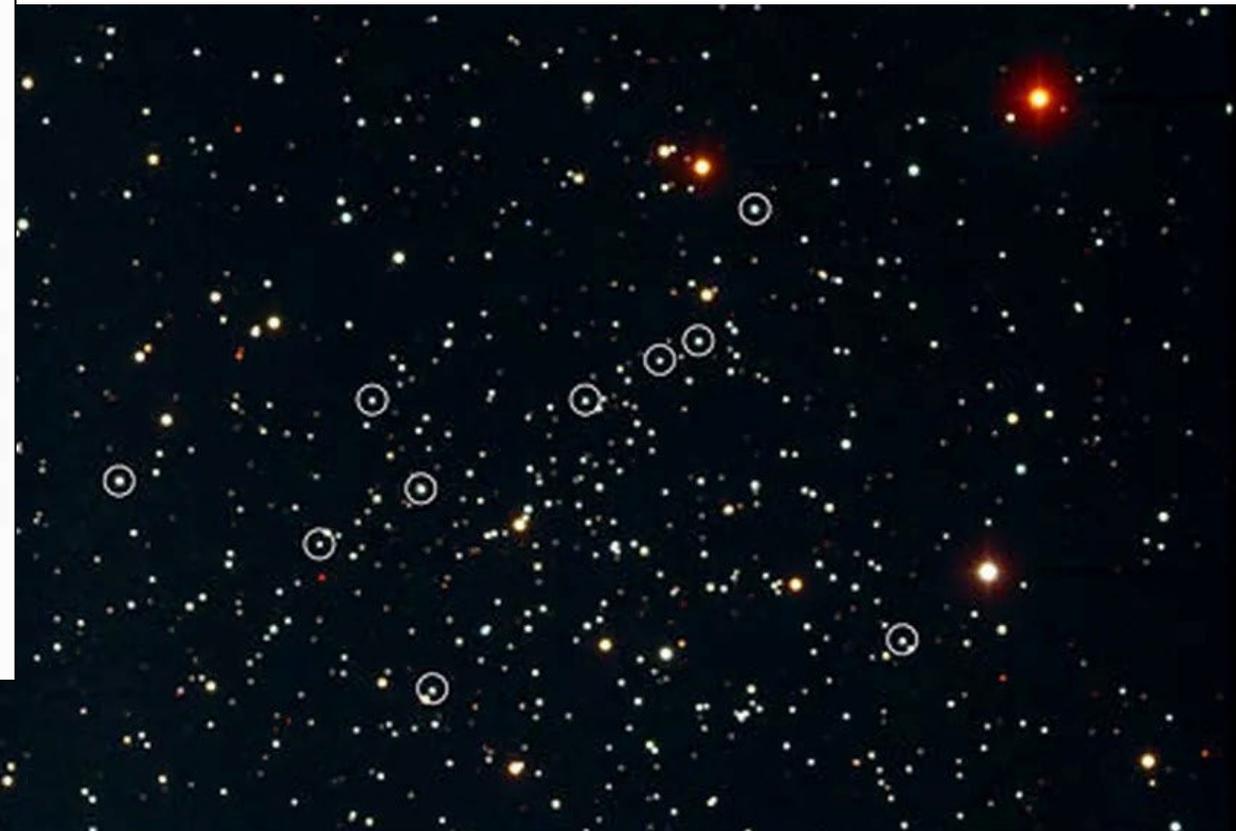
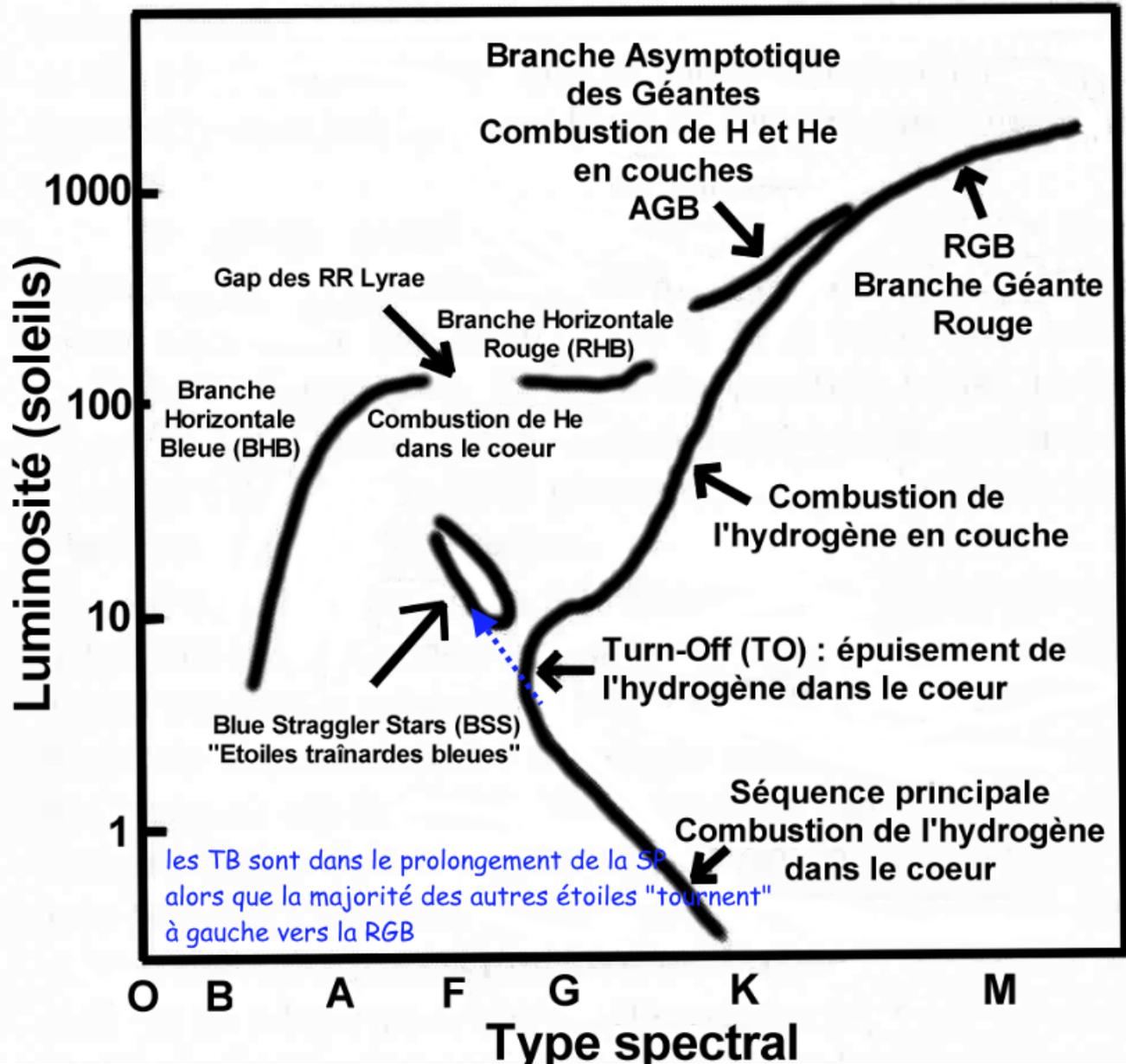
Systeme binaire en formation dans la nebuluse Rho Ophuchi, 460AL du soleil
image ALMA, 2020

<https://www.numerama.com/sciences/630433-voila-a-quoi-ressemble-une-etoile-binaire-naissante-en-train-de-sassembler.html>

