

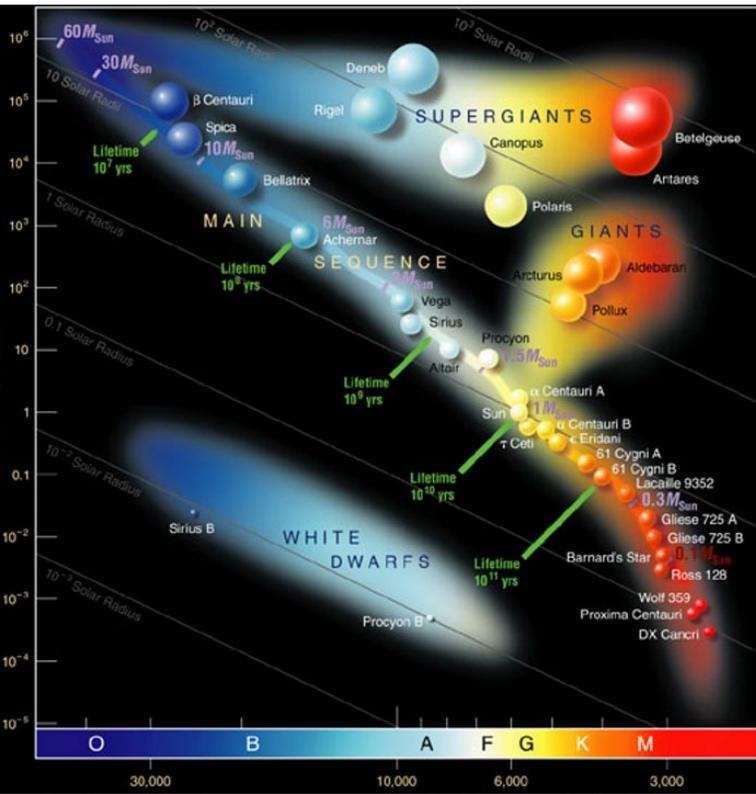


COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

ETOILES et TROUS NOIRS

Séquence principale



Physique des étoiles selon leur masse

Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Plan de l'exposé

1- Les différents types d'étoiles

Classification spectrale

Diagramme Hertsprung-Russell (HR)

2- Processus physiques

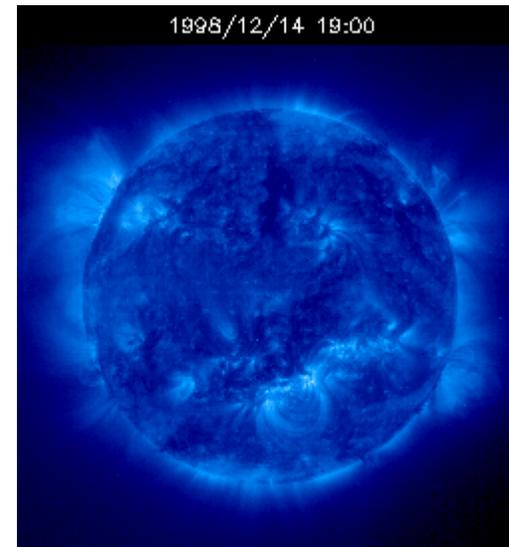
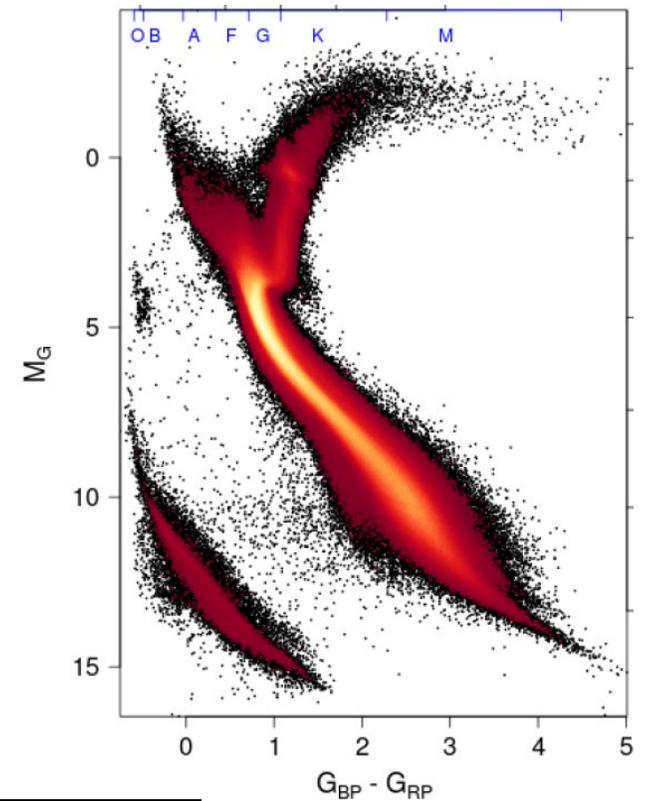
Intérieur des étoiles

Différents modèles

3- Evolution, vie et mort des étoiles

Masse comme paramètre premier

Métallicité, multiplicité



Un peu d'histoire: origine de l'énergie?

Diagramme HR: **1913**

C. Payne (UK → USA) PhD **1925**, raies spectrales, Composition H

Années 1920, W. Harkins, J. Perrin, **Arthur Eddington**: énergie des étoiles :
fusion de l'hydrogène en hélium ?

1927 Atkinson & Houtermans calculent l'énergie qui pourrait être gagnée
lors de la fusion ($0.7\% mc^2$), *mais répulsion des noyaux positifs?*

1927, Friedrich Hund découvre l'effet tunnel, qui permet à George Gamow
en **1938** d'interpréter la radioactivité alpha (émission d'un atome d'He)

L'équation de Schrödinger permet de calculer la probabilité du phénomène

En **1939**, Hans Bethe et coll. établissent la théorie de la fusion dans les étoiles

A partir de **1940**, la **recherche à des fins militaires** accélèrent les projets
technologiques qui aboutissent à la bombe atomique

C. Payne



A. Eddington



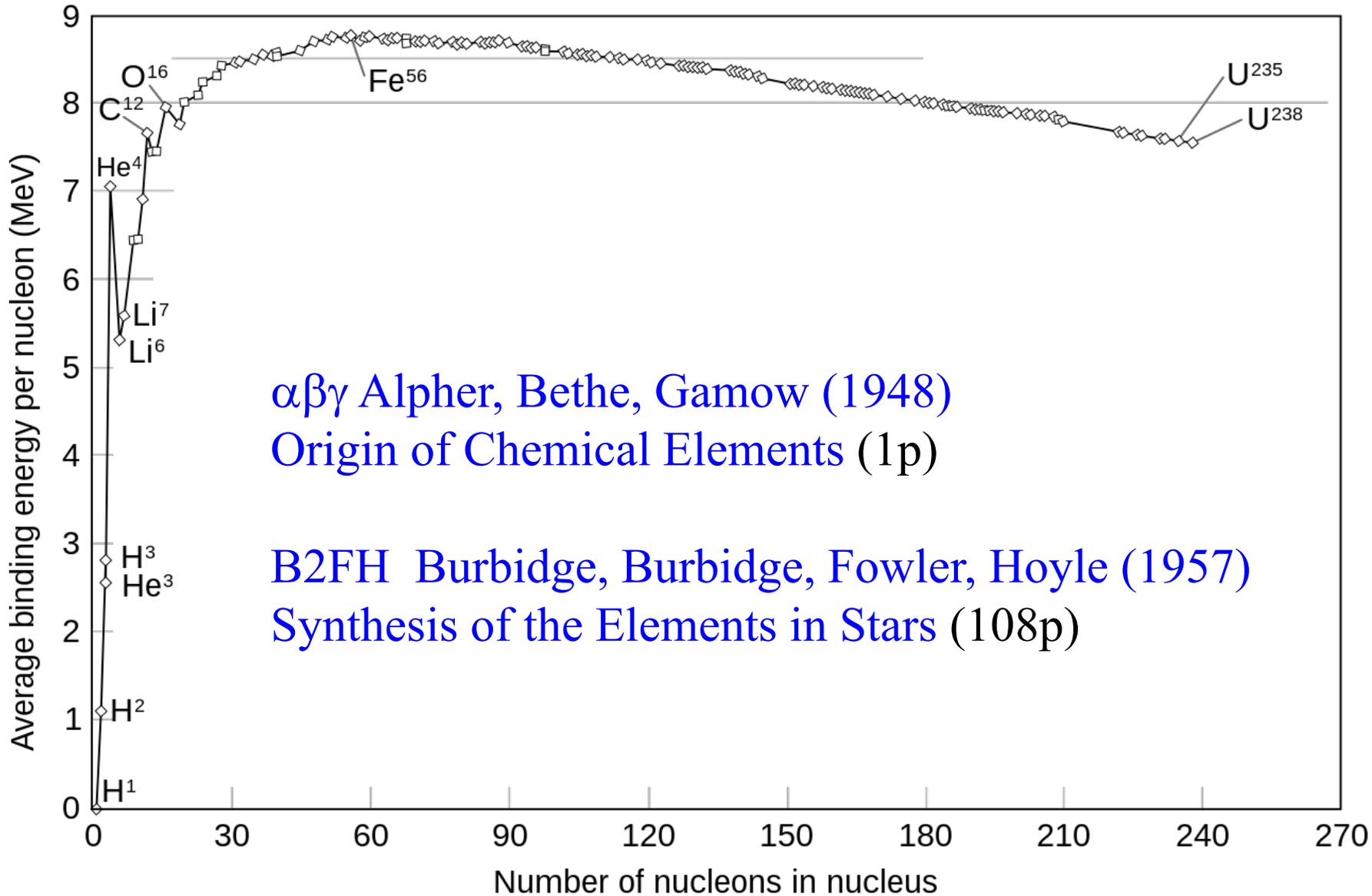
G. Gamow



H. Bethe



Nucléosynthèse des éléments dans les étoiles



$\alpha\beta\gamma$ Alpher, Bethe, Gamow (1948)
Origin of Chemical Elements (1p)

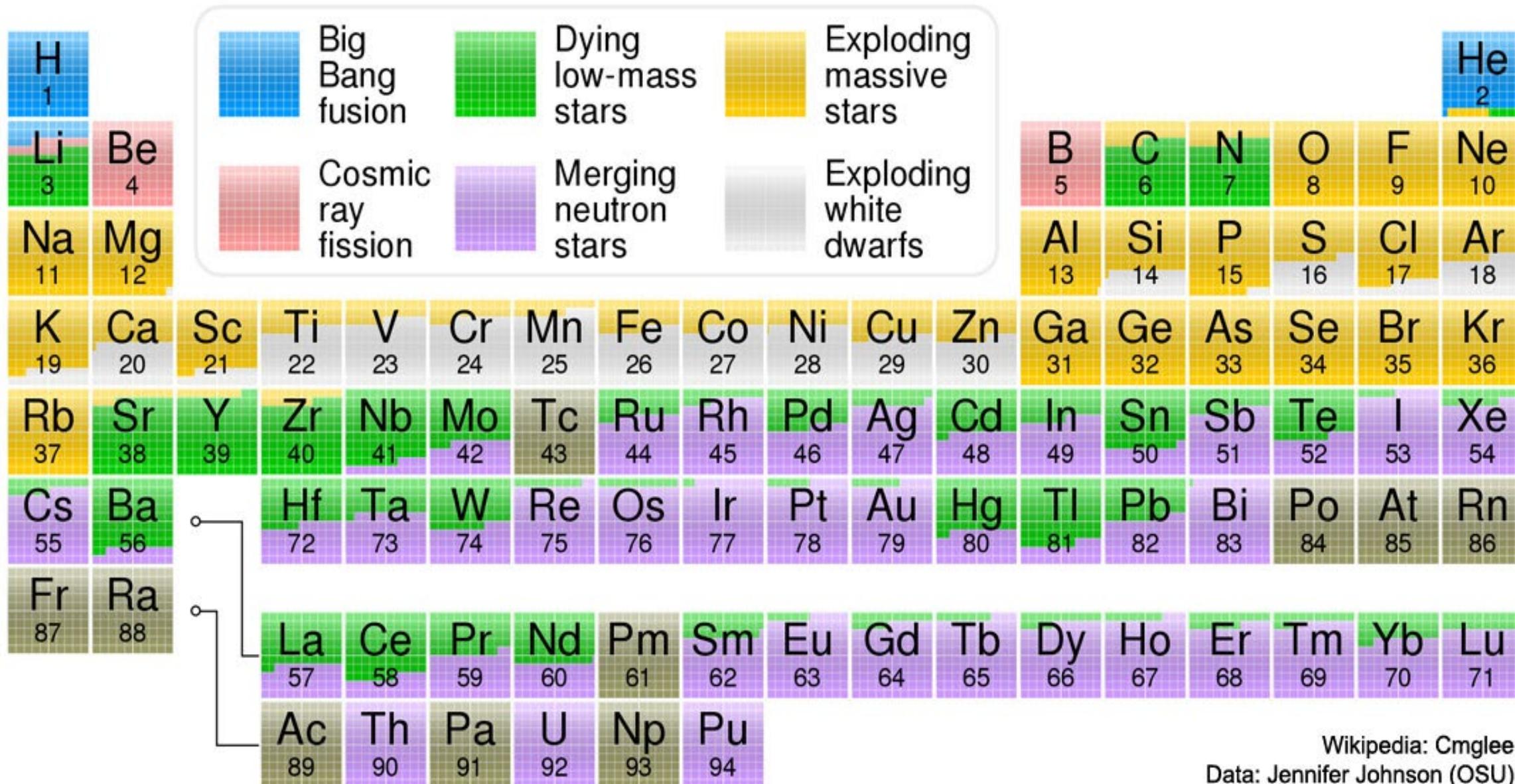
B2FH Burbidge, Burbidge, Fowler, Hoyle (1957)
Synthesis of the Elements in Stars (108p)

Ces développements ont permis de déterminer l'origine des éléments

Nucléosynthèse dans les étoiles, et aussi dans le Big Bang

B2FH jusqu'à Uranium

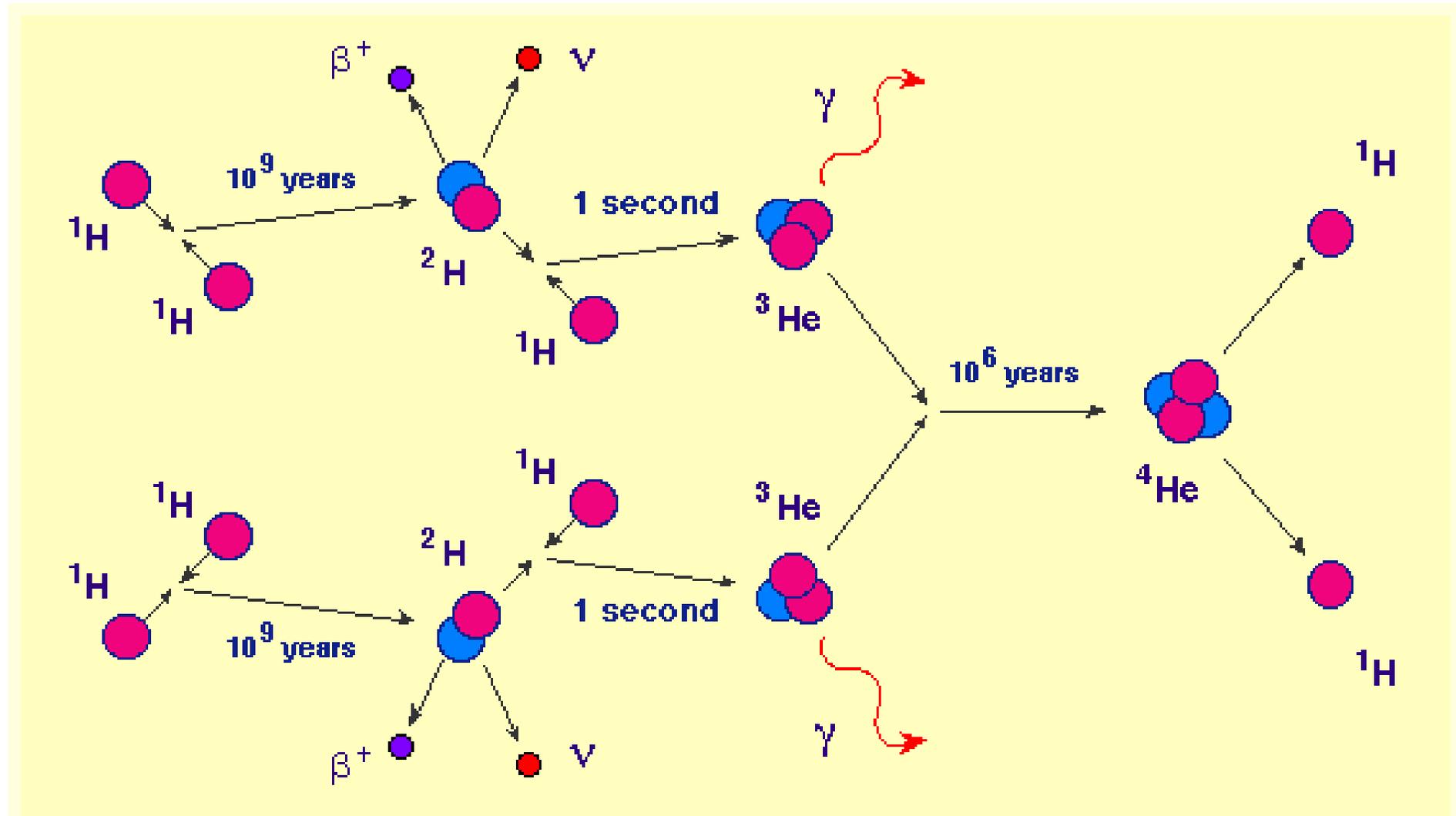
Eléments formés dans les fusions d'étoiles à neutron