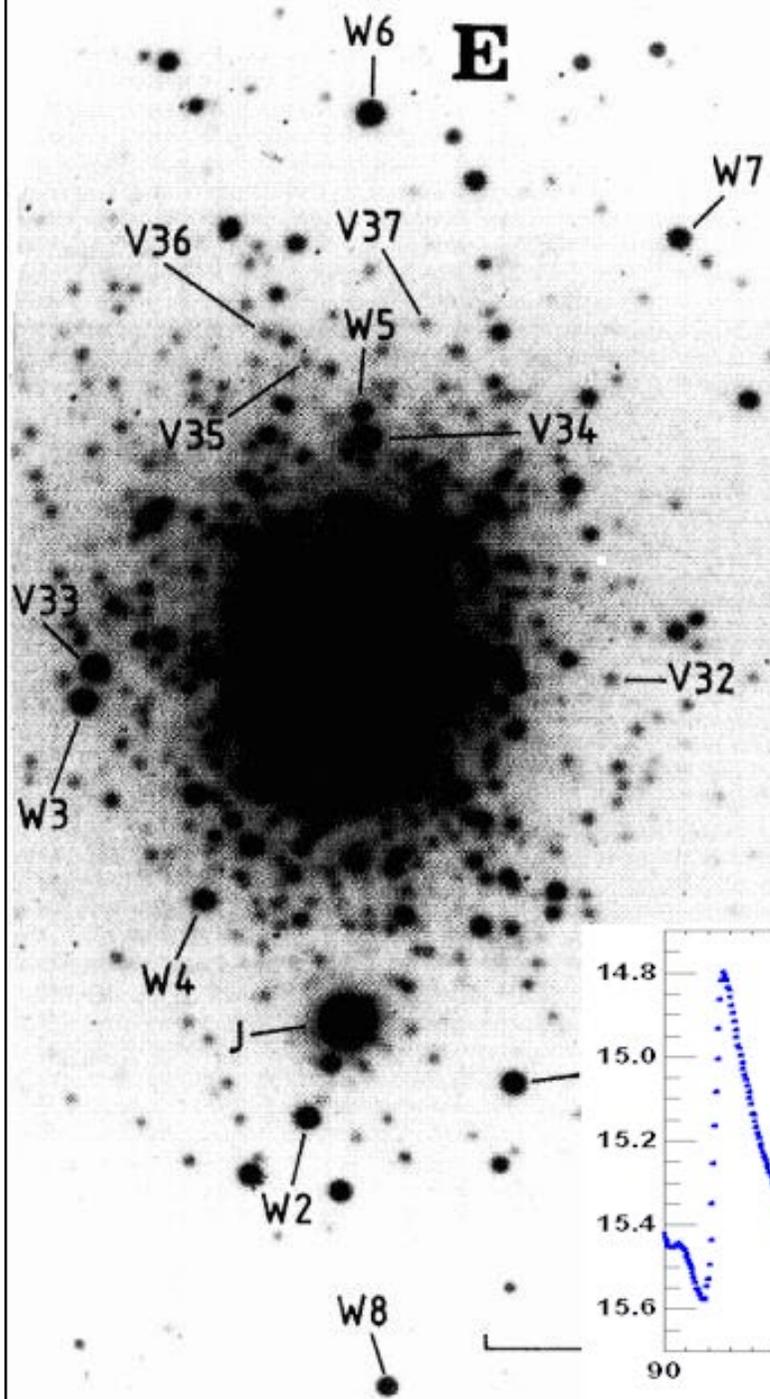
1 AU = distance Earth-Sun

30 AU

Les TB: une anomalie expliquée?...



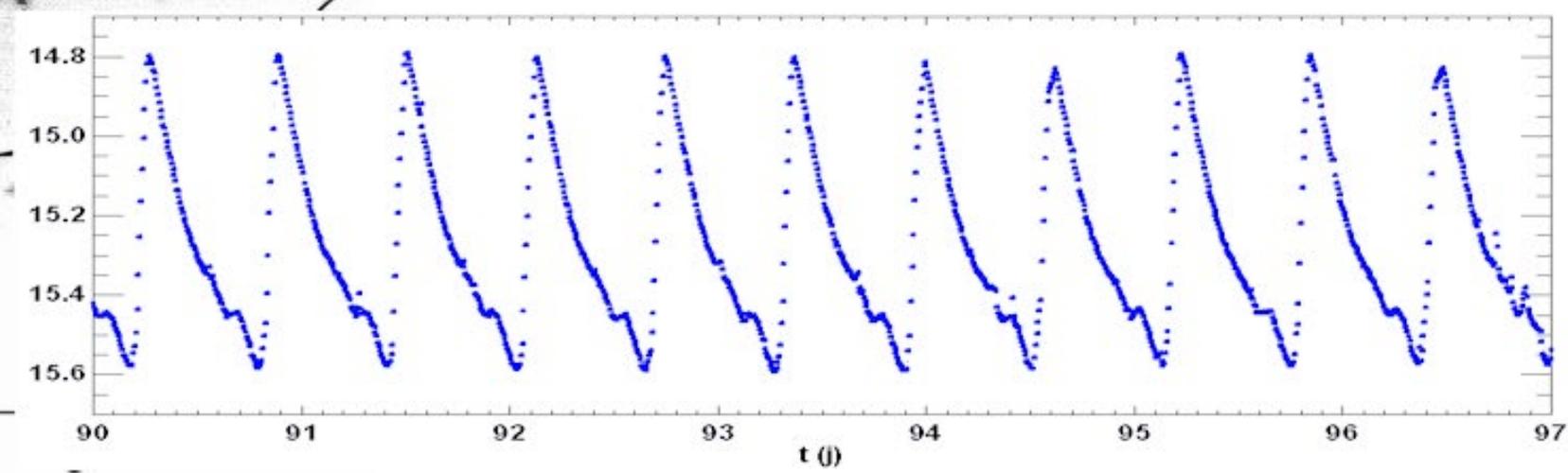
TRAINARDES BLEUES DANS NGC 188 Cep

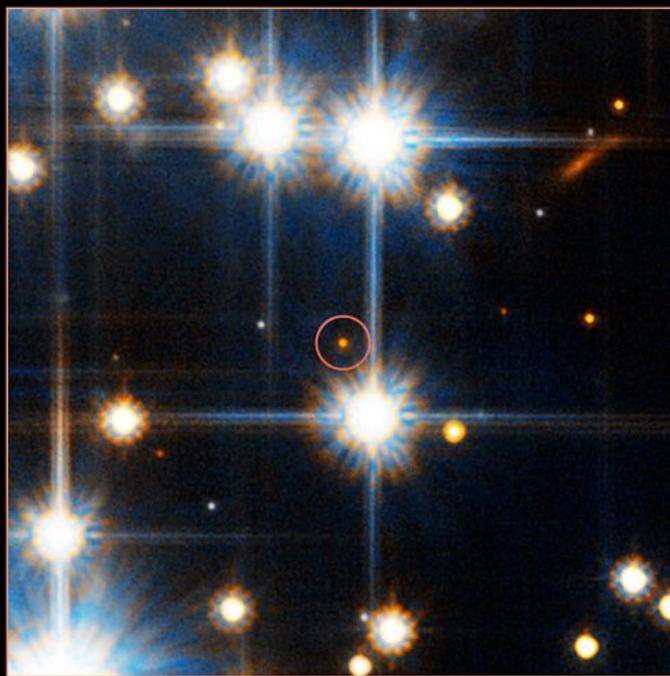
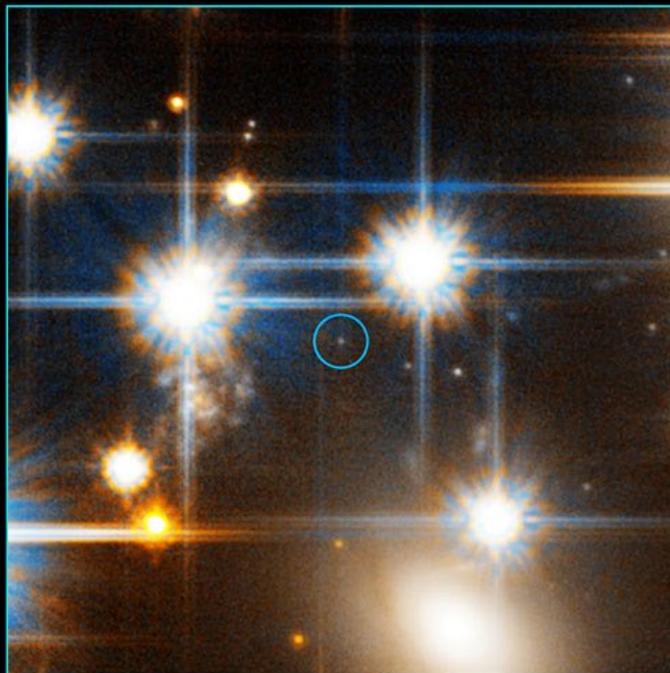
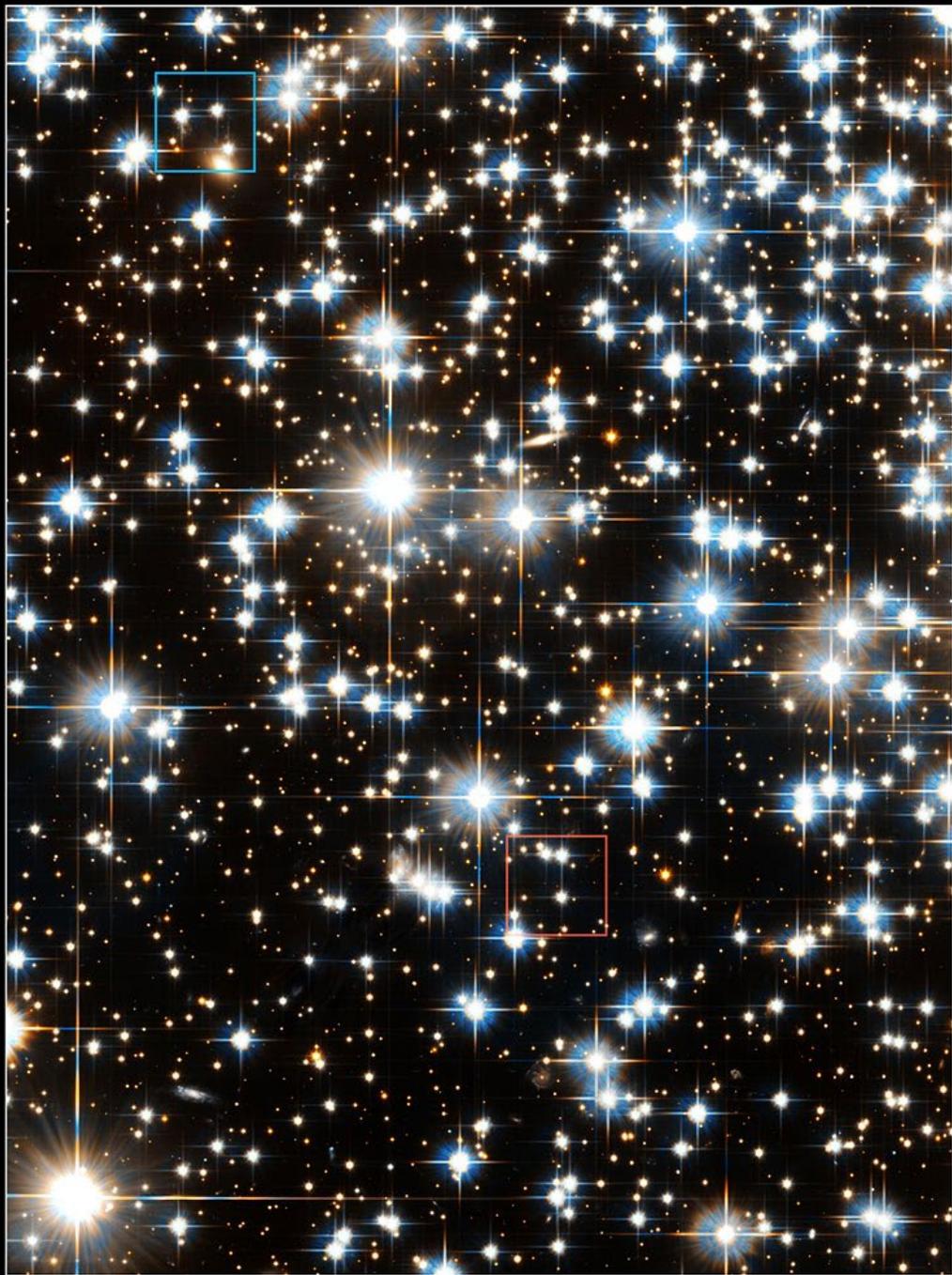


À gauche : RR Lyrae dans L'AG NGC 121
du Petit Nuage de Magellan

En bas : courbe de luminosité d'une RR Lyrae

→ variables très fréquentes:
N marqueurs des AG
→ importance pour le calcul
de la distance





NAINES
BLANCHES,
dans NGC
6397 Ara
à 7800AL

PULSAR,
PLANÈTE
EXTRASOLAIRE



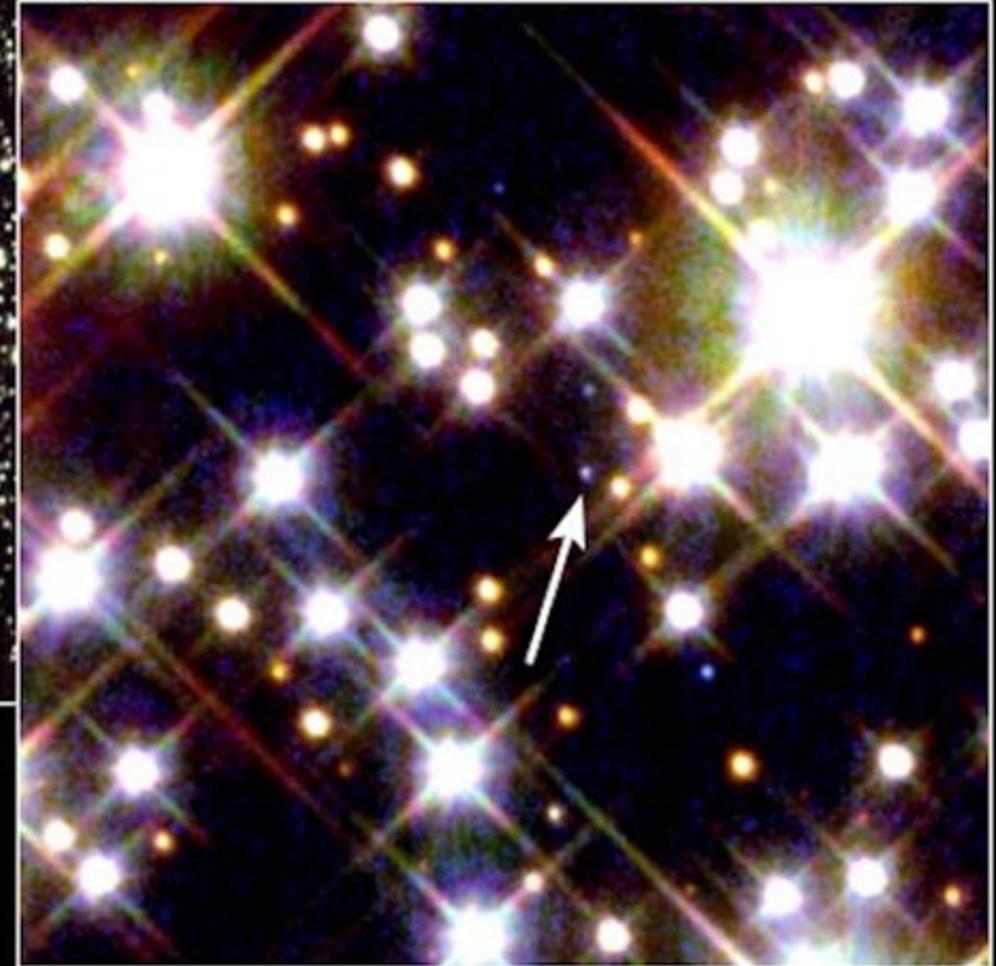
Globular Cluster M4
Location of white dwarf
companion to pulsar B1620-26