Réactions nucléaires $H \rightarrow He$

Le début les réactions commence par la chaîne p+p

Étoiles de $1 M_{\odot}$



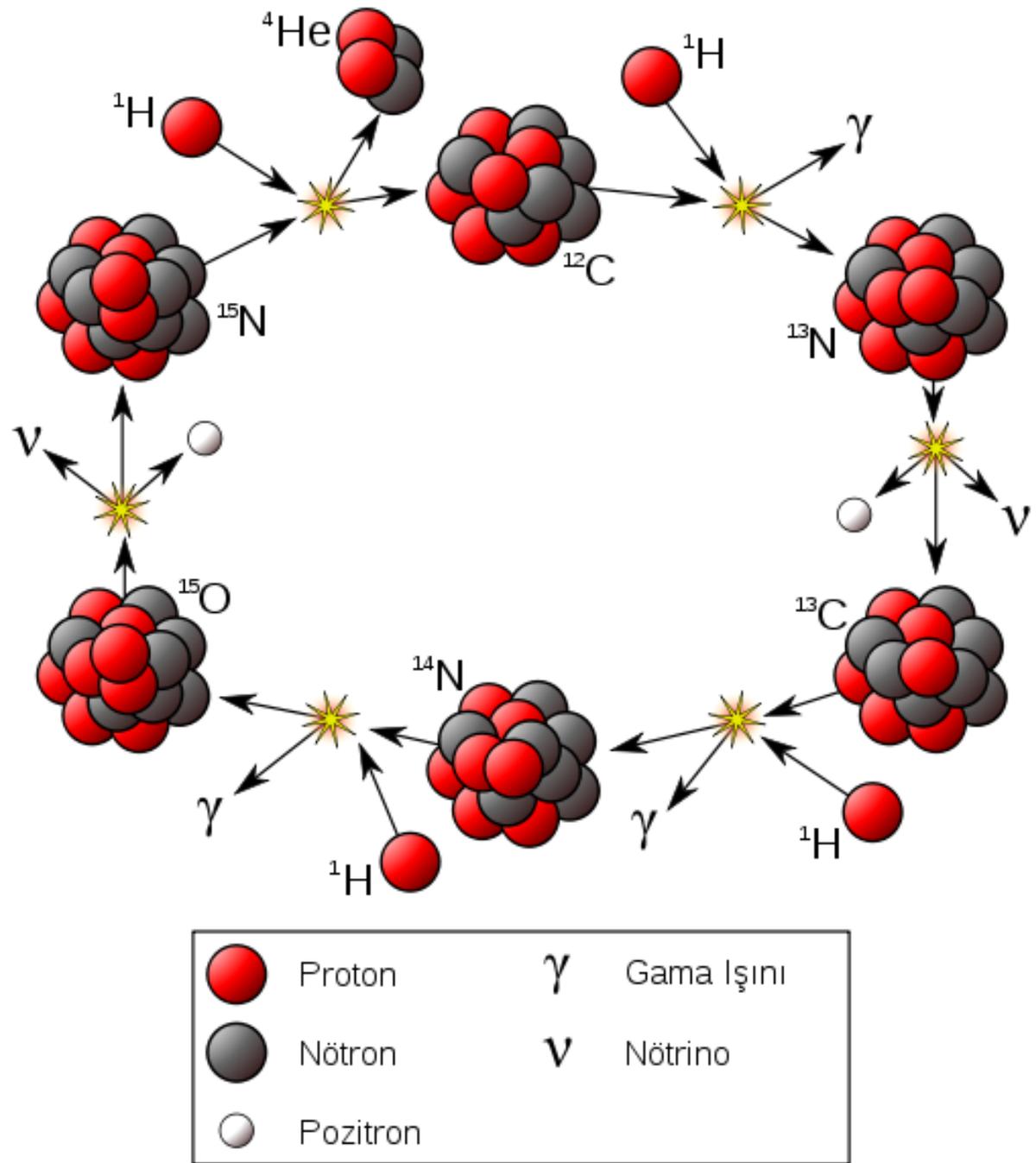
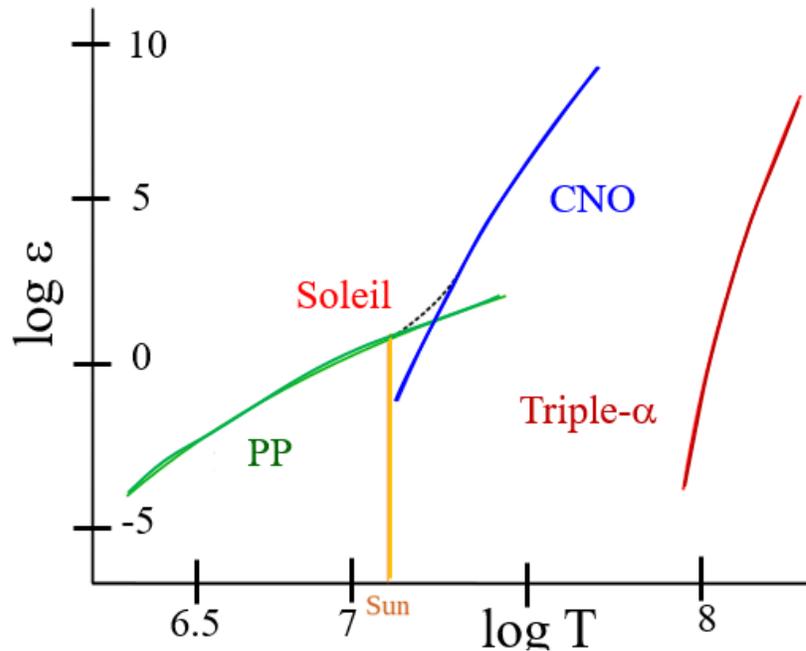
Main branch of the proton-proton chain.

Cycle CNO

Réactions nucléaires permettant de transformer H en He

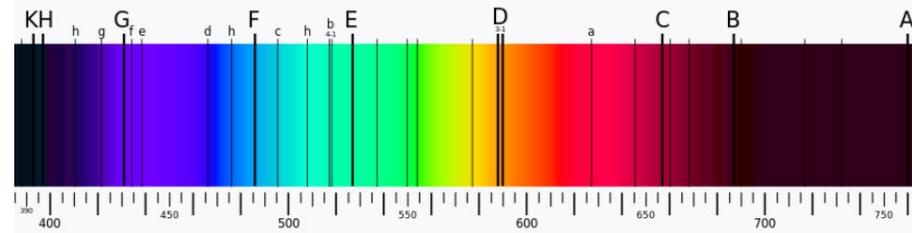
Carbone-Azote-Oxygène, ou cycle de Bethe
Les atomes C, N, O jouent le rôle de catalyseurs

Ces réactions demandent une température supérieure à p+p



Spectroscopie au XIXe

Fraunhofer découvre des raies d'absorption dans le Soleil,
 Identifiées en 1864 par H (Balmer)
 Puis He en 1868, par **Jules Janssen**



J. Janssen



1866, **Angelo Secchi**: première classification
 Selon les raies de leur spectre, Class I, II, II, IV bleu → rouge
 Plus tard, on comprit que cela correspondait à la **température de surface**

Type	Température ⁵	Couleur conventionnelle	Raies d'absorption
O	> 25 000 K	bleue	azote, carbone, hélium et oxygène
B	10 000–25 000 K	bleue-blanche	hélium, hydrogène
A	7 500–10 000 K	blanche	hydrogène
F	6 000–7 500 K	jaune-blanche	métaux : fer, titane, calcium, strontium et magnésium
G	5 000–6 000 K	jaune (comme le Soleil)	calcium, hélium, hydrogène et métaux
K	3 500–5 000 K	orange	métaux et monoxyde de titane
M	< 3 500 K	rouge	métaux et monoxyde de titane

Classification spectrale des étoiles

Edward C. Pickering et ses calculatrices:

Williamina Fleming: intensité raies H (type A, B)

Annie Jump Cannon: propose O,B,A,F,G,K,M en 1896

Classification de Harvard, IAU 1910

225 000 étoiles

Découverte par H. Leavitt de
la relation Période-Luminosité
des Céphéides



1777 étoiles

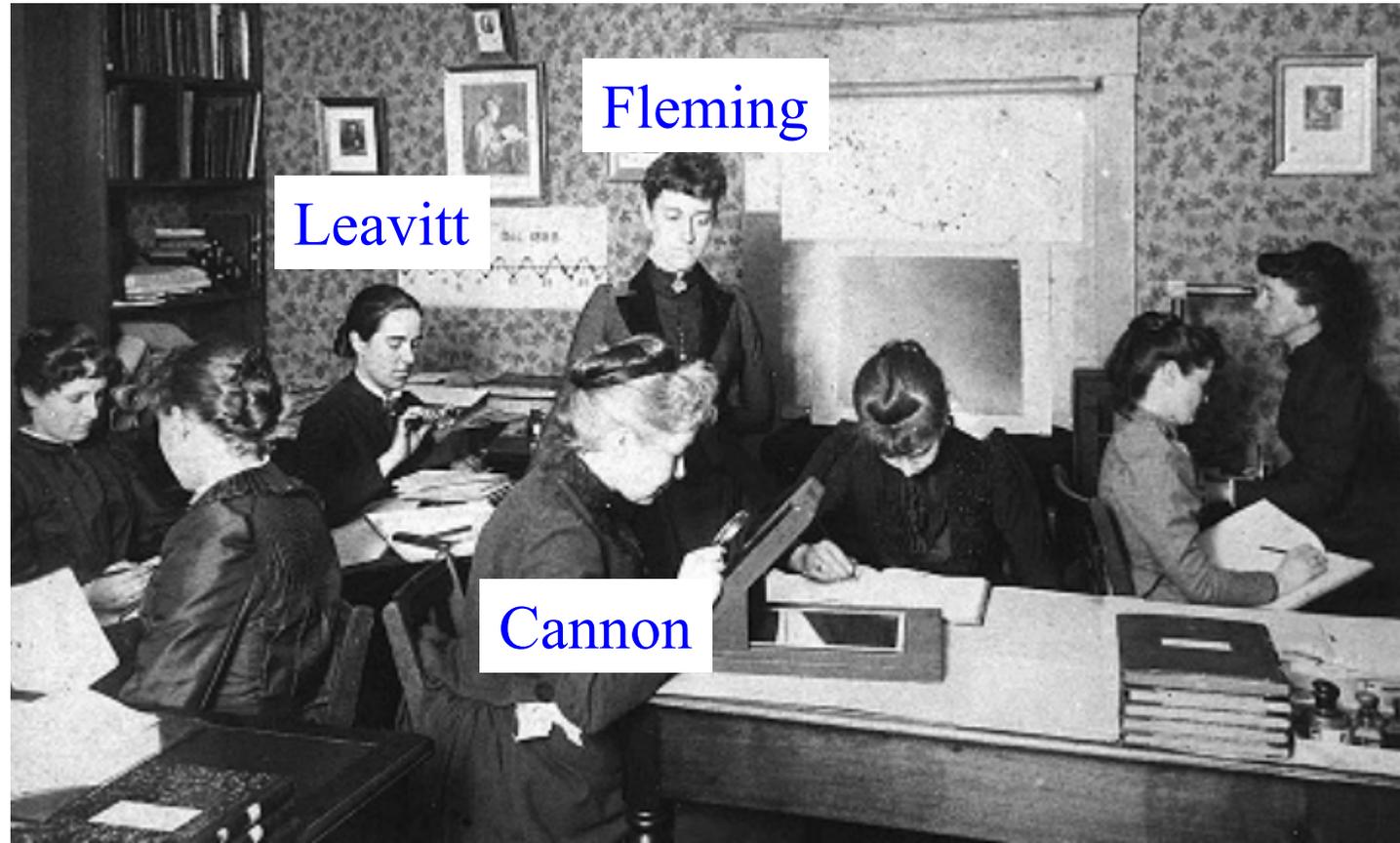


Diagramme de Hertzsprung-Russell

IAU 1910: E. Hertzsprung,
puis plus tard H. Russell, pensent
à un diagramme des étoiles
selon leur type spectral
OBAFGKM

Cf article dans Nature en 1914 →

Cela devient un diagramme
Couleur-magnitude

(B-V) un peu différent du type
spectral

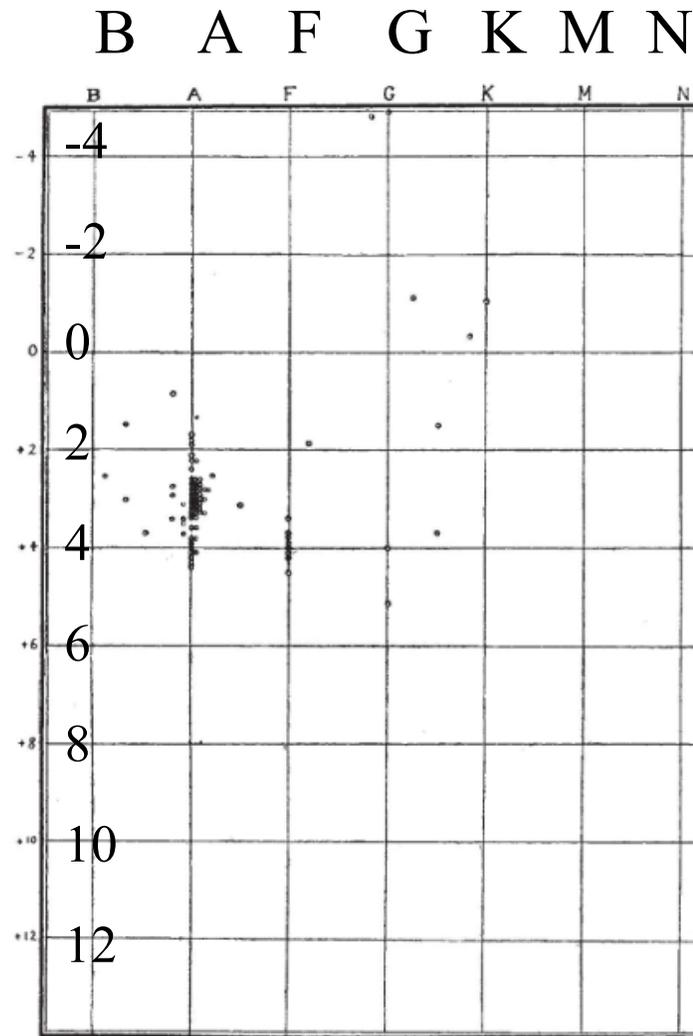


FIG. 4.

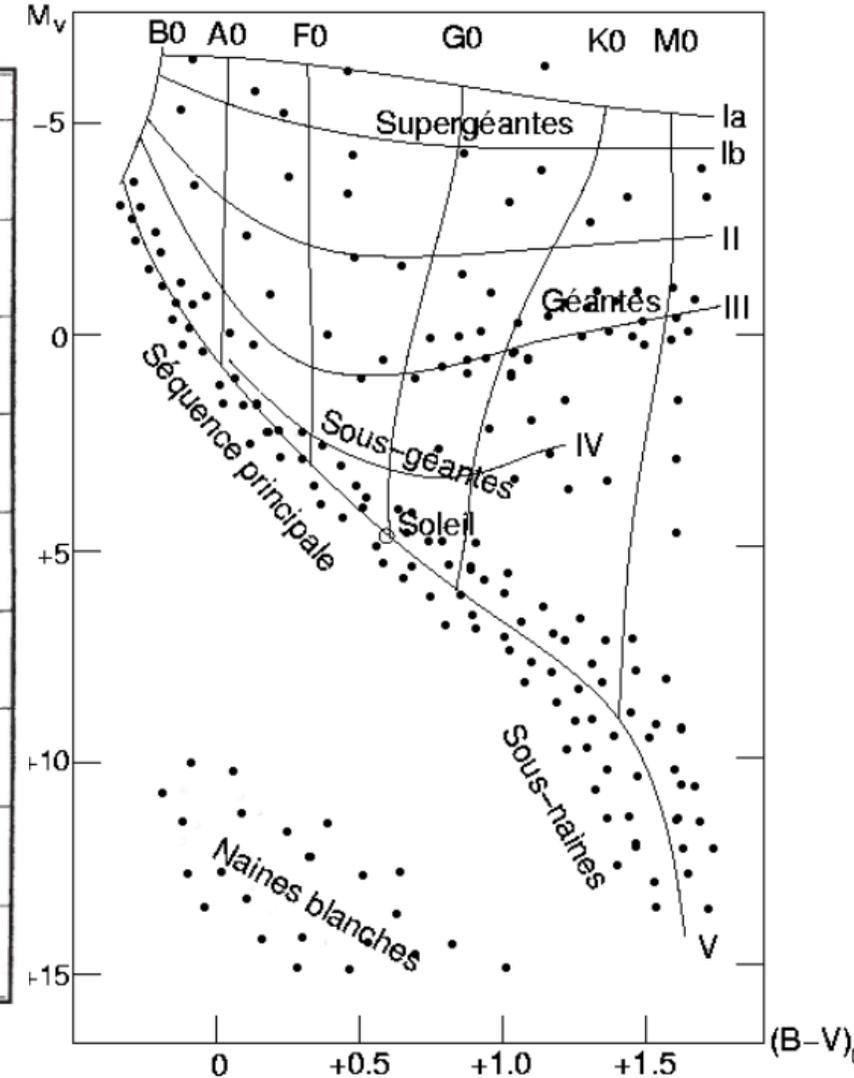
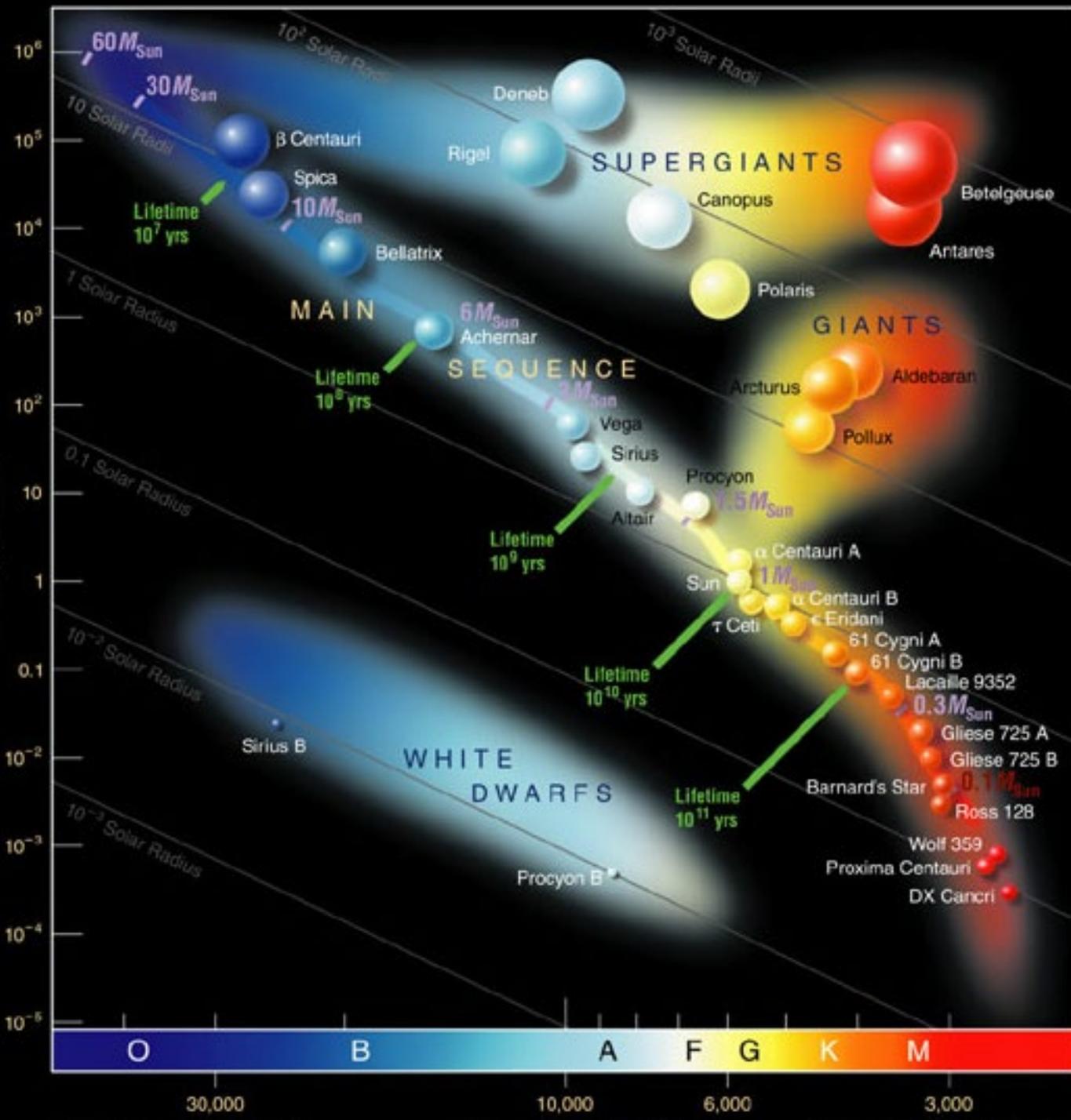