HST

NOAO

Hubble Space Telescope • WFPC2

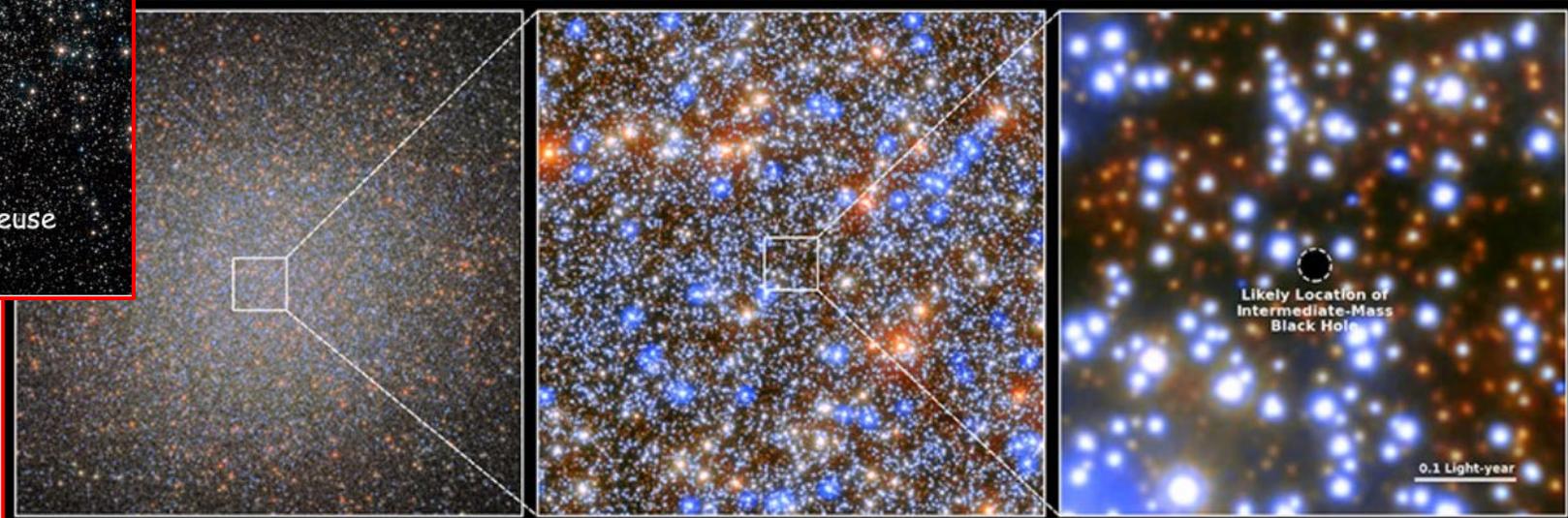
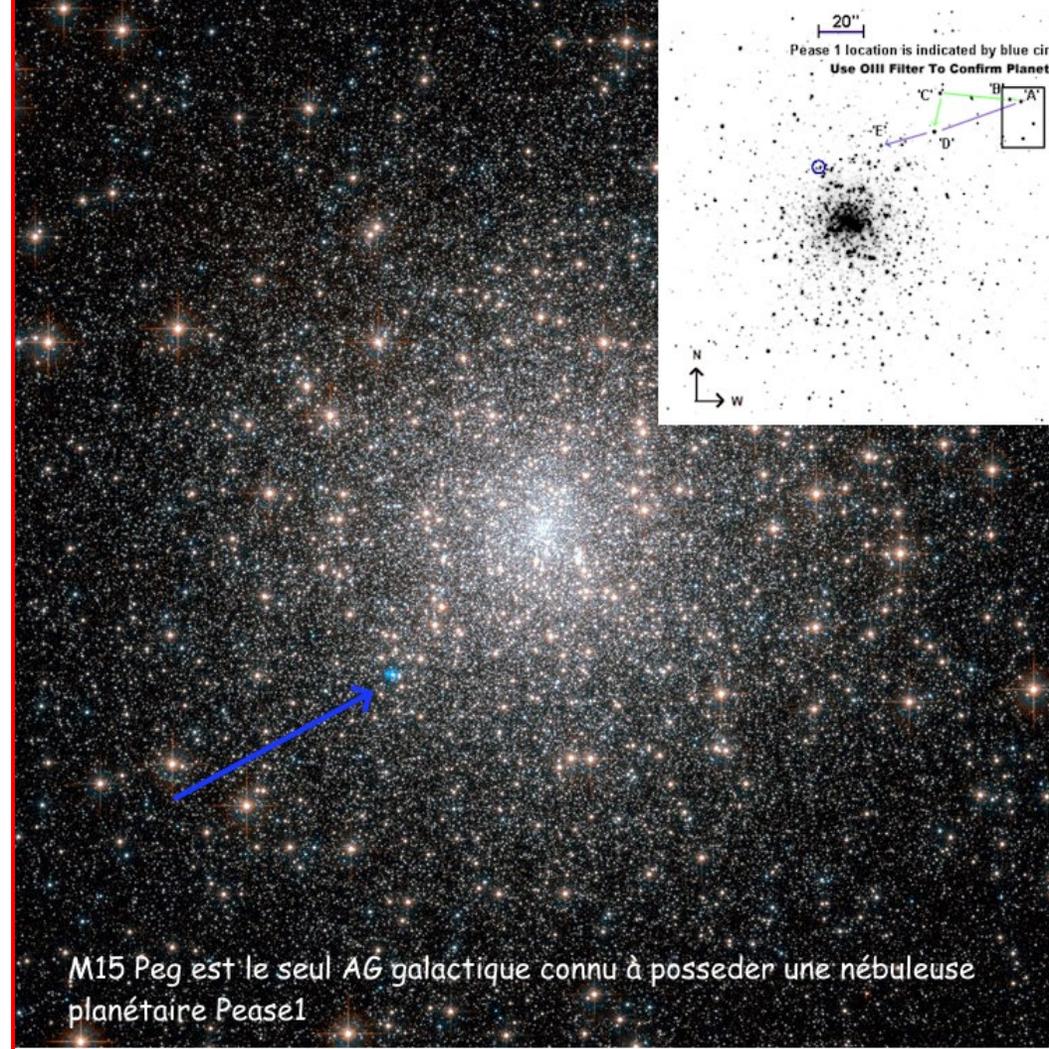
NASA and H. Richer (University of British Columbia)
STScI-PRC03-19b



PSR B1620-26 est accompagné d'une naine blanche (flèche) et d'une planète (non visible) de 2,5M/Jupiter

NÉBULEUSES PLANÉTAIRES TRÈS RARES

TROUS NOIRS DE MASSE INTERMÉDIAIRE



CONCLUSION: LES AG DE LA VL SONT VIEUX
population II (Baade: 1940): vieilles, pauvres en métaux,
formées avant la formation du disque de la VL

âge : entre 10 ET 13,8 Mds d'années

M3 : 11,4Mds d'années

M92 Her = 13,8Mds (± 750 Ms d'années)

<https://www.ca-se-passe-la-haut.fr/2023/06/nouvelle-estimation-de-lage-du-plus.html>

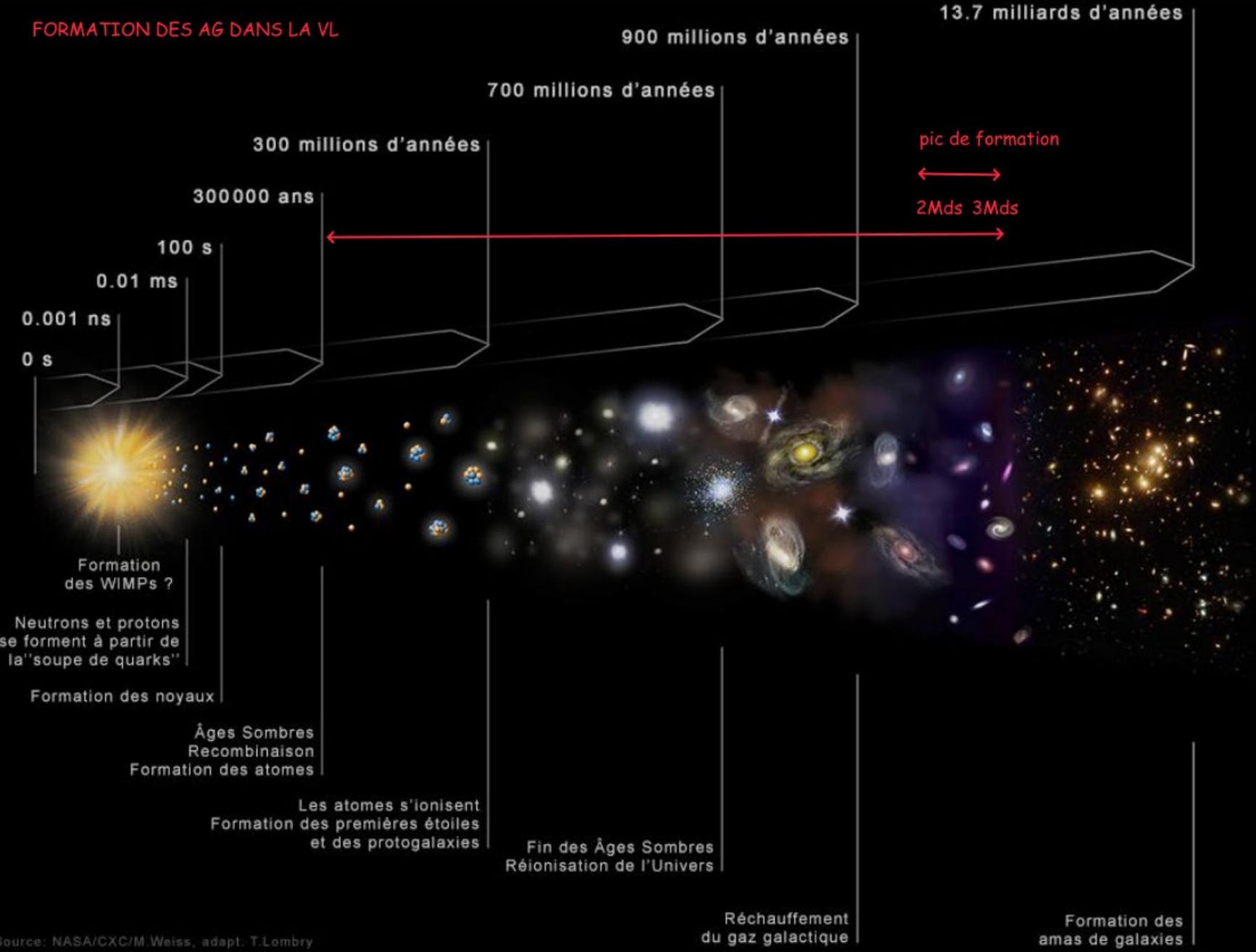
3^{ème} apport : CE SONT DES FOSSILES CONTEMPORAINS
DE LA NAISSANCE/JEUNESSE DES GALAXIES
→ INTÉRESSENT LES ASTRONOMES POUR
RECONSTRUIRE L'HISTOIRE DE LA FORMATION DES
GALAXIES