Diagramme HR actuel

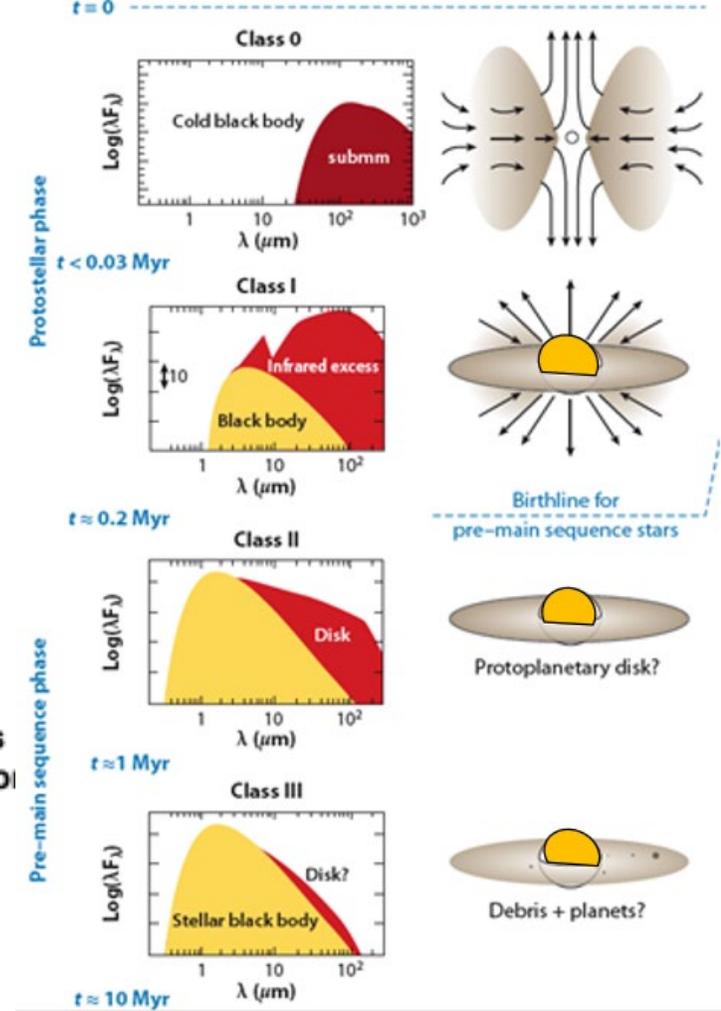
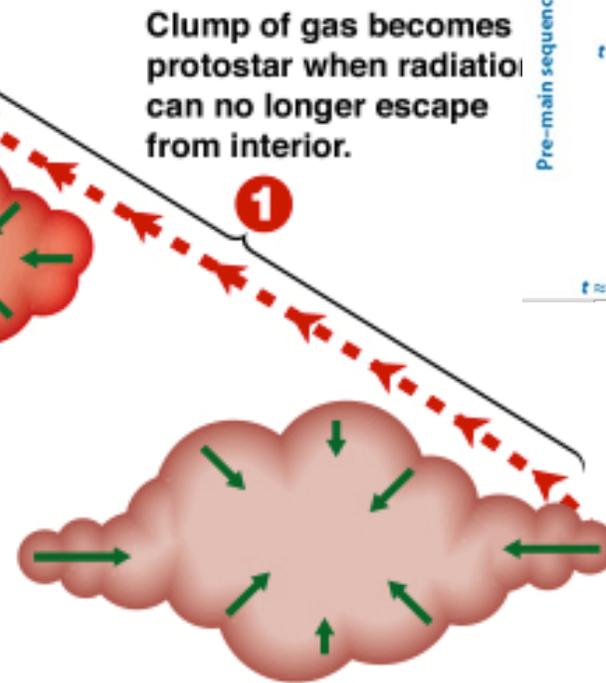
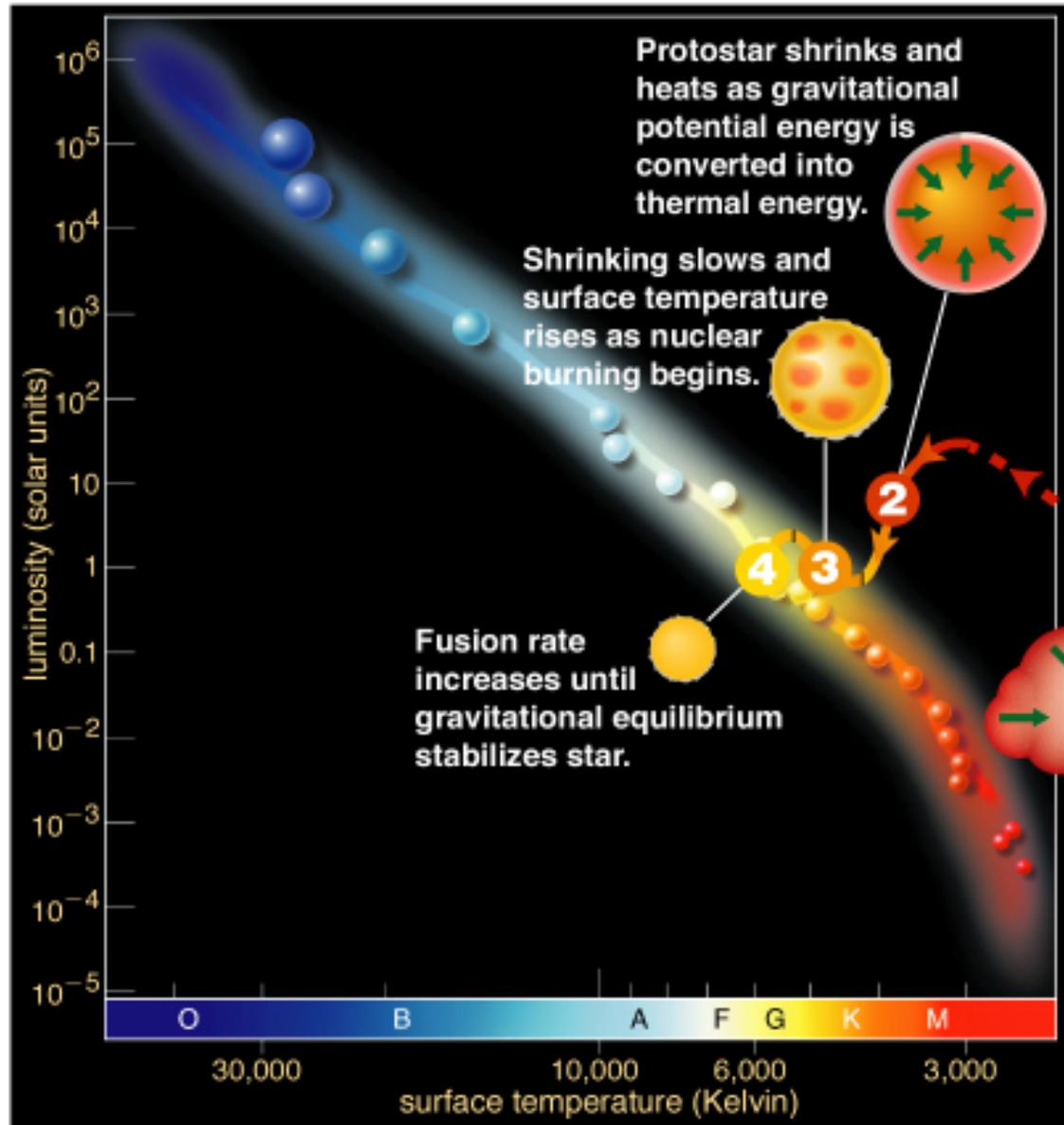
En abscisse, la Température de surface des étoiles augmente vers la gauche!
De 2500 à 40 000 K

En ordonnée, la luminosité augmente vers le haut
 10^{-5} à $10^6 L_{\odot}$

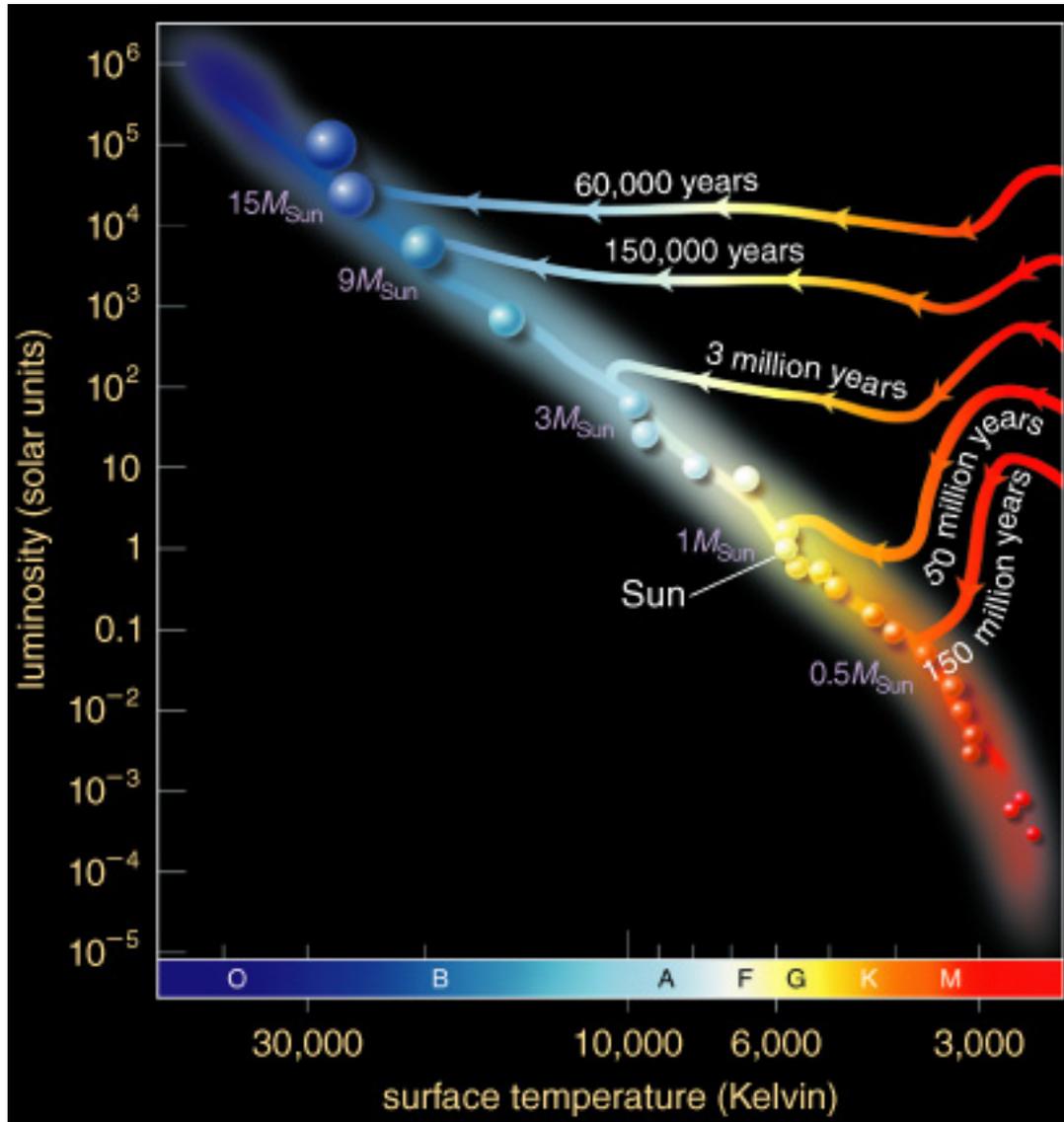
La grande majorité des étoiles se trouvent sur la **Séquence Principale**
→ Les étoiles y passent 90% de leur vie, en fusionnant H



Evolution des proto-étoiles sur la Séquence Principale (SP)



Evolution pour plusieurs masses



→ Le Soleil a mis 50 Myr pour arriver sur la séquence principale

→ Les plus grandes masses évoluent plus vite → 60 000 ans

→ Les plus petites peuvent prendre jusqu'à 150 Myr

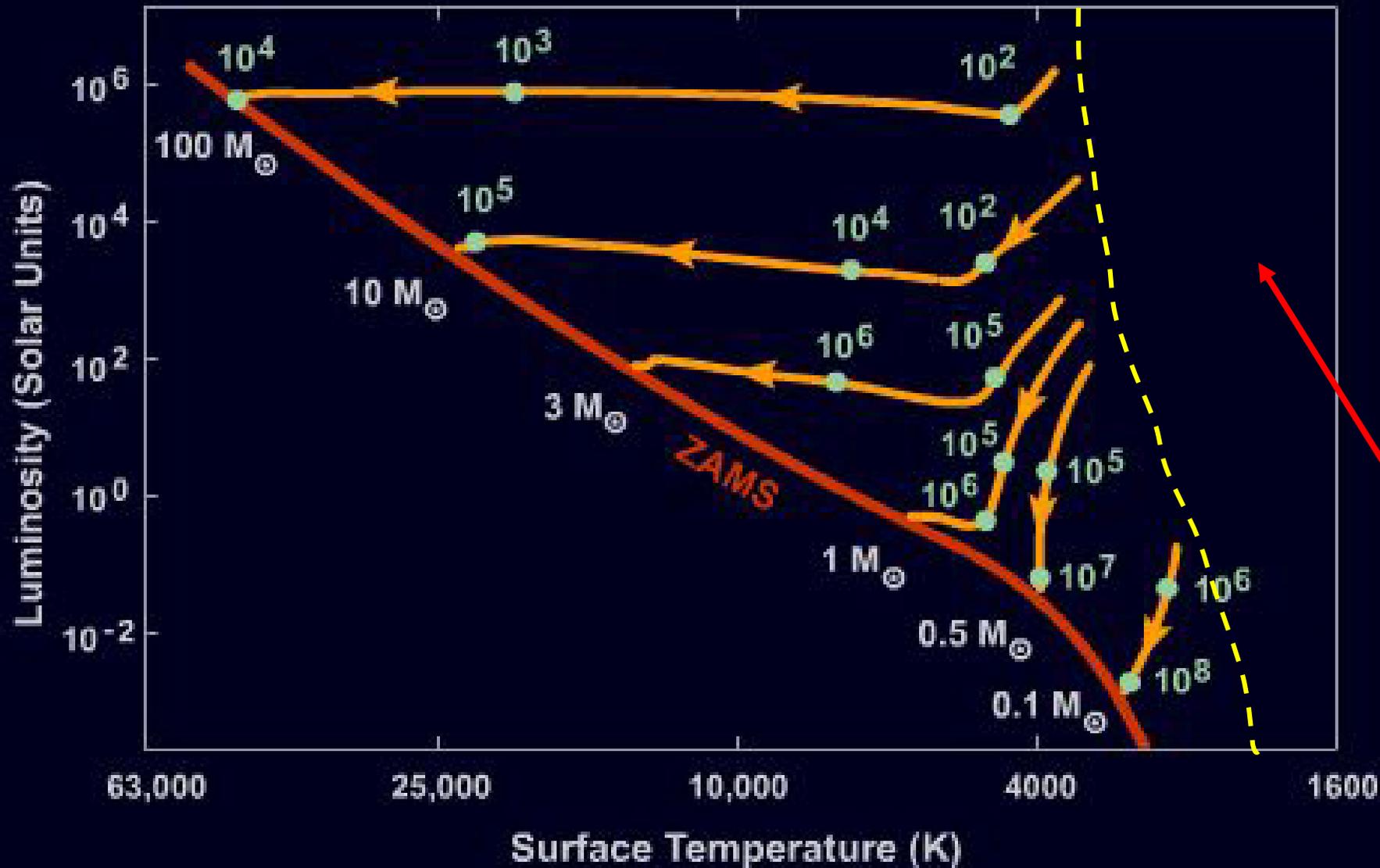
Hayashi tracks

Chemins dans le
Diagramme HR
Pour les proto-étoiles

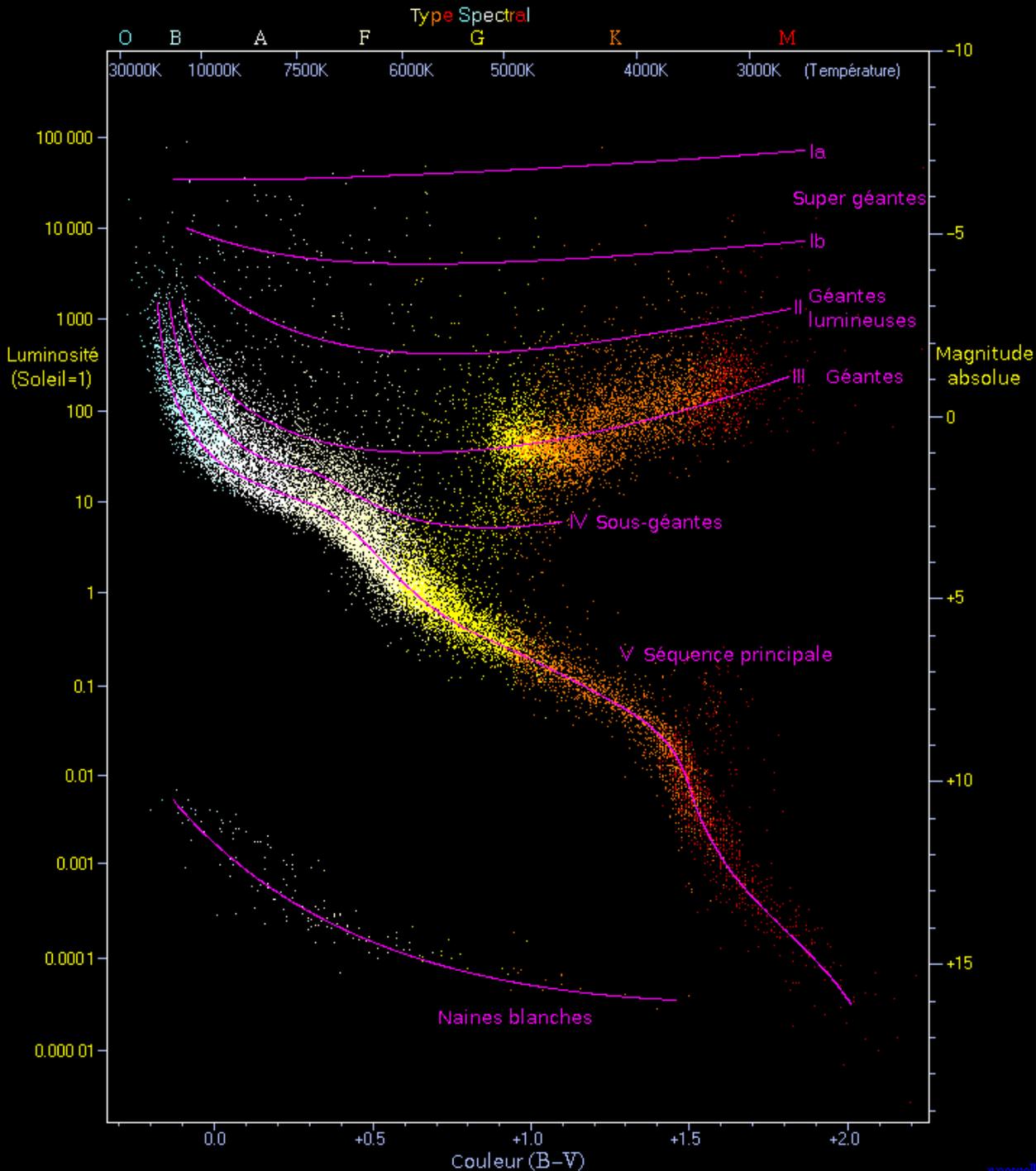
Age 10^n années sur
le chemin

Zone interdite
de Hayashi

Trajet dépendant de
l'opacité
Etapas radiative,
ou convective pour
les faibles $M < 0.5 M_{\odot}$



Evolutionary Tracks for Collapse to the Main Sequence



La branche des géantes: fin de vie des étoiles, après la combustion de H
 → Combustion de He, plus rapide, sur la branche horizontale

Les géantes rouges sont très volumineuses, ont une enveloppe plus froide, mais si grande que la luminosité est bien supérieur à la SP
RED Clump: grumeau des geantes rouges

Géantes jaunes, très instables, d'où le trou

Naines blanches, destin des masses $< 8 M_{\odot}$
 Elles deviennent naines noires en 10 milliards d'années (donc très peu)
 Les plus petites sont plus blanches