ORIGINE/FORMATION

1^{ER} MODE : FORMATION INITIALE IN
SITU À L'INTÉRIEUR DES GALAXIES

Impossible d'observer dans VL
→ observer les autres galaxies

FORMATION DES AG DANS LA VL



FORMATION
CONTEMPORAINE
DE CELLE DES
GALAXIE

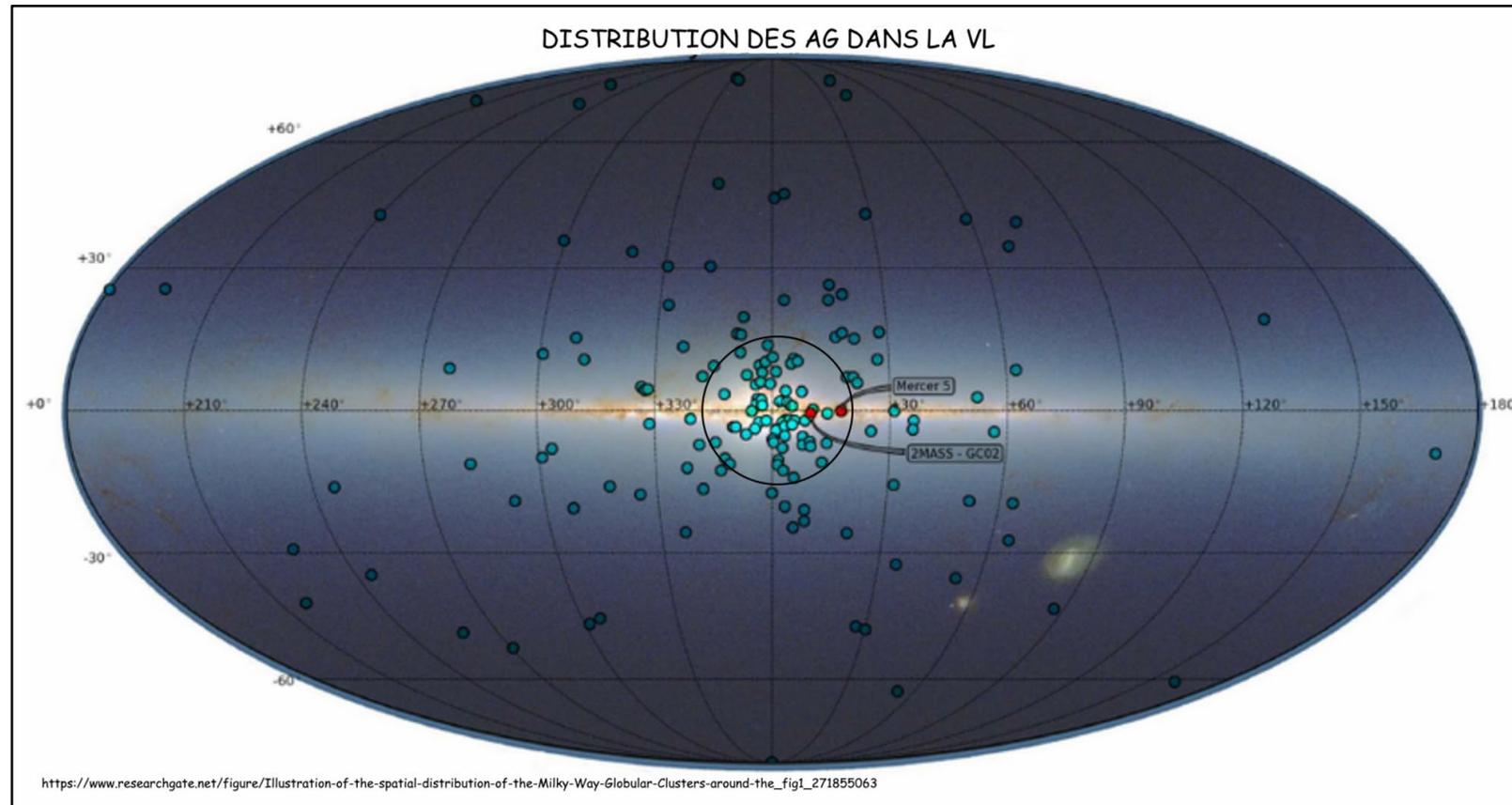
GRUMAUX
→ SUPER-AMAS
OUVERTS
→ AG
(AVEC ÉTOILES
MASSIVES 10 À
300 M_☉)

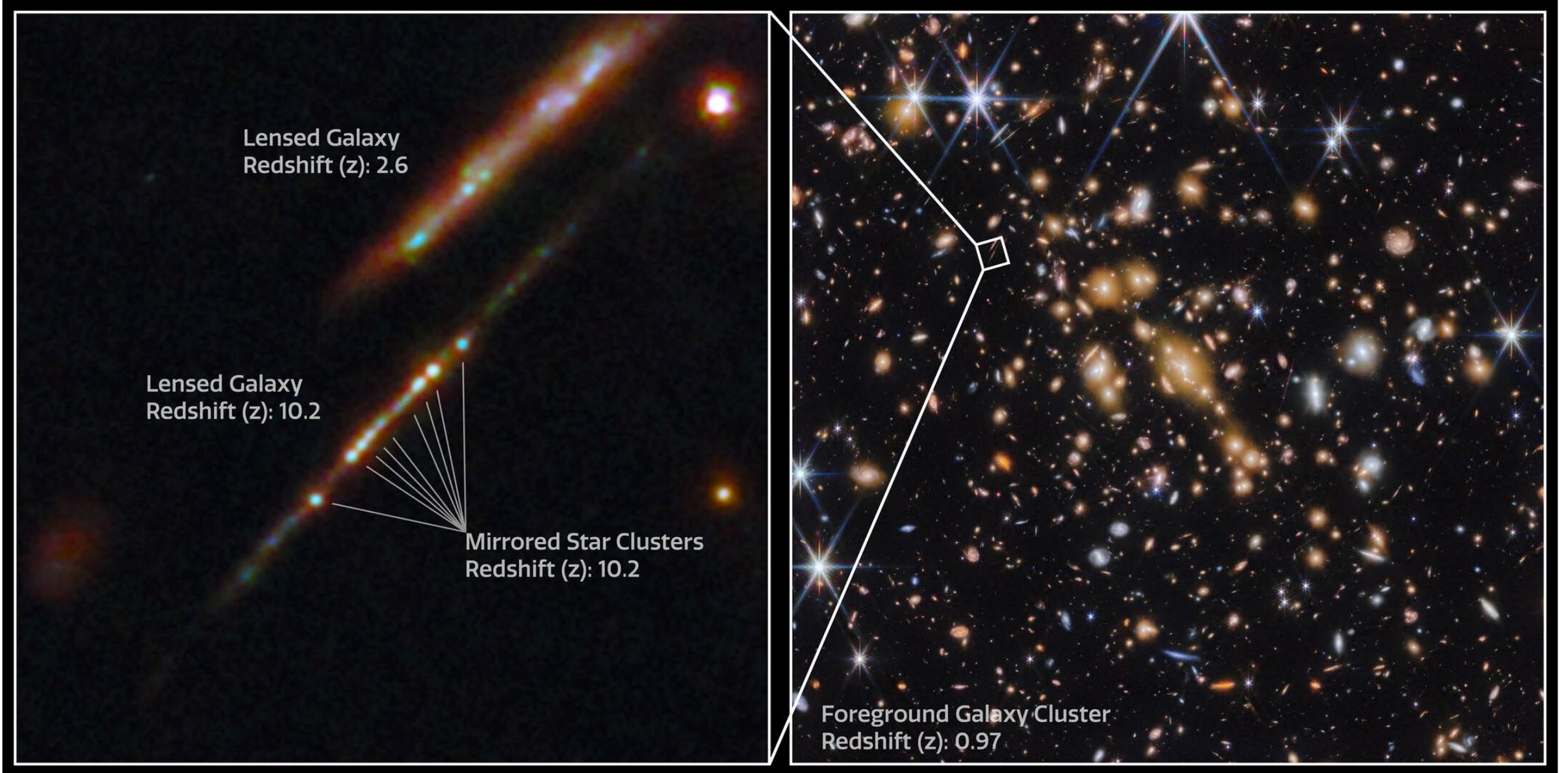
→ SN & VENTS
STELLAIRES
CHASSENT LE GAZ

Source: NASA/CXC/M Weiss, adapt. T. Lombray

PEU À PEU « APLATISSEMENT » DE LA VL (EFFONDREMENT GRAVITATIONNEL) ET FORMATION DU DISQUE
AG ÉLOIGNÉS DU CENTRE GALACTIQUE SONT RESTÉS DANS LE HALO (CES AG ONT AUSSI UNE AUTRE ORIGINE...)