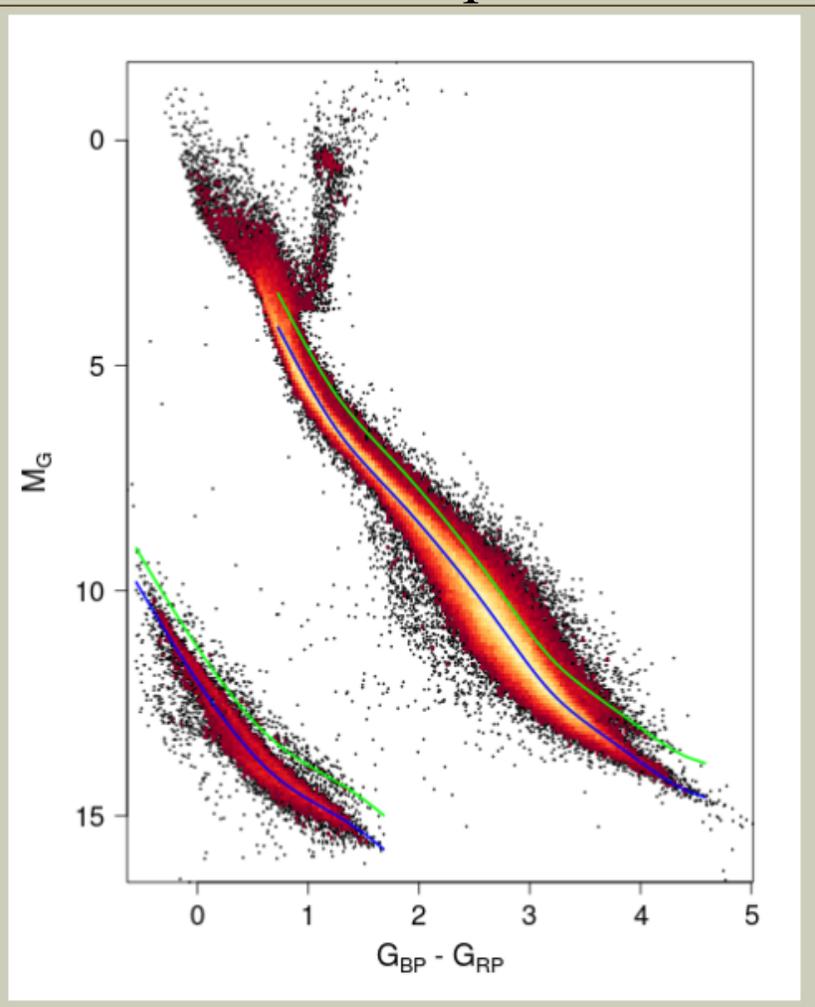
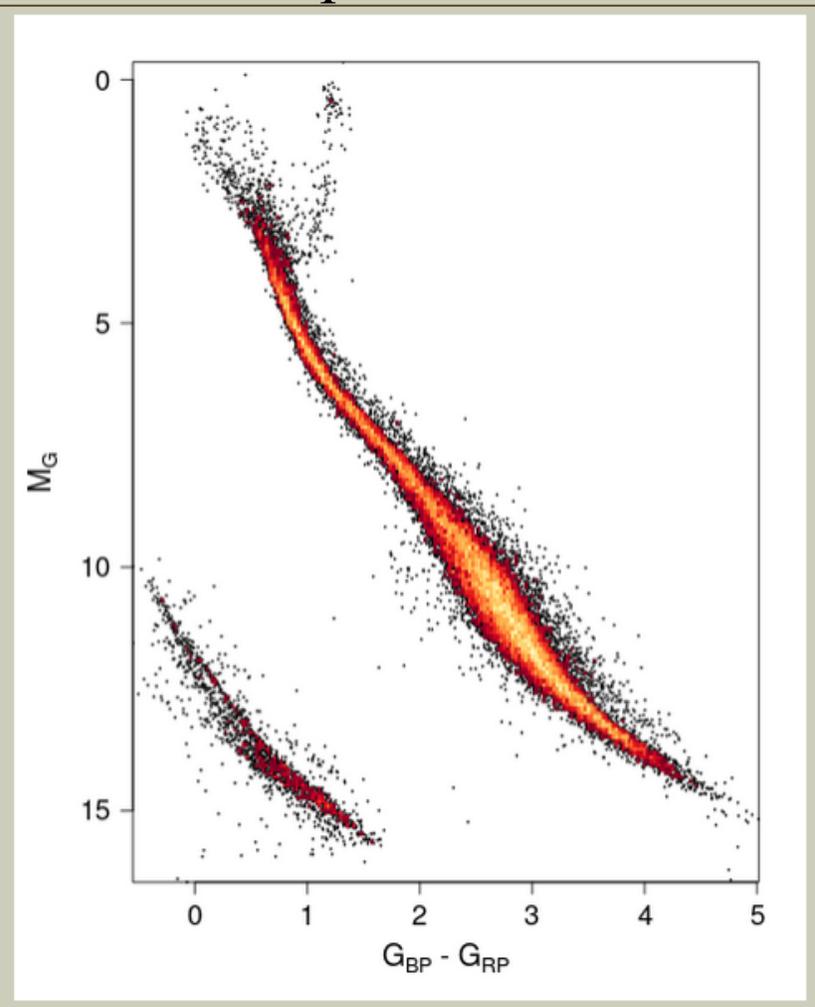
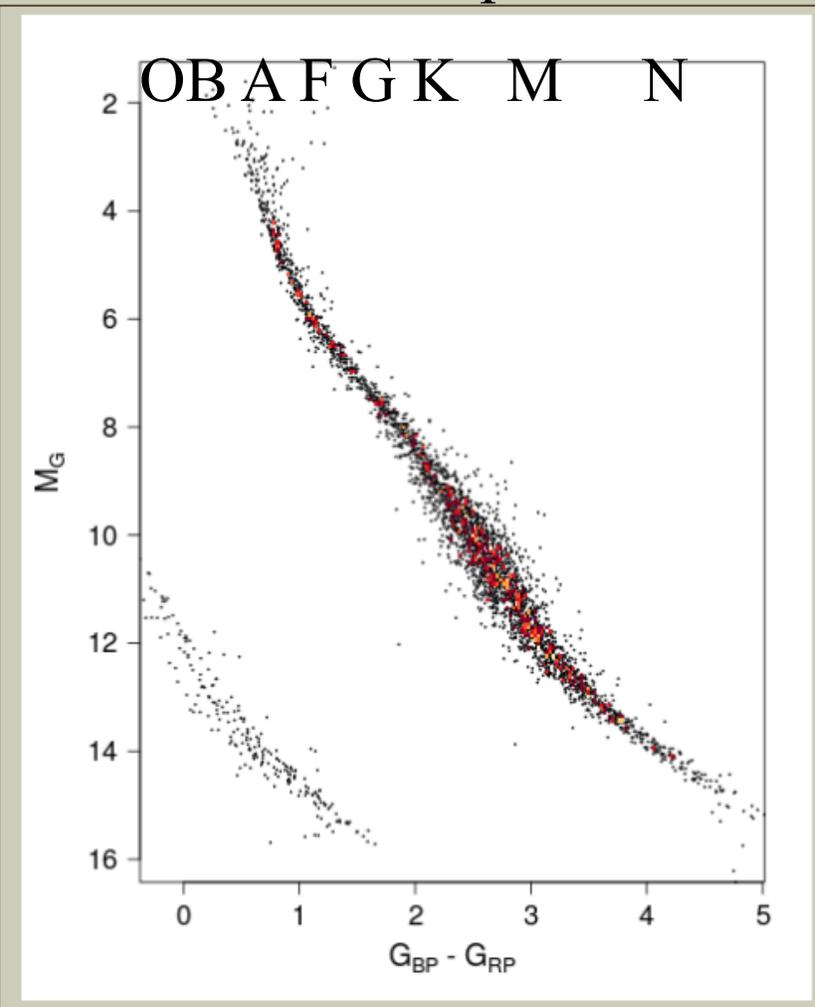
GAIA: Etoiles proches (milliards d'étoiles)

— Séquence principale
— Avec les binaires (+0.75)

D=25pc

50pc

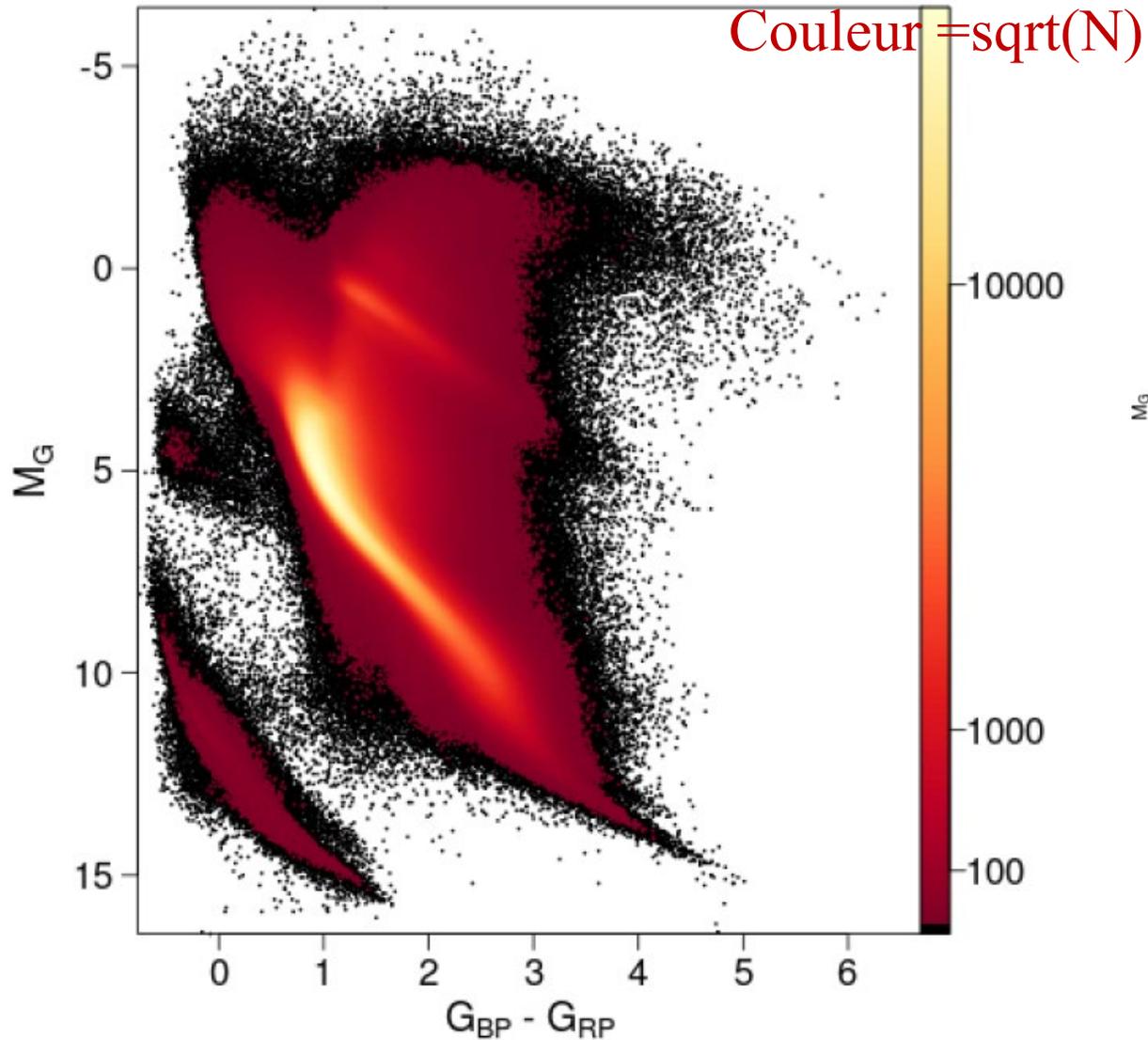
100pc



Séquence des naines blanches: **H** et **He** séparées pour la première fois (Babusiaux et al 2018)

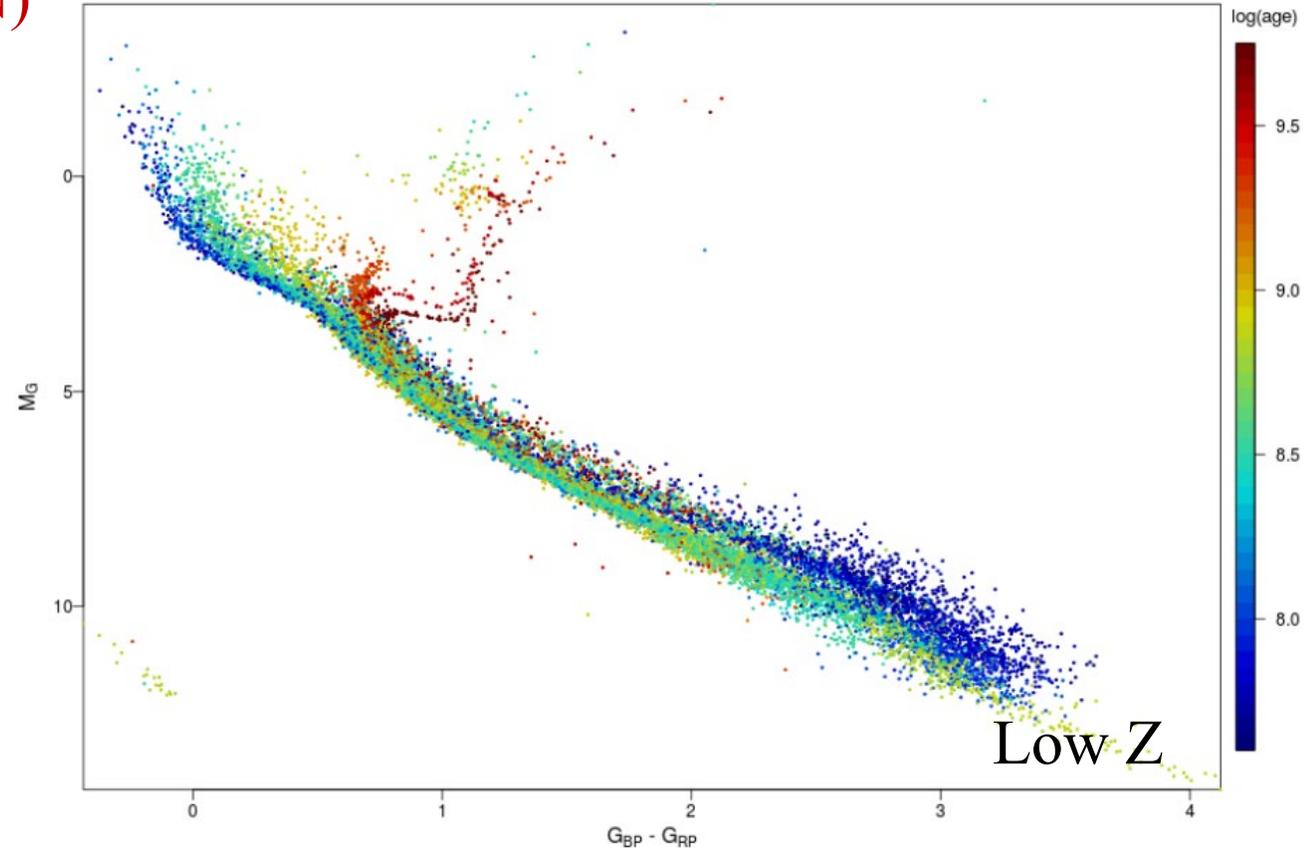
Résultats de GAIA DR2

65 millions d'étoiles



BP blue, RP, red photom GAIA

turn-off en fin de vie

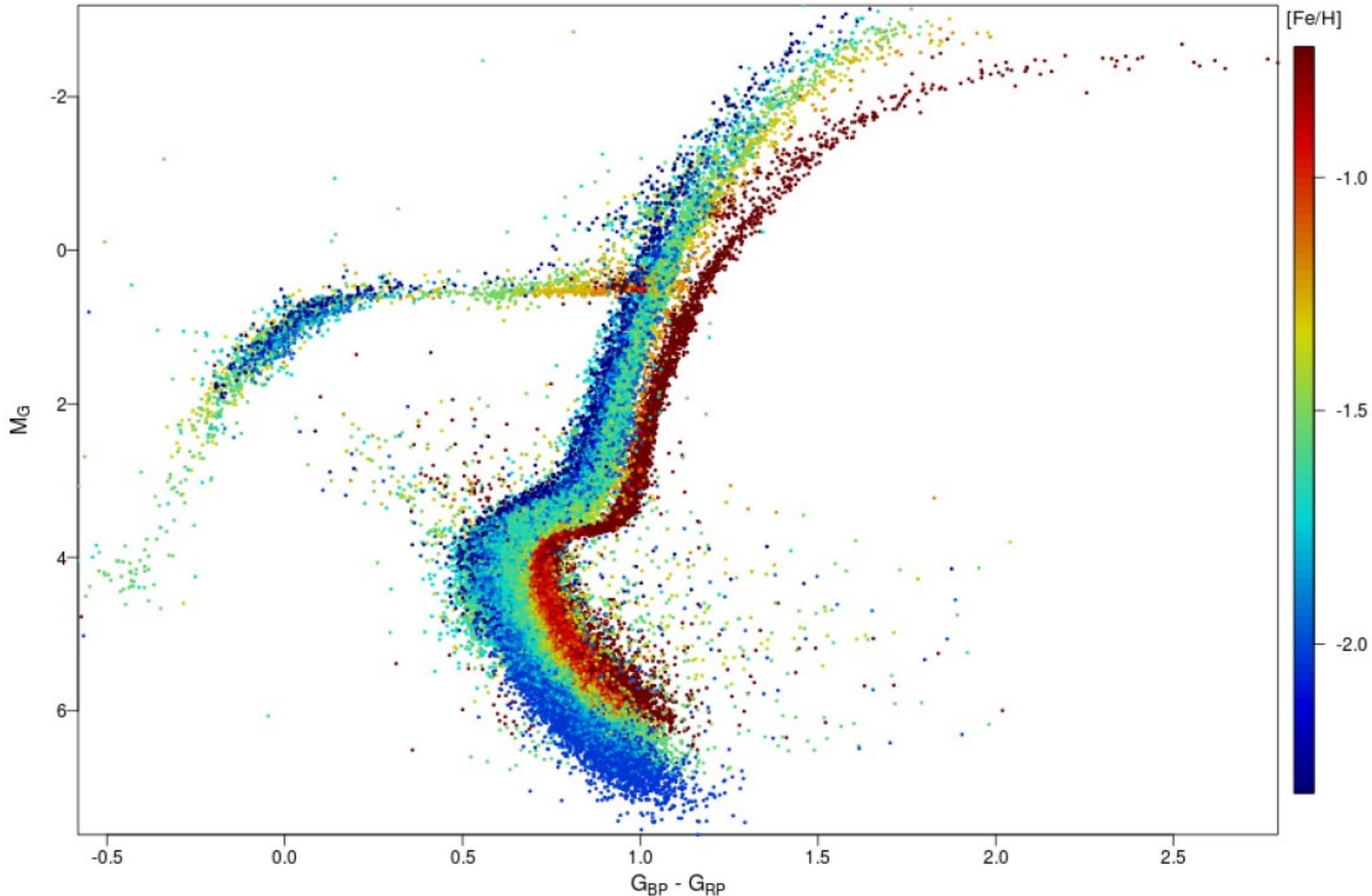


32 amas ouverts, en fonction de l'âge
Noter l'inversion du gradient le long de la SP