+ DE 1000 OBJETS / 200 ACTUELS → « MORTALITÉ INFANTILE »
IMPORTANTE





JWST : amas stellaires découverts dans l'Arc des Gemmes Cosmiques (SPT0615-JD1), grâce à la lentille gravitationnelle de l'amas de galaxies en avant-plan SPT CL (South Pole Telescope Cluster) J0615-5746. Âge estimé des amas (z): 10.2 soit 460Ms d'années après le Big Bang.

2ÈME MODE DE FORMATION: LES INTERACTIONS ENTRE GALAXIES

LE CONSTAT :

CERTAINS AG SONT PLUS JEUNES (NGC 1818 GNM : 40Ms D'ANNÉES)
COMMENT EXPLIQUER CES DIFFÉRENCES?





EX. DE LA GALAXIE DES ANTENNES

Crv:

NGC 4038/4039 À 70Ms AL

COLLISION DE 2 GALAXIES

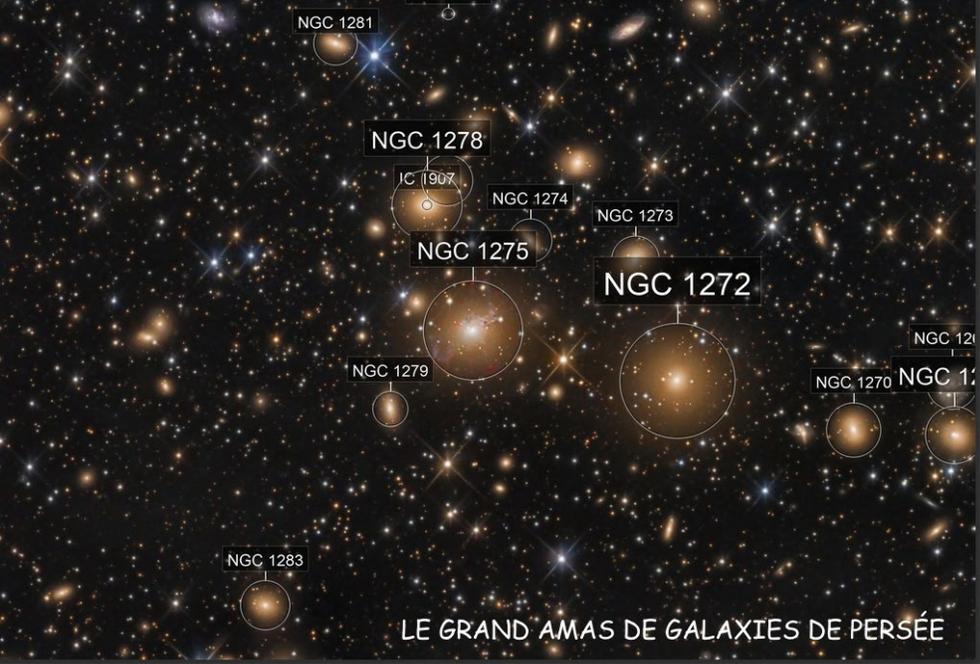
→ EFFET DE MARÉE DANS LES NUAGES DE GAZ

→ STARBURST « FLAMBÉE D'ÉTOILES (POINTS BLANCS + ZOOM)

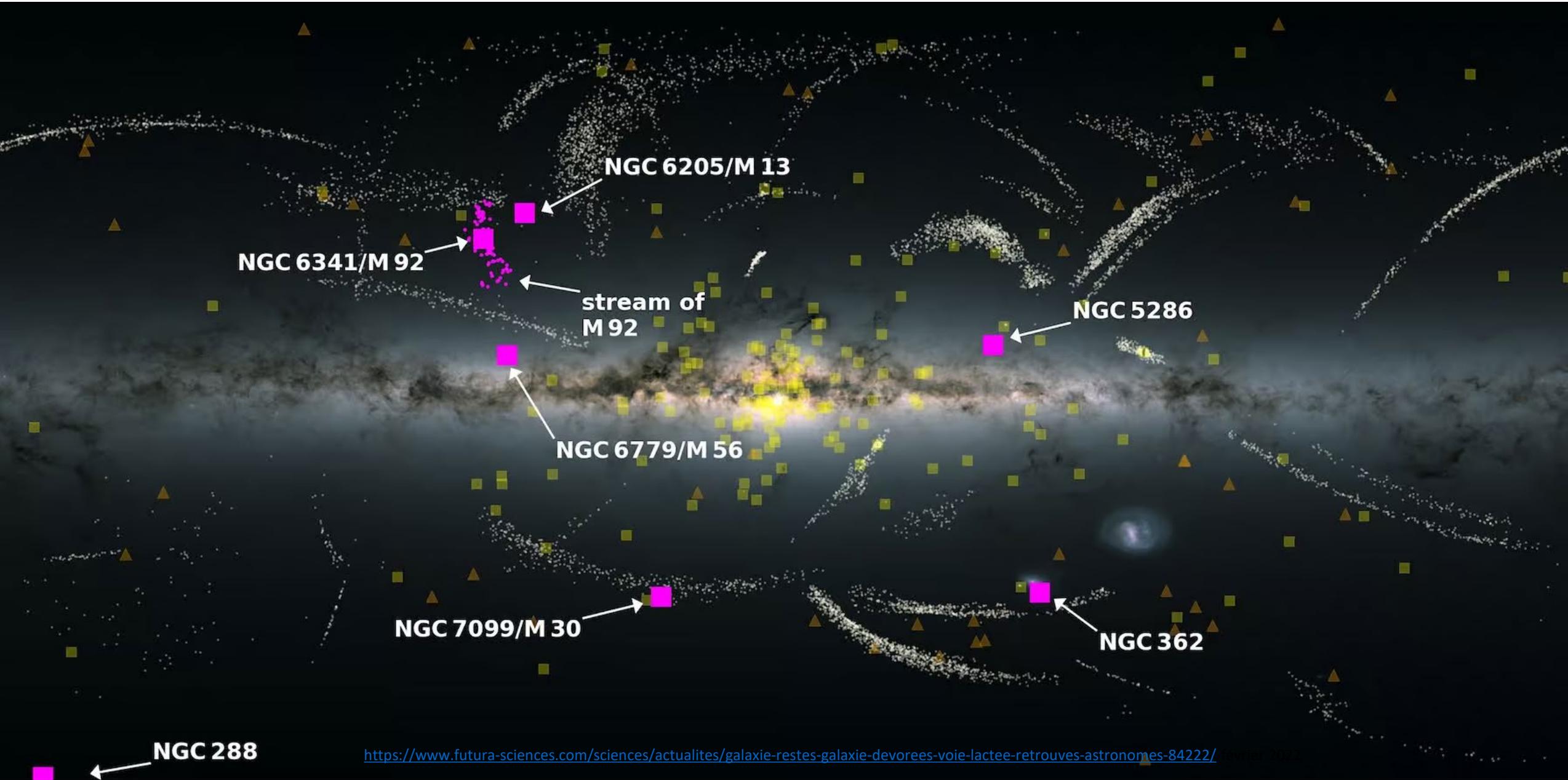
→ FORMATION DE SUPER AMAS STELLAIRES QUI ÉVOLUERONT:

→ EN AO

→ EN AG



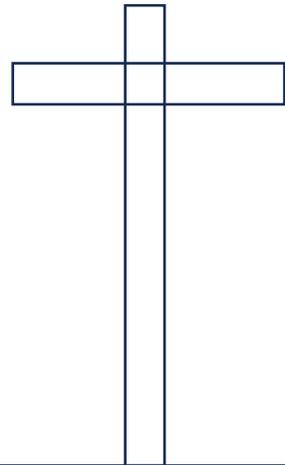
LE GRAND AMAS DE GALAXIES DE PERSÉE



<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/galaxie-restes-galaxie-devorees-voie-lactee-retrouves-astronomes-84222/>

Les points et les carrés en violet correspondent aux objets amenés dans la Voie lactée par l'événement de fusion nouvellement découvert « Pontus » (collision $\approx 8/10$ Mds d'années)

DES OBJETS
ÉTERNELS?