Babusiaux et al 2018

Amas globulaires dans GAIA

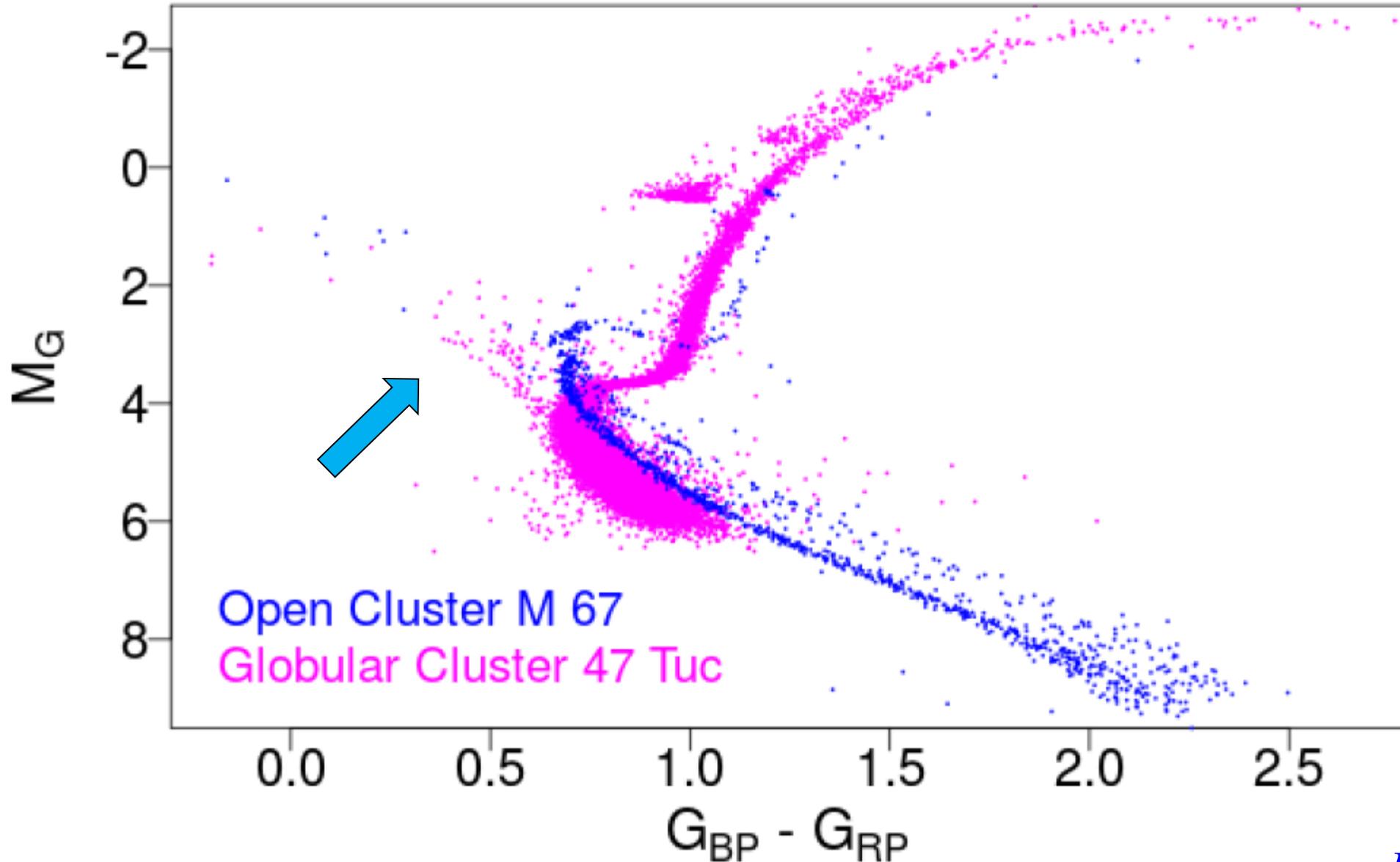
14 amas globulaires, en fonction de la métallicité $[Fe/H]$



Branche horizontale
pauvre en métaux

Amas globulaires:
Essentiellement le
même âge

Isochrones: 2 amas d'âges différents



Un des plus vieux
amas ouverts
M67: 3.47 Gyr
[Fe/H]=0.03
Effet des binaires

Amas globulaire
47 Tuc: 12.75 Gyr
[Fe/H]= -0.72

Blue Stragglers

Blue stragglers (trainardes bleues)

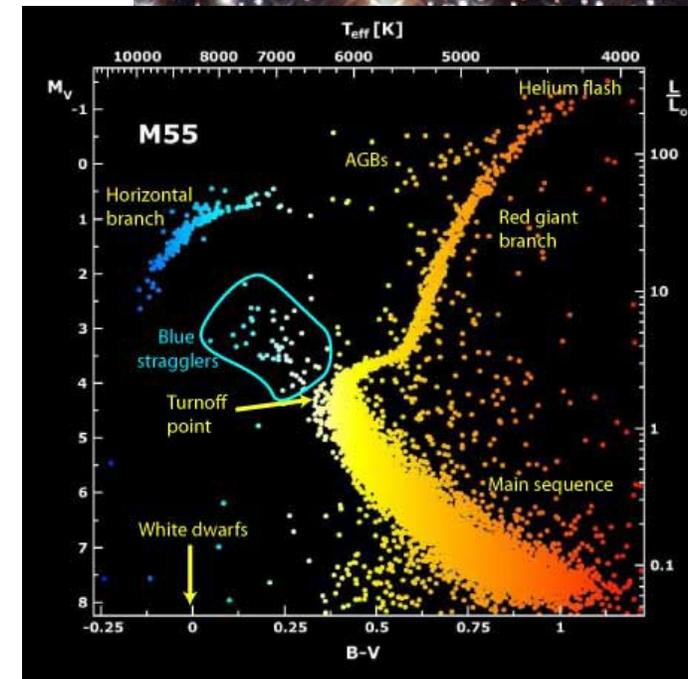
Groupe d'étoiles, plus bleues et plus lumineuses que prévu, dans un amas

Se positionnent au-delà du point de turn-off

Le phénomène, qui se produit essentiellement au centre des amas riches, est interprété comme des collisions et fusion d'étoiles

Elles se reconnaissent aussi à leur forte rotation

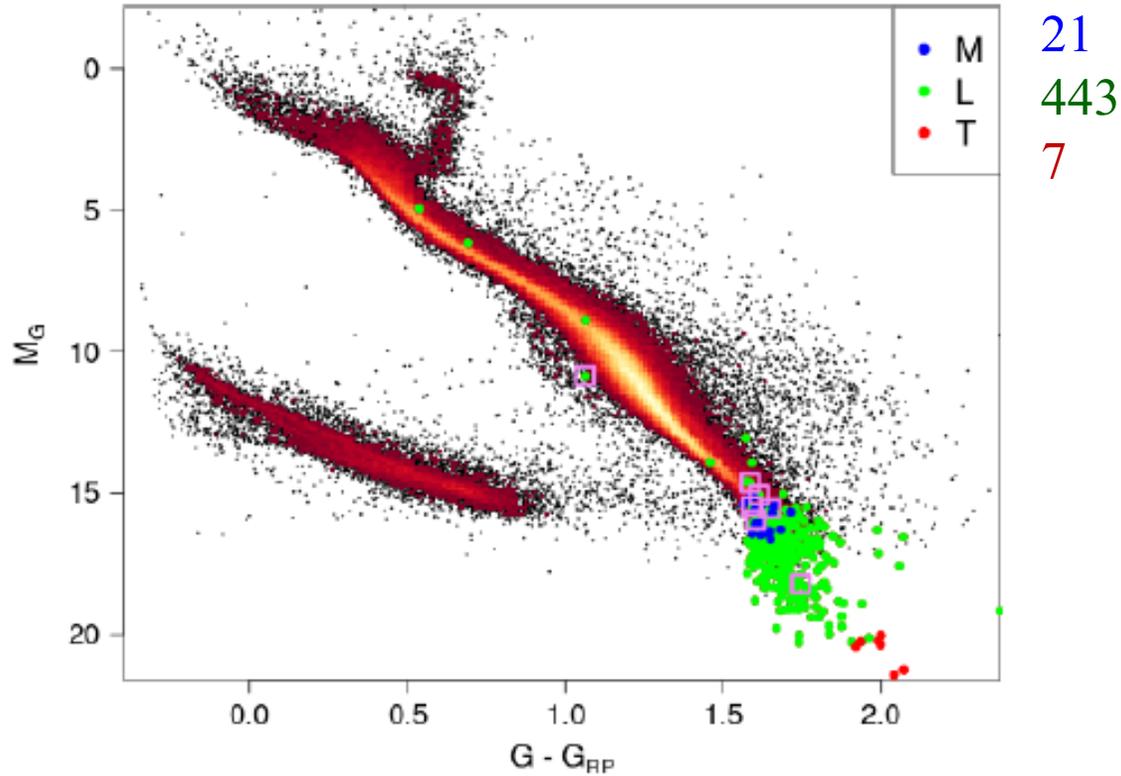
Après fusion, l'étoile est plus massive, et semble plus jeune (plus de H à brûler)



NGC 6397

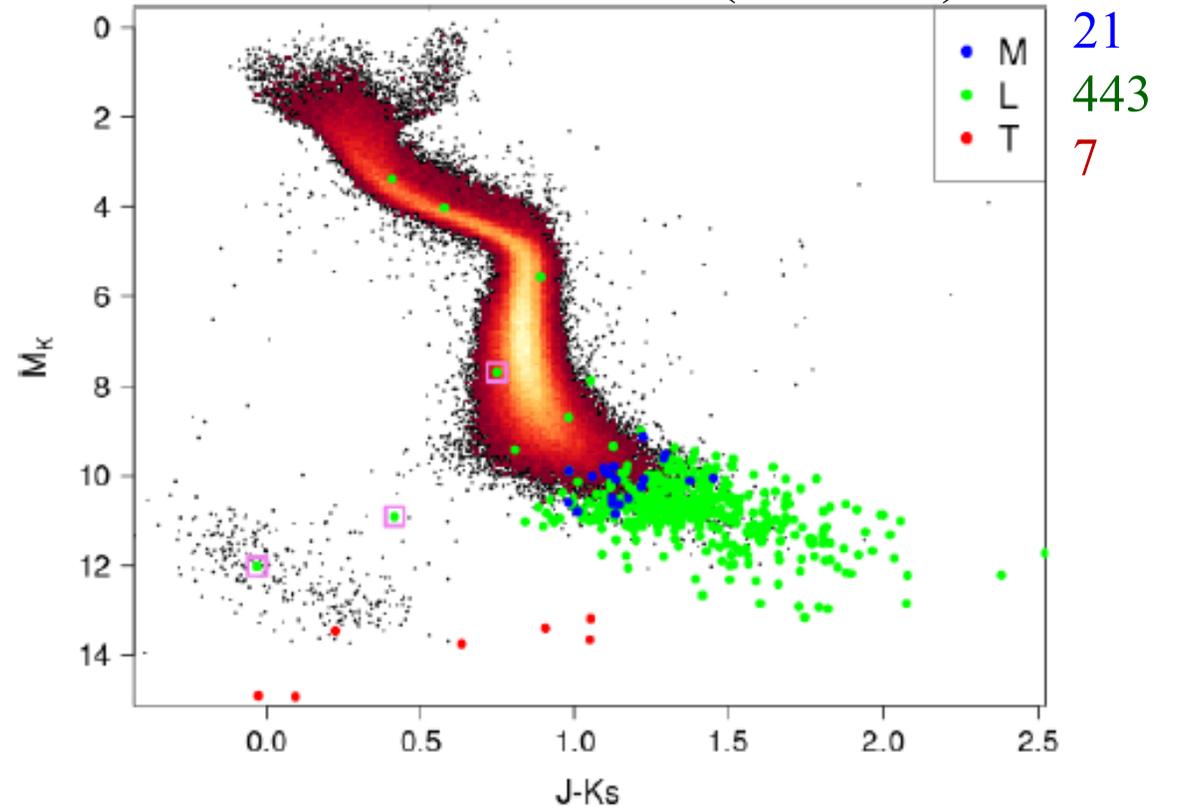
Naines Brunes dans GAIA

M_G vs $G-G_{RP}$



M_K vs $J-K_S$

(2MASS)

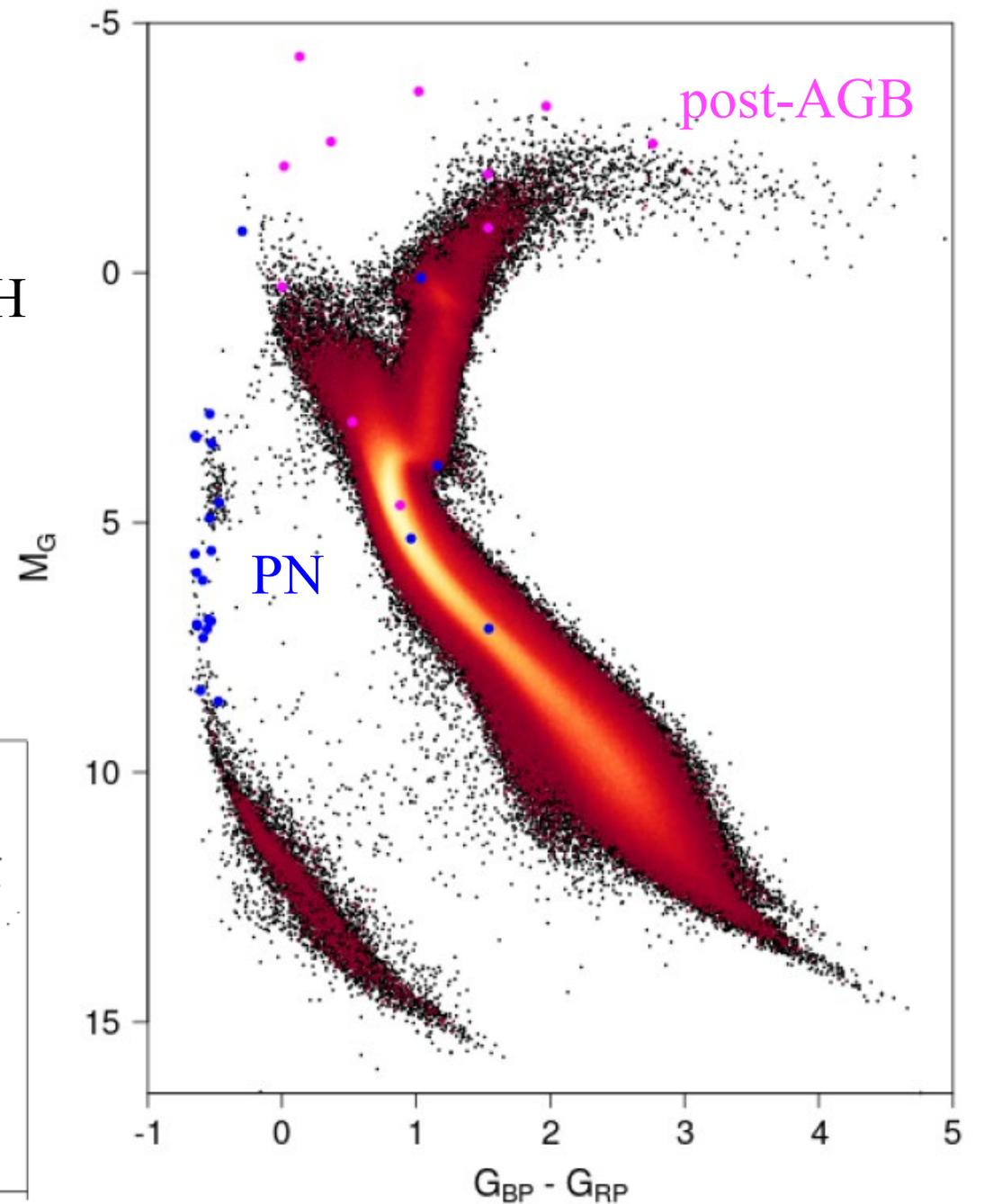
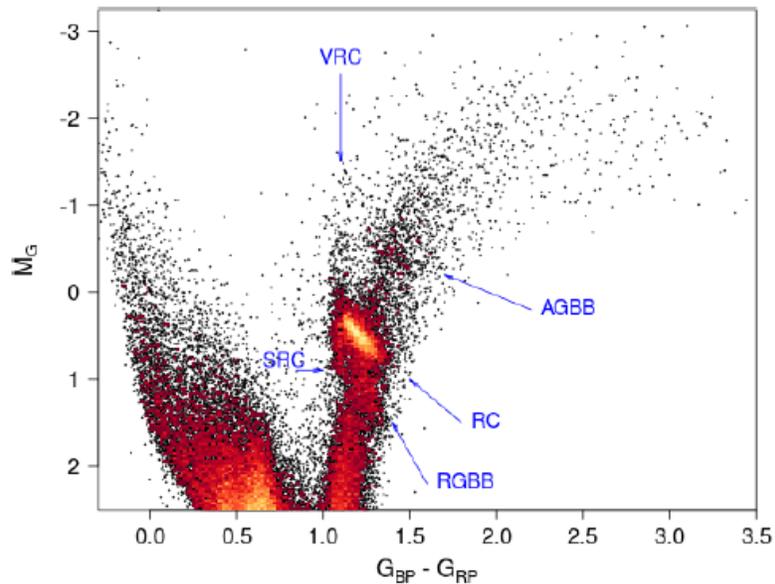


Masses de 0.01 à $0.08 M_{\odot}$: pas de réactions nucléaires

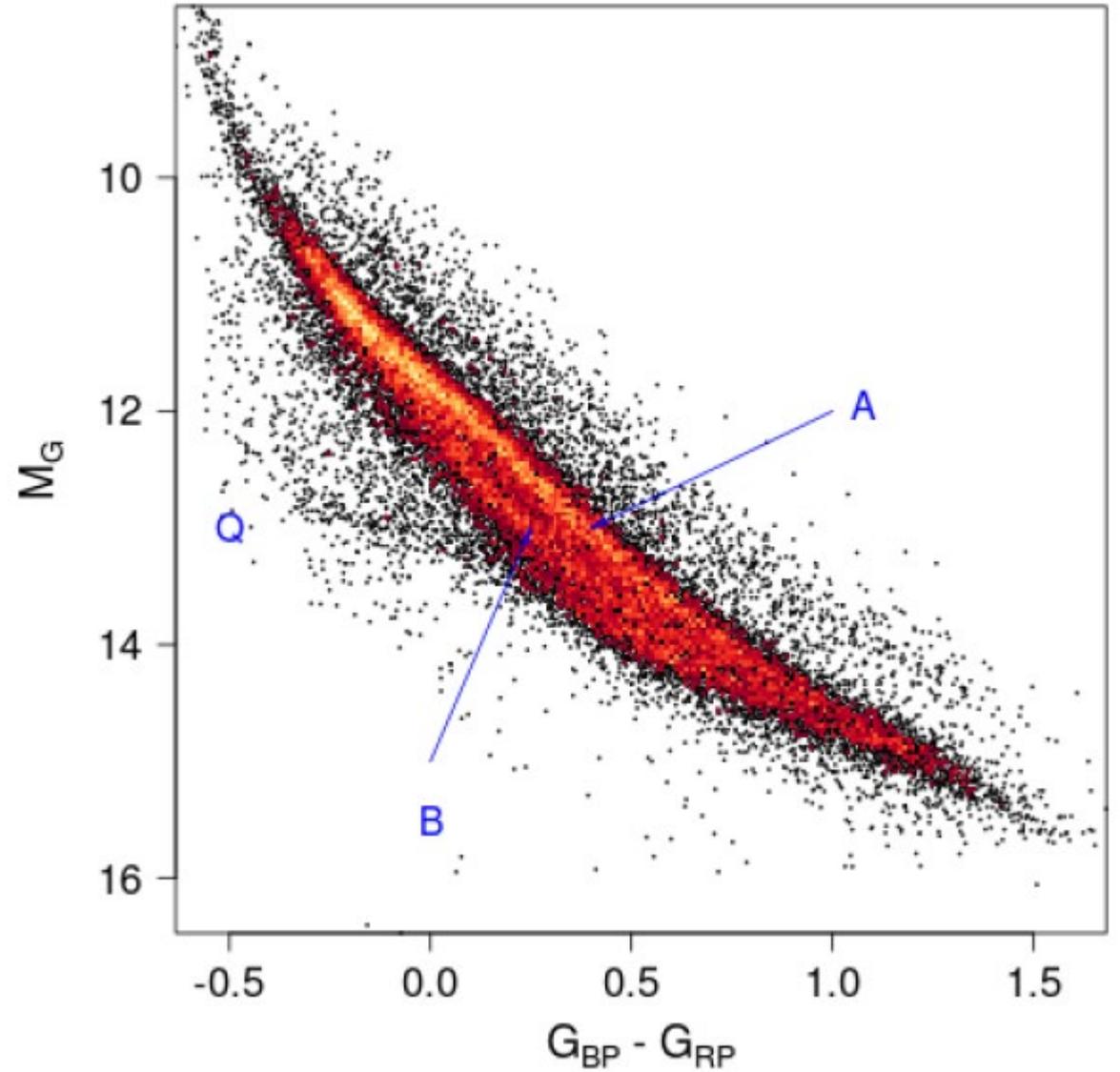
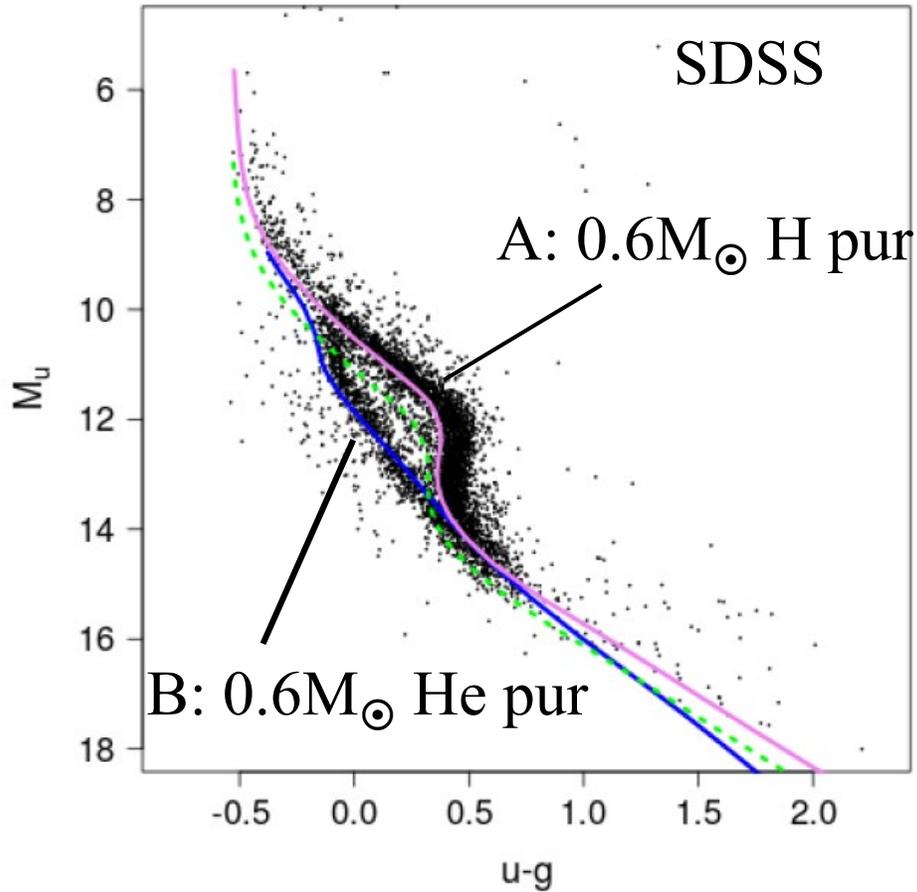
Nébuleuses planétaires dans GAIA

Les étoiles comme le Soleil, à la fin de la période AGB, où elles ont perdu la majorité de l'enveloppe H se contractent, brûlent la dernière coquille de H (post-AGB) puis vont rejoindre les naines blanches

La phase PN ne durent que 10 000 ans, n'occupe que très peu le diagramme HR



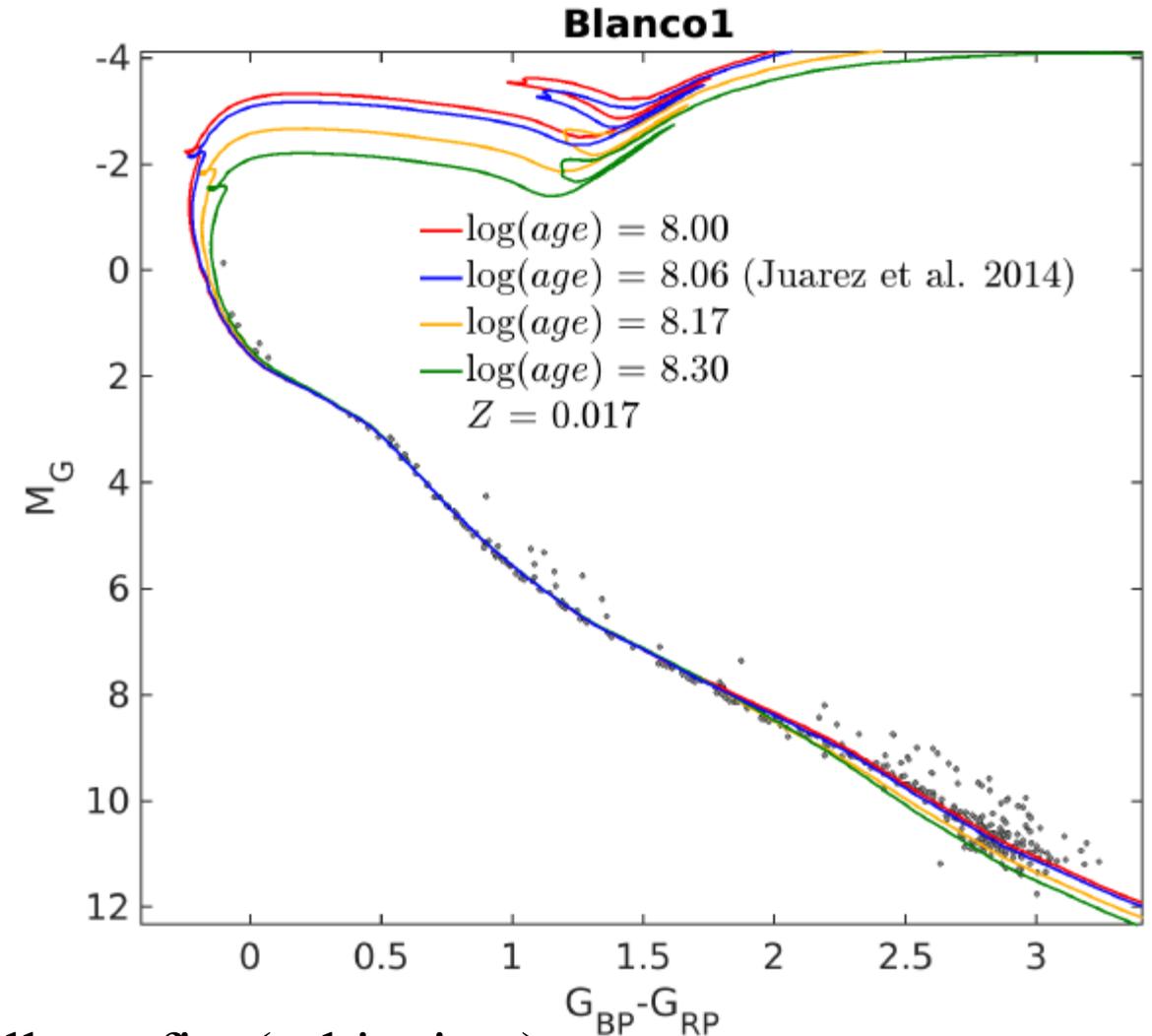
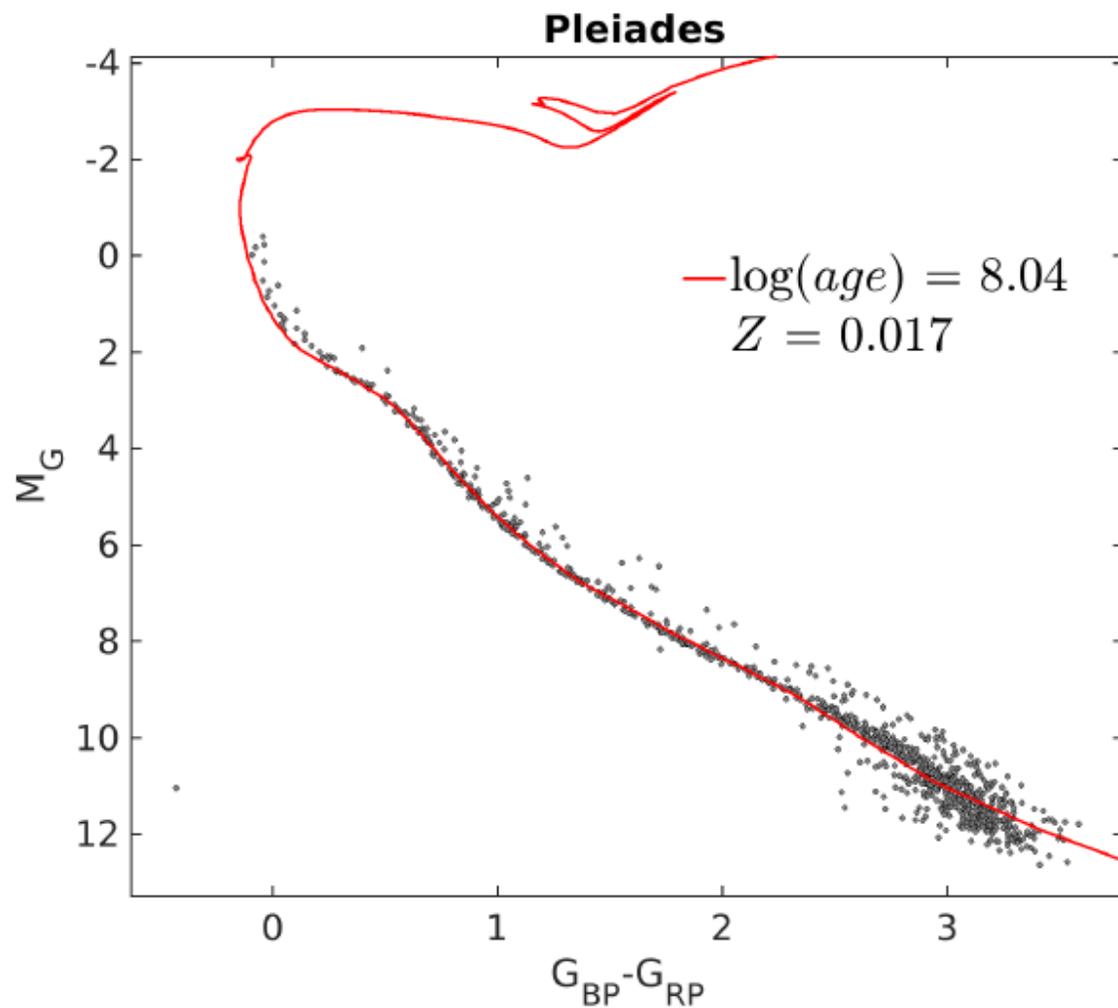
Naines blanches dans GAIA



Vert: $0.8M_{\odot}$ H pur, non présent

Tracks des amas ouverts jeunes

Âge avec Li depletion
Champ B?

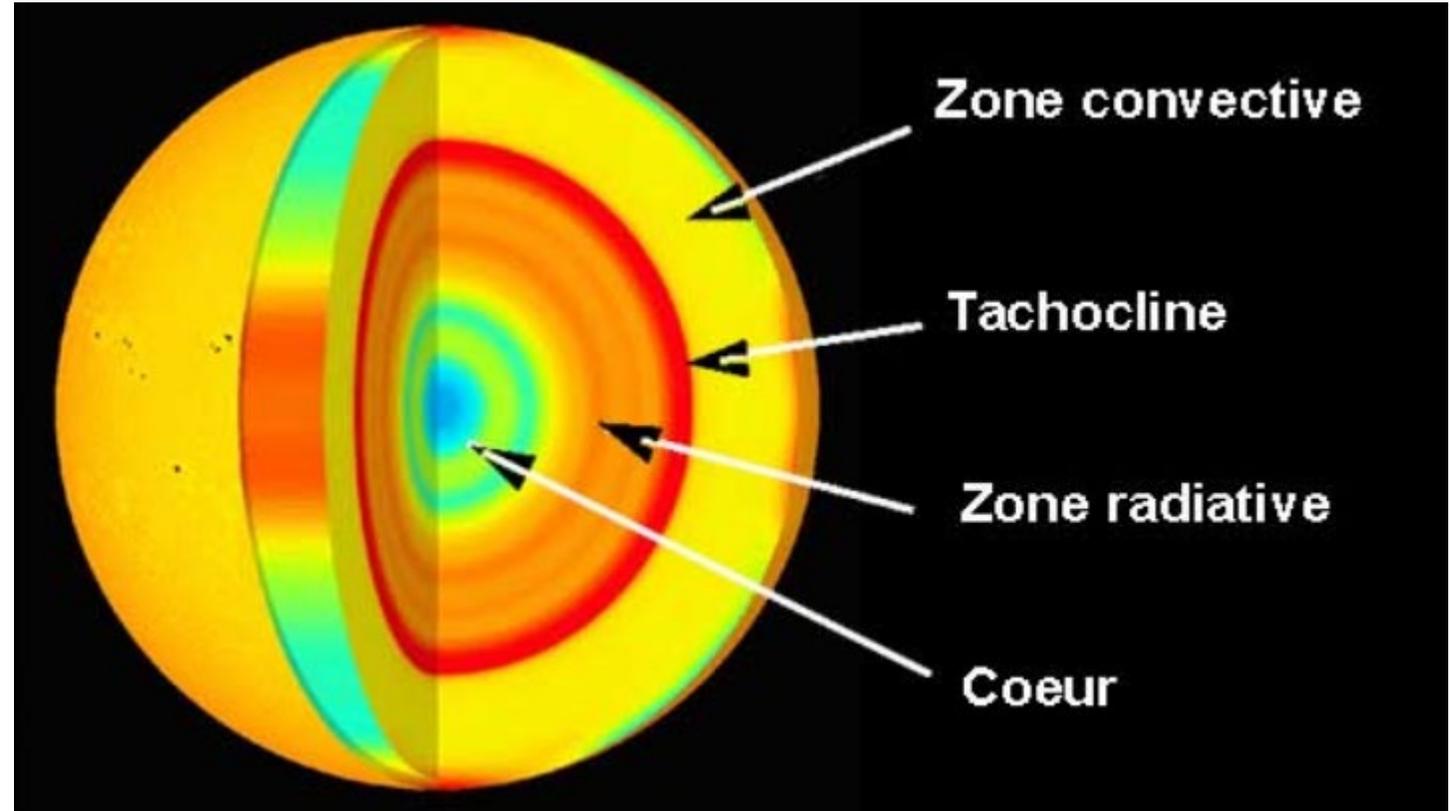
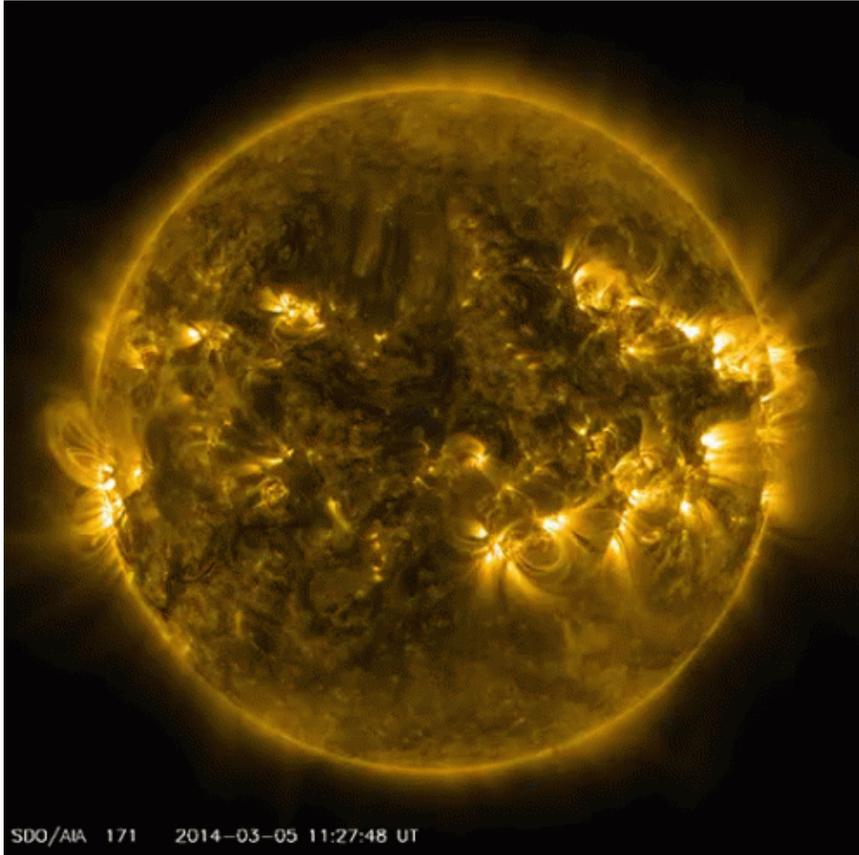


Superposition des isochrones calculées: excellents fits (+ binaires)
Except faibles masses (+ incertain pour GAIA)

Babusiaux et al 2018

Structure interne des étoiles

Couronne: 600 000 K



Photon piégés par la diffusion
Au lieu de 2sec → 200 000 ans

Moyens: neutrinos, astérosismologie

Les paramètres, L, M, R, T

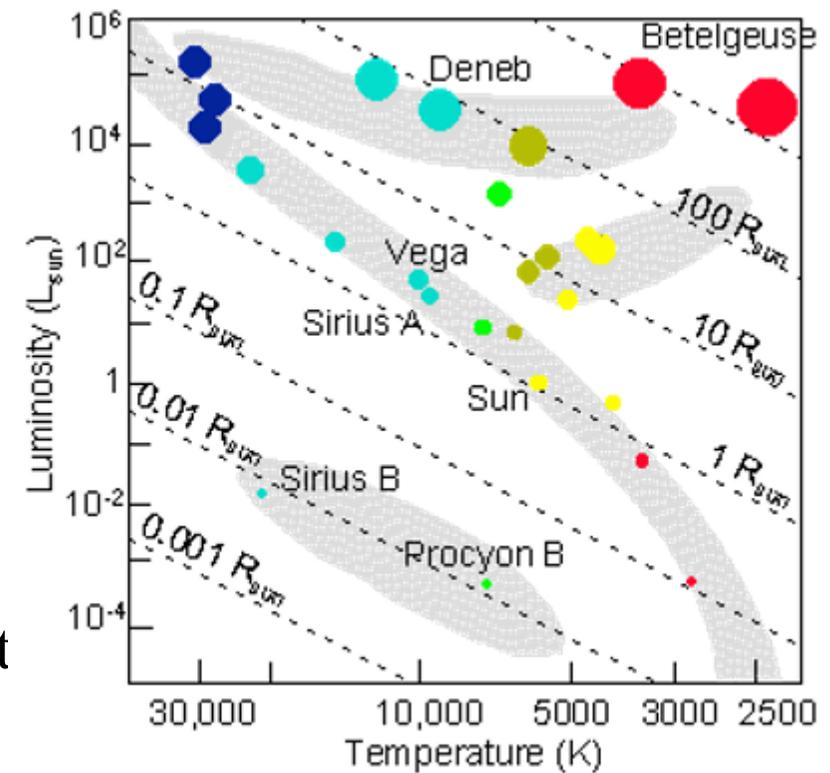
$$L = 4 \pi R^2 \sigma T_e^4 \quad T_e, \text{ temp du corps noir équivalent}$$

Facile de mesurer la masse dans les binaires, mais le rayon?