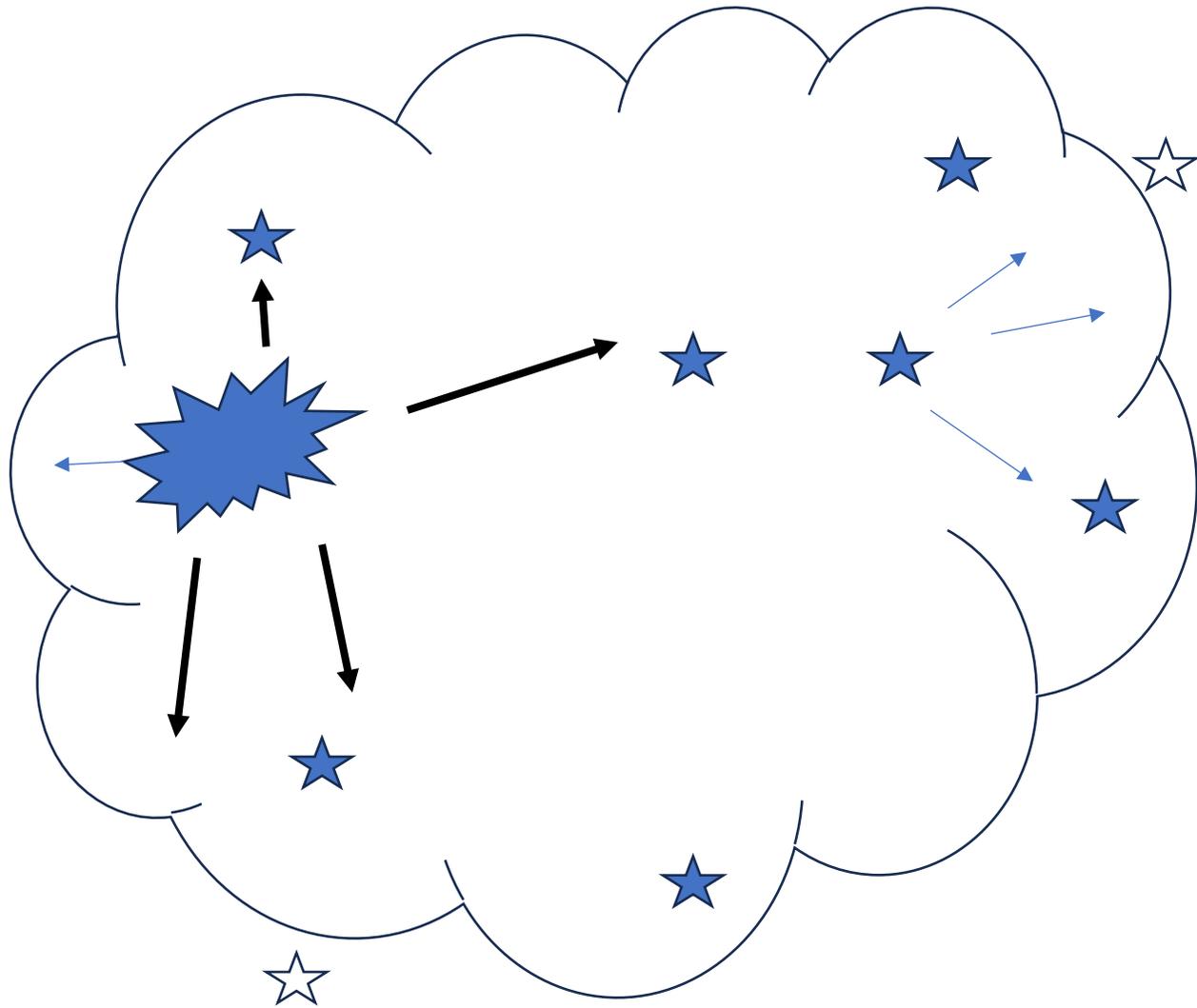
Ci-git NGC 99999
sacrifié sur l'autel
de l'évolution
cosmique

LE CONSTAT:

Population estimée au début de la VL : $\approx 1000 AG$

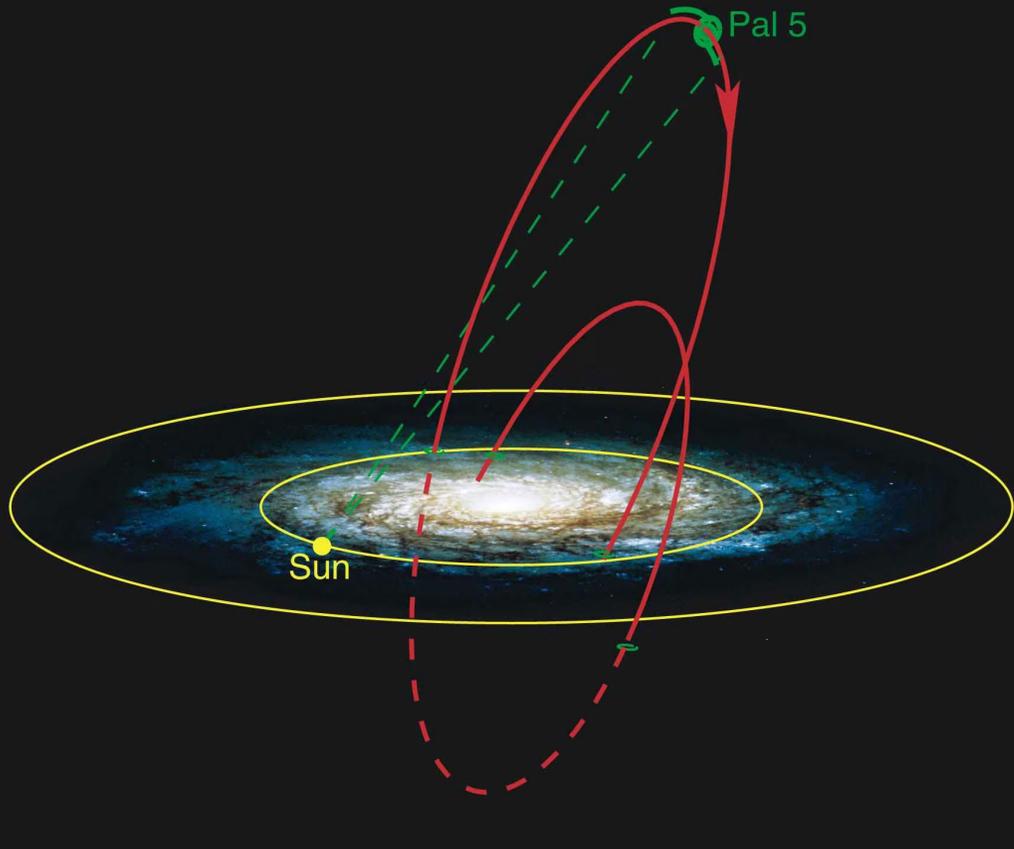
Population actuelle estimée: ≈ 300

Conclusion : les AG « disparaissent »
4 modes de disparition



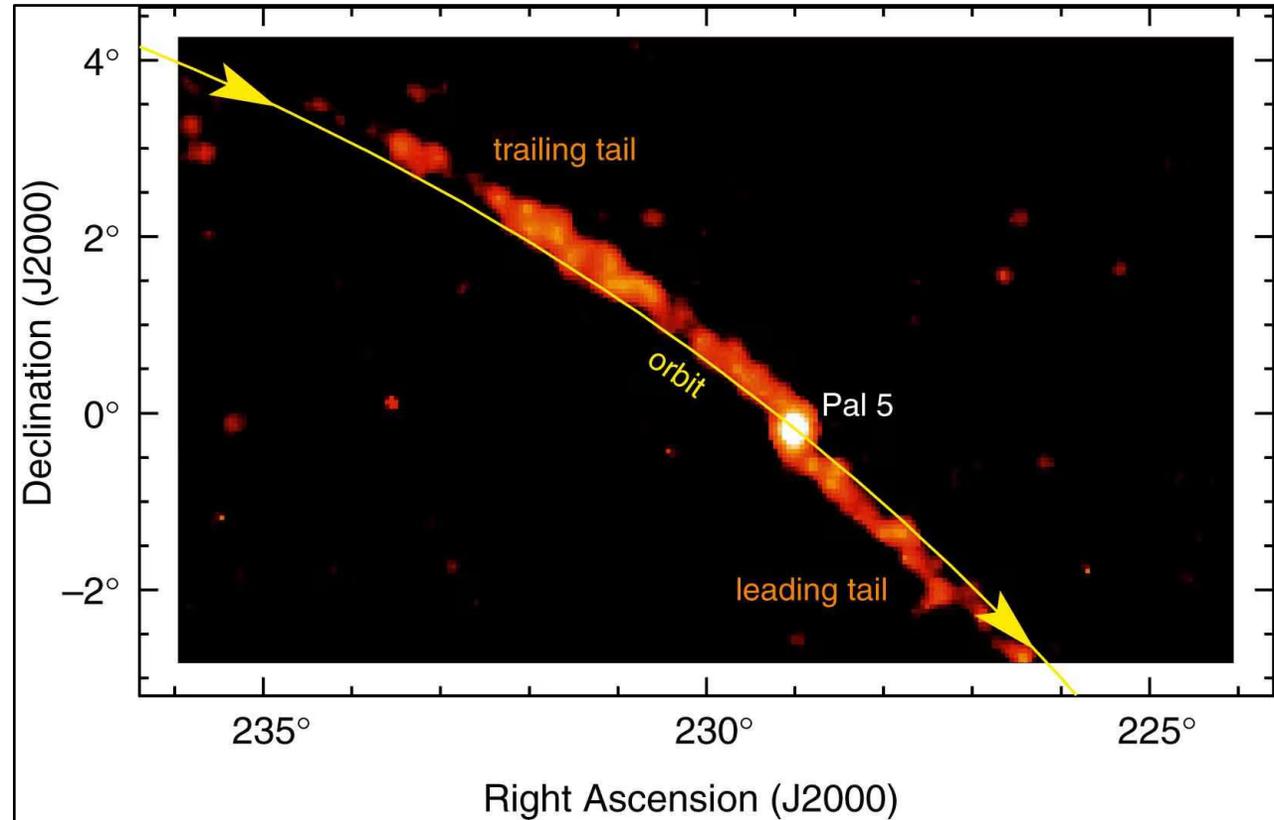
1) RELAXATION VIOLENTE :

- amas jeune
- vents stellaires violents
- supernovæ
- expulsion du gaz interstellaire
- expulsion d'étoiles
- dislocation de l'amas

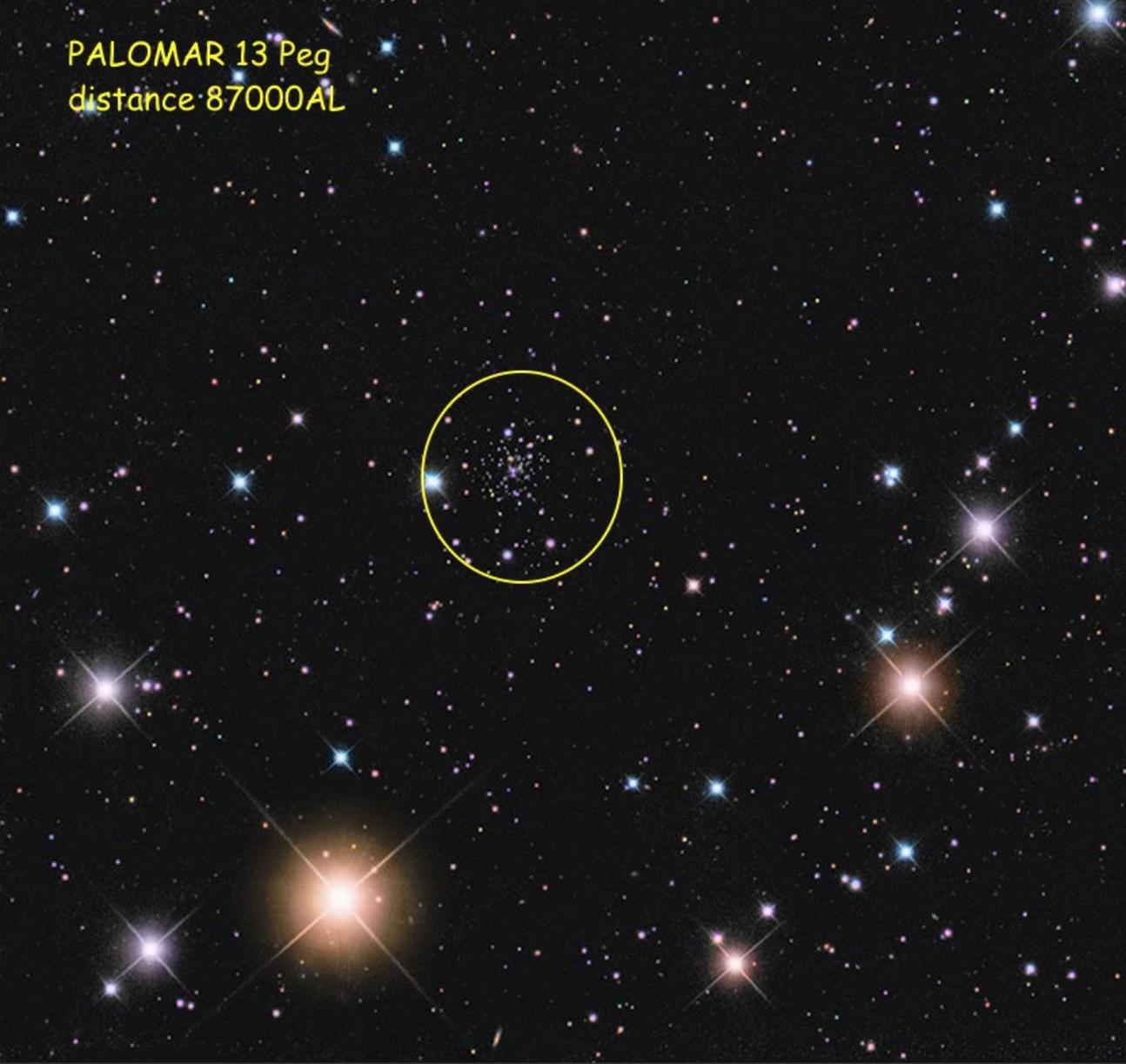


2) CHOC AVEC BULBE OU DISQUE

Ex. de Palomar 5 Ser :
 « épluchage » de l'amas
 + « chute » vers le centre
 galactique
 → dislocation



PALOMAR 13 Peg
distance 87000AL



2) CHOC AVEC BULBE OU
DISQUE

L'EXEMPLE DE
PALOMAR 13 Peg

Milky Way halo structure



3) FRICTION DYNAMIQUE

Rappel :

halo = vieilles étoiles

« accrétée » + étoiles

« échappées » du disque/bulbe +
AG

CSQ :

→ friction entre ces étoiles et
les AG → perturbations

→ étoiles s'échappent

→ en interaction avec le mode 2

4) RELAXATION INTERNE

a) Des collisions de temps en temps donnent assez d'énergie à des étoiles pour qu'elles s'échappent = « évaporation »

→ sur des Mds d'années perte importante d'étoiles

b) effondrement cataclysmique du cœur:

- au conditionnel pour l'instant
- rupture de l'équilibre au cœur de l'AG
- processus d'effondrement en cours déjà observé
- résultat final: inconnu



CONCLUSION

PALOMAR 6 Oph

500 000 étoiles

25000AL

il est très proche du centre de la VL

DES OBJETS PARTICULIERS:

- DES JOYAUX ASTRONOMIQUES
- DES OBJETS INTIMEMENT LIÉS AUX GALAXIES
- DES VESTIGES « ARCHÉOLOGIQUES »
PERMETTANT DE COMPRENDRE LA
FORMATION/ÉVOLUTION (COLLISIONS-FUSIONS)
DES GALAXIES
- PERMETTENT AUSSI DE COMPRENDRE LA
STRUCTURES DES GALAXIES (DISTANCES, HALO)
- PERMETTENT DE COMPRENDRE L'ÉVOLUTION
STELLAIRE