A 10pc, la taille du Soleil est de 0.001''

600 rayons ont pu être mesurés, soit par interférométrie IR pour les plus grosses (Betelgeuse $R \sim 0.04'' = 900 R_{\odot}$) ou transit

Te peut-être calculé avec des modèles d'atmosphère

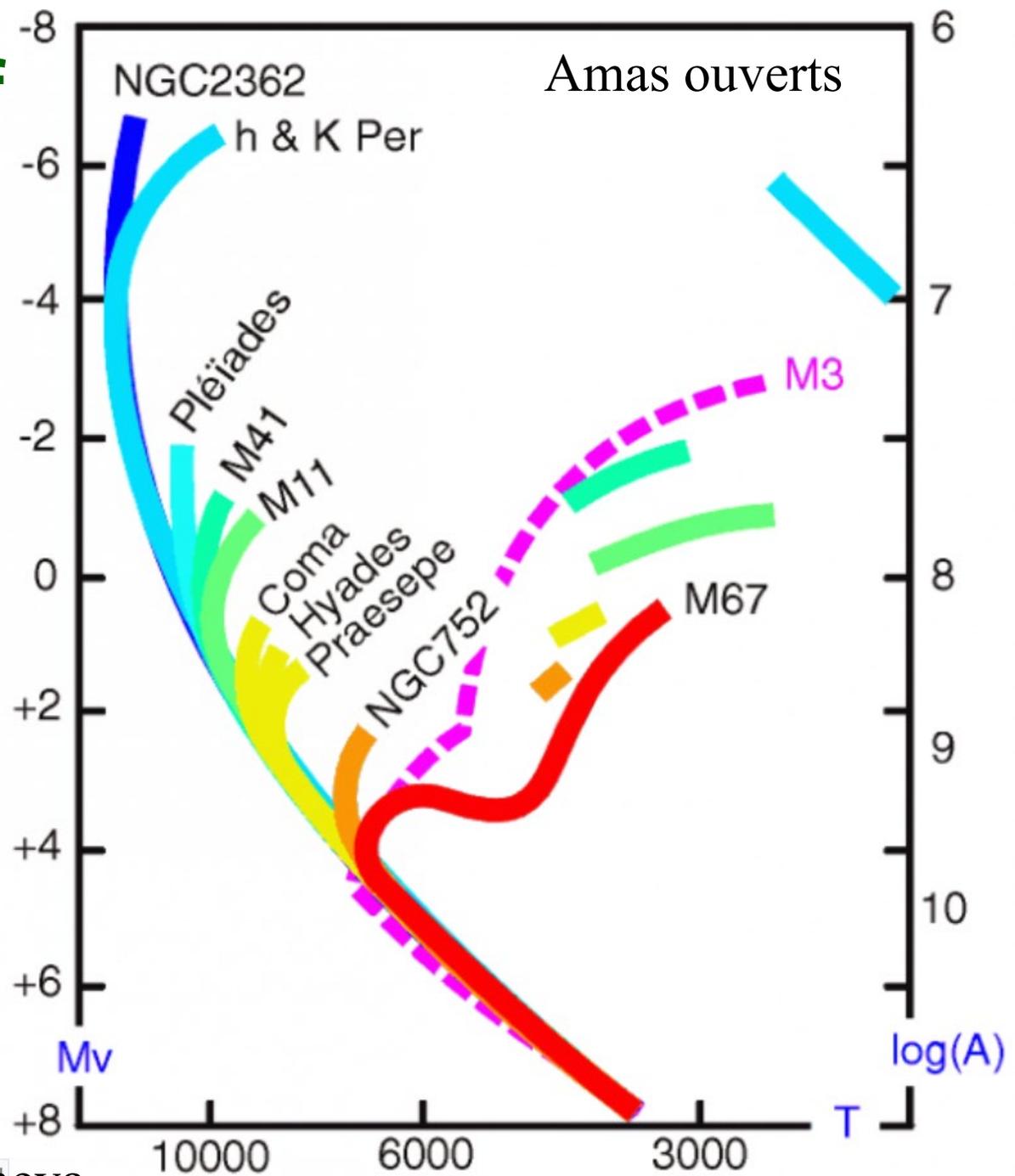
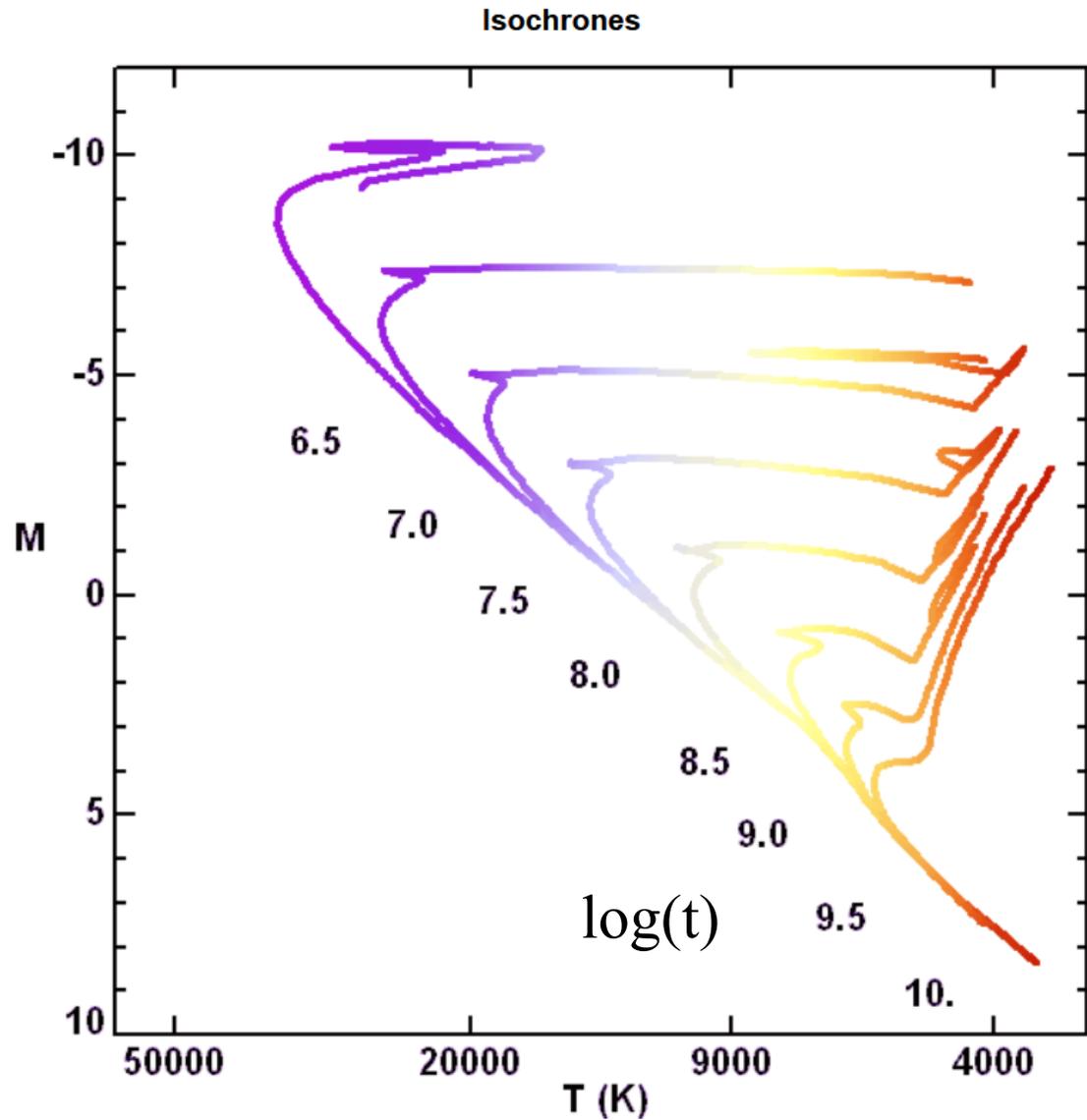


Colour Index (B-V)	-0.6	0	+0.6	+2.0			
Spectral type	O	B	A	F	G	K	M



Metallicité, fraction de masse
Helium $Y_{\odot} = 0.236$,
Autres éléments $Z_{\odot} = 0.017$

Age des amas d'étoiles, et turn-off



Isochrones PARSEC PAdova-Trieste ou bien Geneva

Equations du modèle

Approximation sphérique
Aplatissement (soleil) 10^{-5}

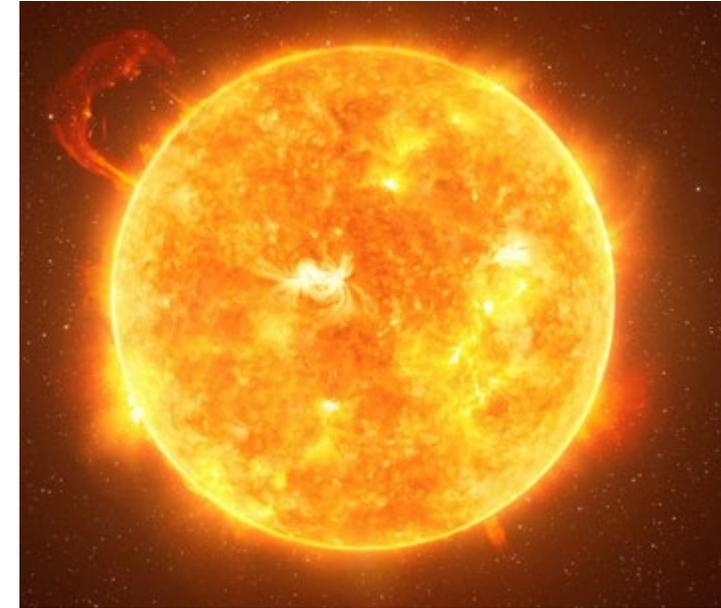
$$\text{Equilibre hydro-statique: } \frac{1}{\rho} \frac{dP(r)}{dr} = g = - \frac{G M(r)}{r^2}$$

$$\text{Conservation de la masse: } \frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

→ Pression au centre du Soleil $4.5 \cdot 10^8$ atmosphères (1000 hPa)
Densité moyenne, celle de l'eau, 1g/cm^3 , et $T > 2$ millions K

Bilan énergétique: $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{26}$ W, pour une vie de 10 milliards d'ans
Énergie $1.2 \cdot 10^{44}$ J, équivalent à une masse ($E = mc^2$) de 10^{27} kg, soit $10^{-3} M_{\odot}$ ($4 \cdot 10^6$ tonnes/s)
Mais la transformation $\text{H} \rightarrow \text{He}$, donne 0.7% de la masse

→ Une fraction significative de H sera transformée (moins de particules)
Vent solaire: 10^6 tonnes/s



Production et transport de l'énergie

Production ε par u de masse:
$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho \varepsilon$$

→ Transport de l'énergie par **rayonnement**,
(conduction négligeable l.p.m. particules \ll celui des photons)

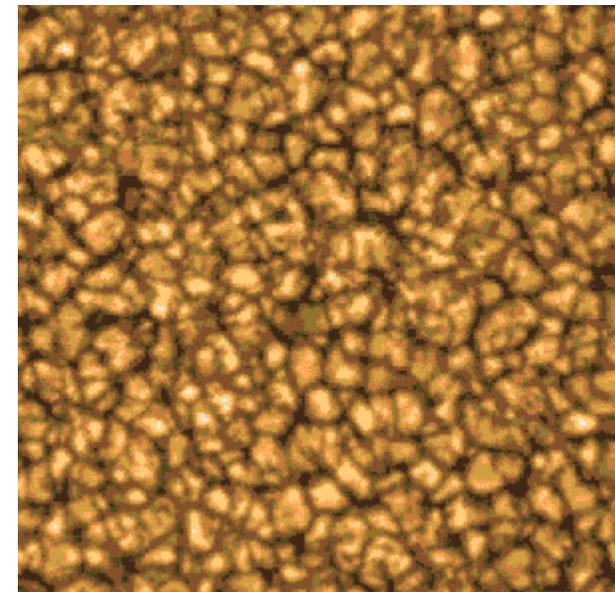
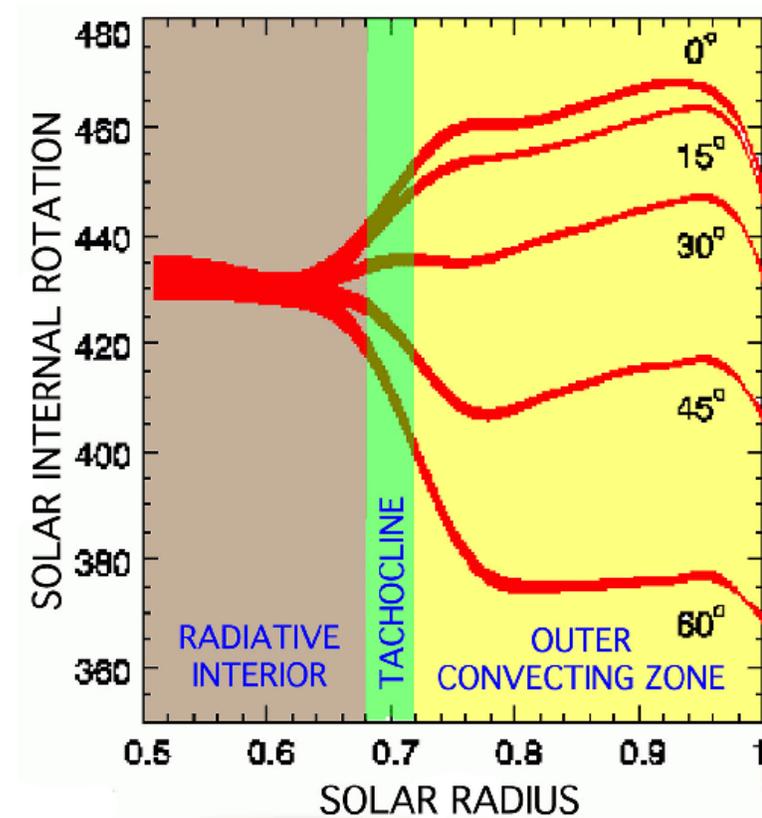
Si rayonnement:
$$\frac{dT}{dr} = \frac{3\kappa}{64 \pi r^2 \sigma T^3} L(r)$$

κ opacité

→ Convection: devient instable, si le gradient de température est supérieur au gradient adiabatique

Convection si:
$$\frac{d \log T}{d \log P} > \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

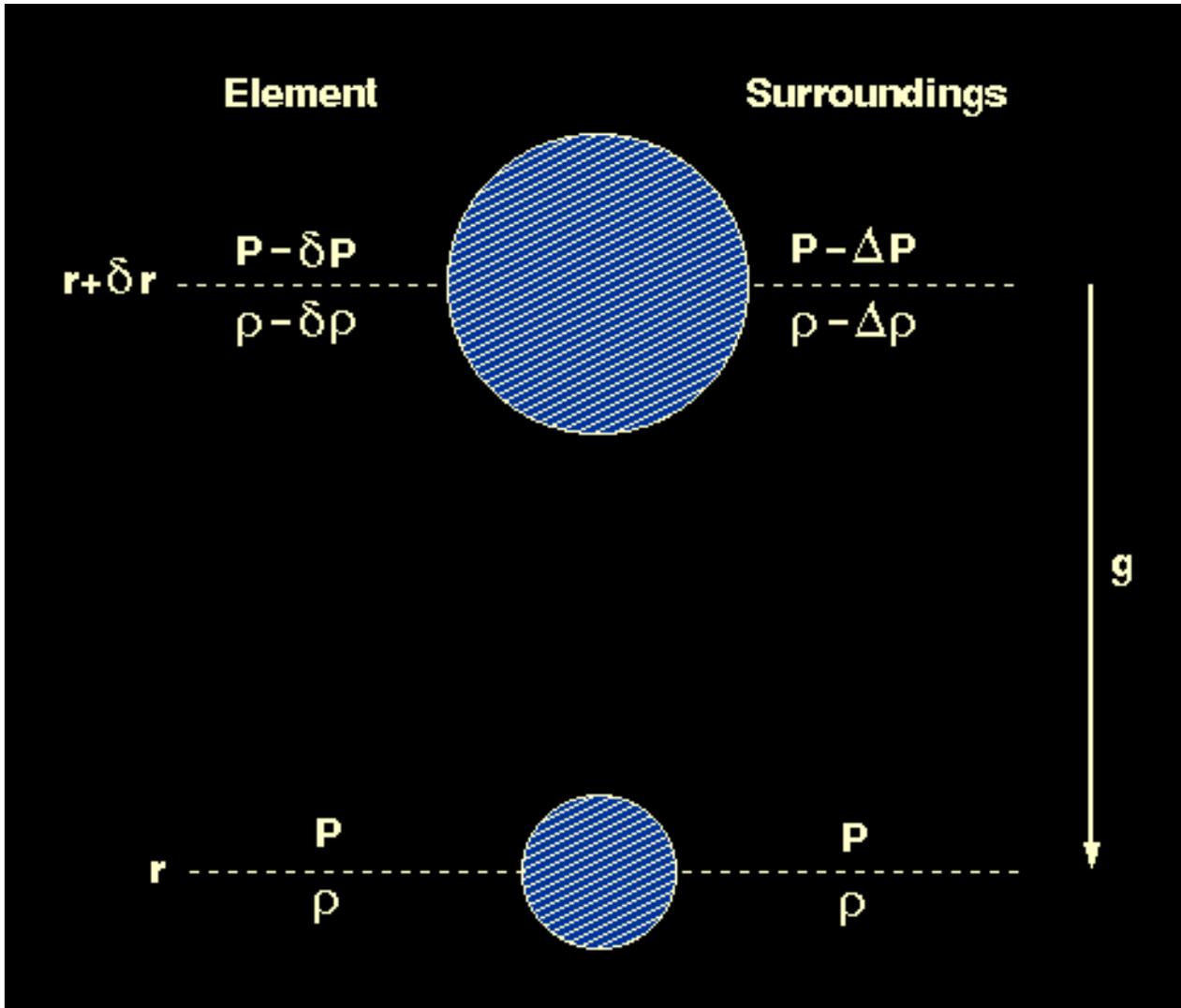
La couche externe du Soleil est convective, les cellules de convection font 1000km



Condition pour la convection

Une partie du plasma de l'étoile monte de r à $r+\delta r$

Montée lente \ll vitesse du son $PV^\gamma = \text{cste}$



Montée adiabatique $P \sim \rho^\gamma$
S'accompagne d'expansion

à $P-\delta P$, $\rho-\delta\rho$

Si le gaz est plus dense, il va retomber

Sinon: **instabilité de convection**, si
 $\rho-\delta\rho < \rho-\Delta\rho$

$$\frac{P-\delta P}{(\rho-\delta\rho)^\gamma} = \frac{P}{\rho^\gamma}$$

Se servant de la relation des gaz parfaits

$$\frac{dP}{P} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T} \rightarrow \frac{d \log T}{d \log P} > \frac{\gamma-1}{\gamma}$$

Modèles du soleil et des étoiles

Avec la résolution de ces équations → modèles raffinés du soleil
(opacité, taux de réactions..)

Réactions nucléaires produisent des neutrinos $p+p \rightarrow D^+ + e^+ + \nu_e$
Or plusieurs détecteurs de neutrinos, depuis 1970,
et Kamiokande (1990) ne détectent que 1/3 des neutrinos prédits!

Après 30ans: épilogue, les neutrinos électroniques
au départ du soleil, oscillent en neutrinos
tau et mu, les détecteurs n'y sont pas sensibles

1998 **Kajita et Mc Donald** découvrent les
oscillations (Prix Nobel en 2015)

50 000 tonnes H₂O
Lumière tcherenkov



Kamiokande

Relation Masse-luminosité

Une relation calibrée par des étoiles connues sur la séquence principale

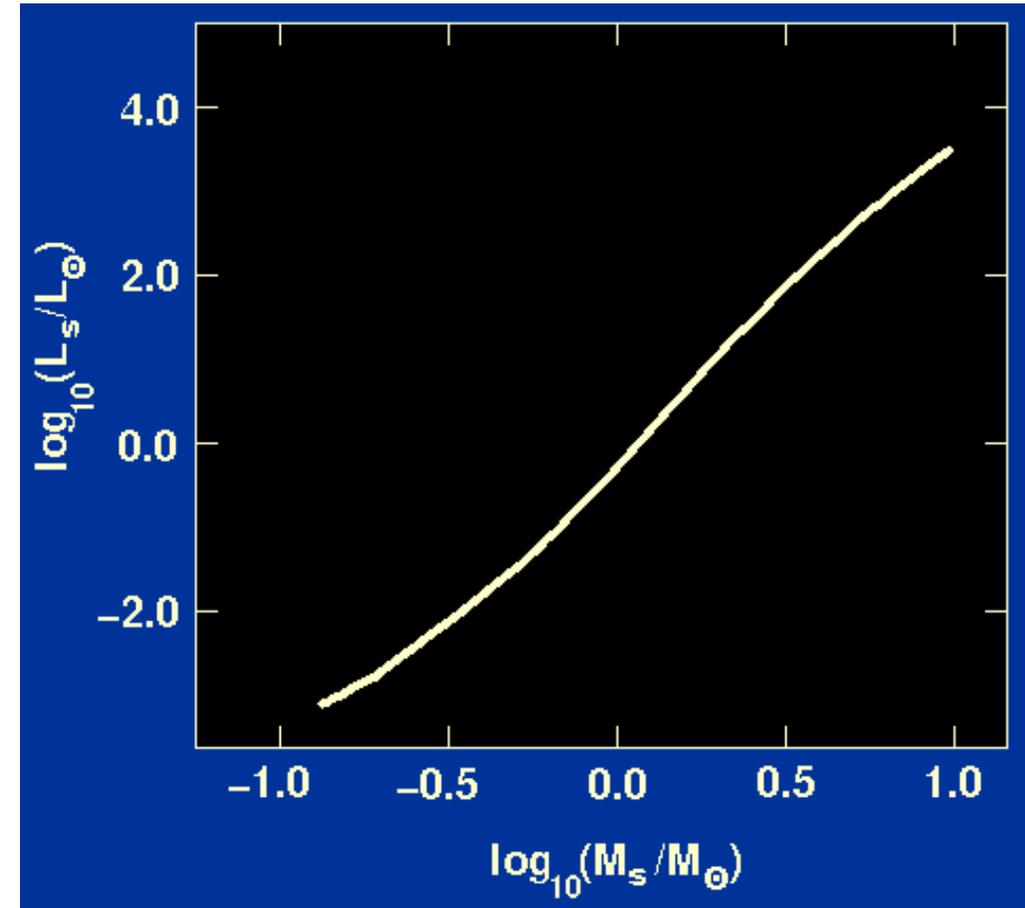
$L \propto M^n$ avec $n=3-5$, 4 au milieu

La pente est légèrement moins forte aux deux extrémités

Sur la séquence principale du diagramme HR la masse augmente régulièrement

Une contrainte forte pour les modèles

$L(M)$, $T(M)$



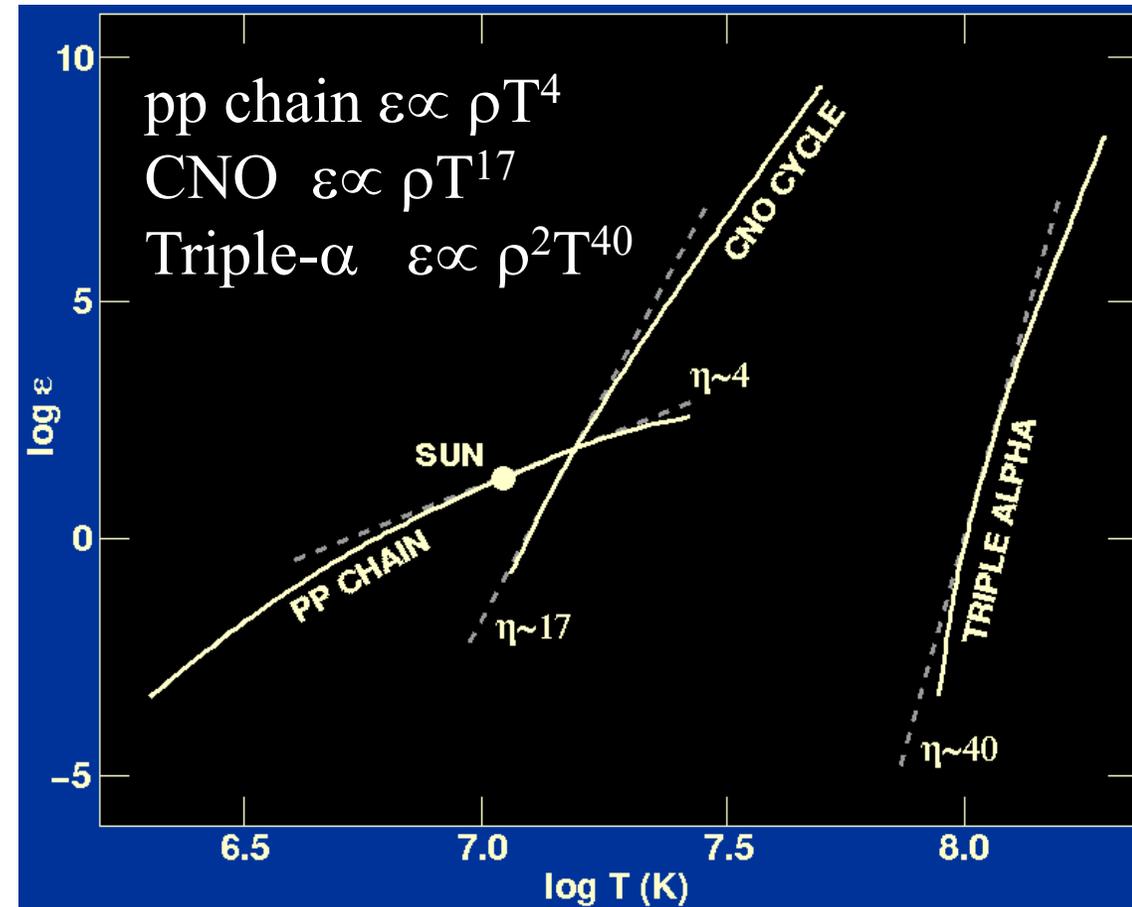
Durée de vie des étoiles

Le taux de réactions nucléaires pour fusionner l'hydrogène en hélium dépend de la température, avec une puissance 4 (pp chain) à cause de l'effet Tunnel

La température dépend de la masse, et le combustible est brûlé au taux L

$M/\tau \sim dM/dt \propto L \propto M^4 \rightarrow \tau \propto M^{-3}$
Soleil 10 milliards d'années

Etoiles O de $120 M_{\odot}$ $t = 5000$ ans
Ou étoile $10M_{\odot}$ $t = 10\text{Myr}$



Evolution des étoiles de faible masse

Les modèles d'étoiles, et d'isochrones sans cesse mis à jour et perfectionnés
PARSEC (Padova models) cf site web

- Etoiles en rotation
- Parfois convection au centre, parfois aux bords,
- Parfois la convection dépasse momentanément sa zone d'instabilité « overshooting »

Raffinements des taux de réactions nucléaires,
des opacités

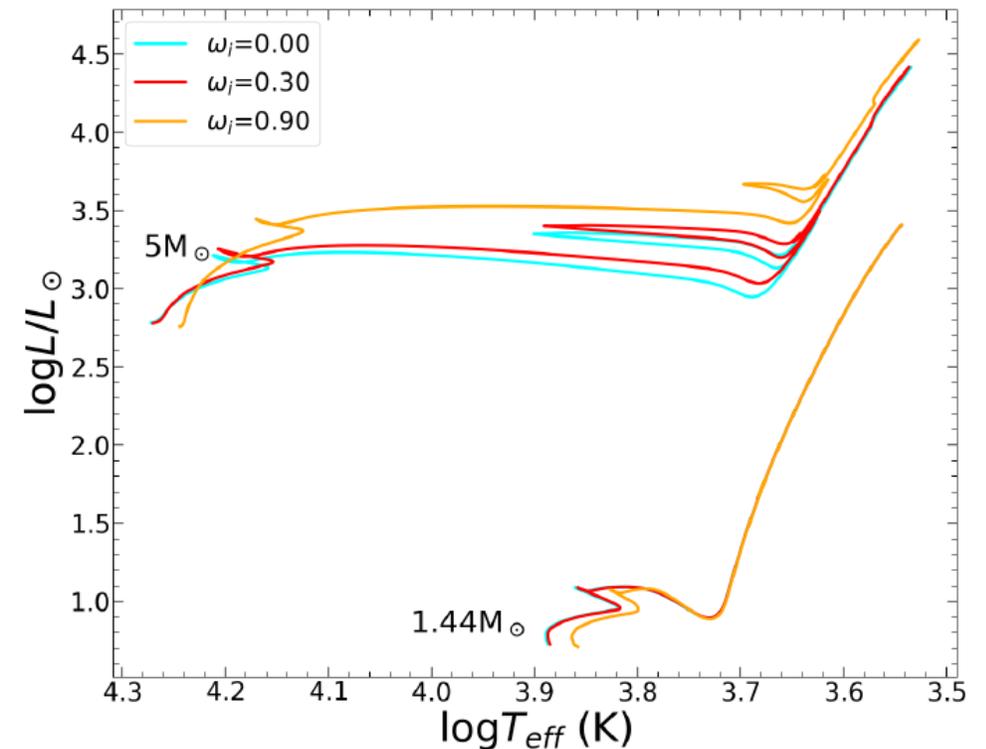
Selon le domaine de masse, de métallicité

Nguyen et al (2022)

Effets de la rotation →

Modèles d'atmosphère, et de son épaisseur optique τ

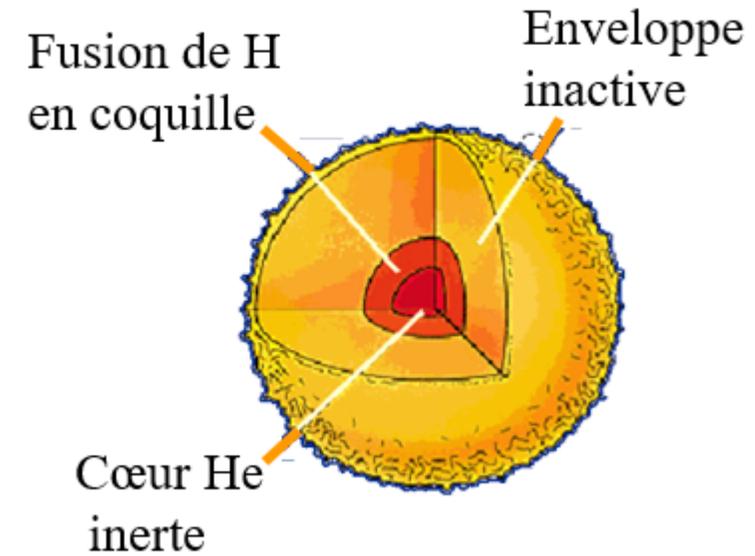
$$T^4(\tau) = \frac{3}{4} T_{\text{eff}}^4 [\tau + q(\tau)]$$



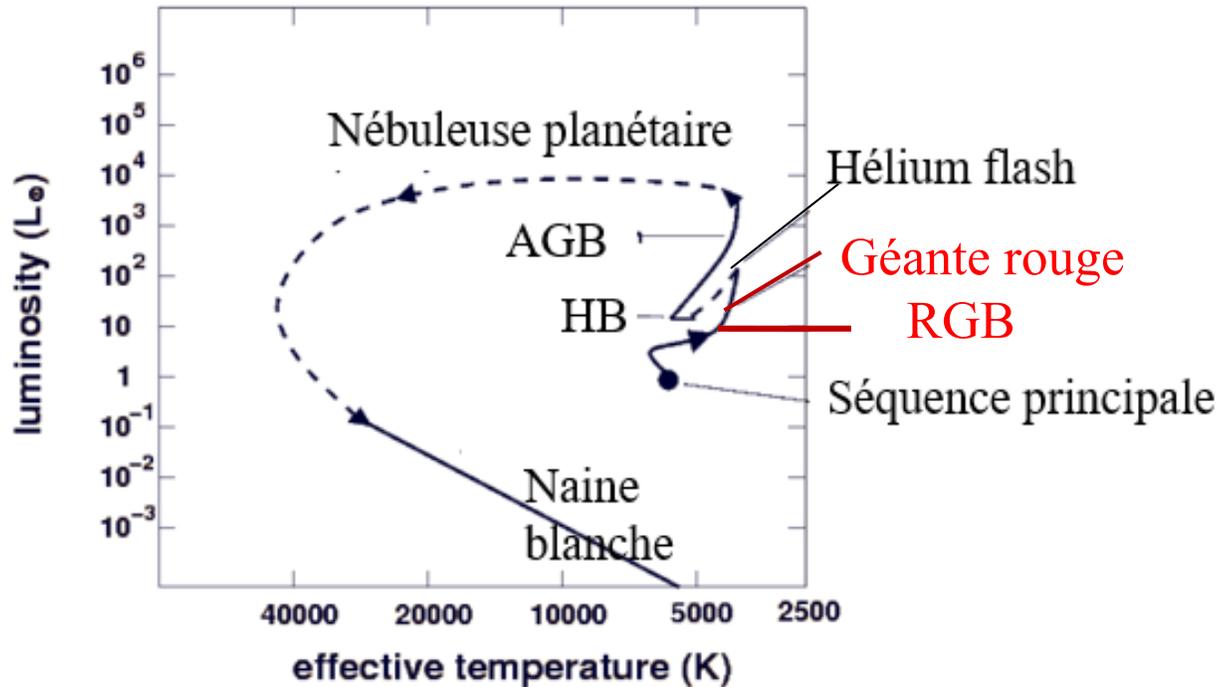
(1) Etoiles de faible masse: RGB

Après avoir brûlé H en He au centre, le cœur devient inerte
H continue à brûler dans une fine coquille

Le cœur se contracte et se réchauffe, la coquille aussi, et l'étoile
entre **en expansion**, avec **T décroissant**, sa couleur devient rouge



→ **Départ dans la phase des géantes rouges RGB**



(2) Etoiles de faible masse: HB

La température ne peut pas décroître indéfiniment
Si le gradient de T croît, la convection se généralise, et l'énergie est plus efficacement transportée, L croît
L'étoile se dirige verticalement vers les « géantes rouges »
Rayon x 100!

Le cœur d'hélium se contracte si bien qu'il devient dégénéré (e- pression de Pauli)

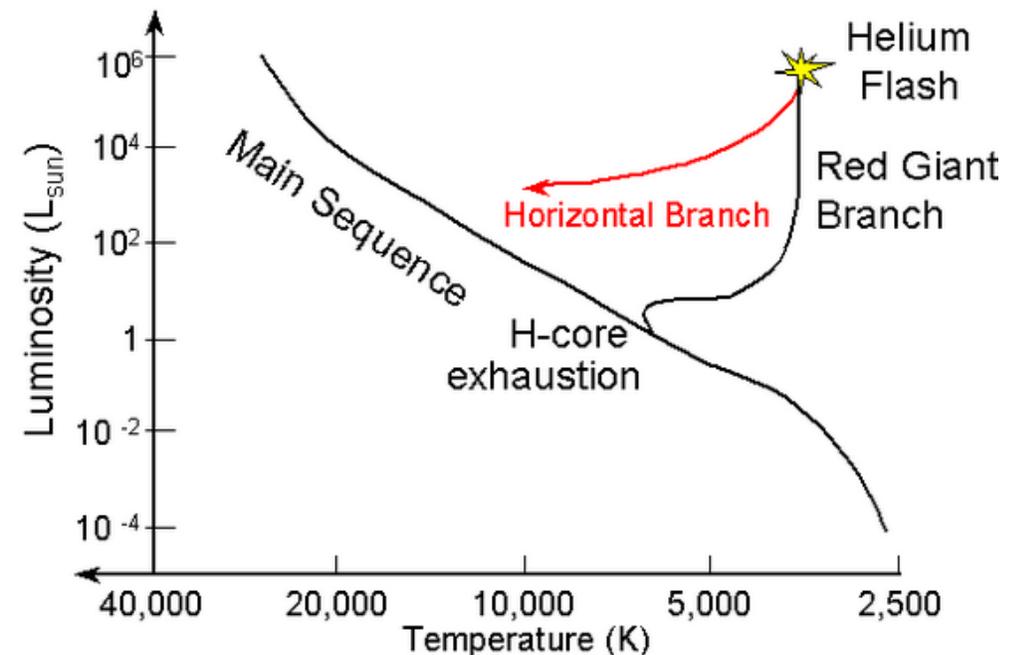
La coquille de H est plus dense,

la luminosité croît, la température aussi

Mais le cœur dégénéré ne rentre pas en expansion car la pression est indépendante de T

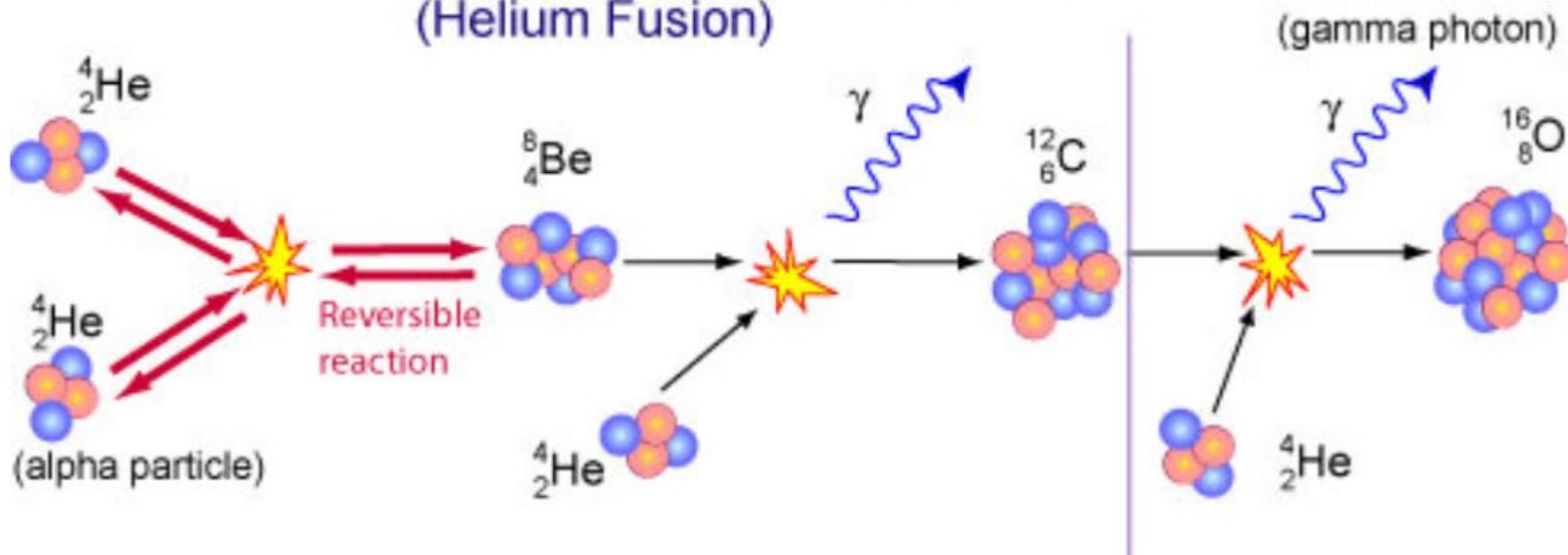
→ $T \sim 10^8 \text{K}$, la réaction **Triple- α** se déclenche

Température croît
(fusion de He et de H en coquille)
→ Branche horizontale



Helium Flash: la fusion de l'hélium commence

The Triple Alpha Process (Helium Fusion)



${}^8\text{Be}$ très instable
Reforme ${}^4\text{He}$
en moins d'une
seconde
Mais ${}^4\text{He}$ abondant
et bascule vers C
en $t < 1\text{s}$
Puis O

Instabilité, jusqu'à ce que T soit si élevé, que les électrons se libèrent et le cœur n'est plus dégénéré, fusion de He peut durer 100Myr

→ Expansion à nouveau

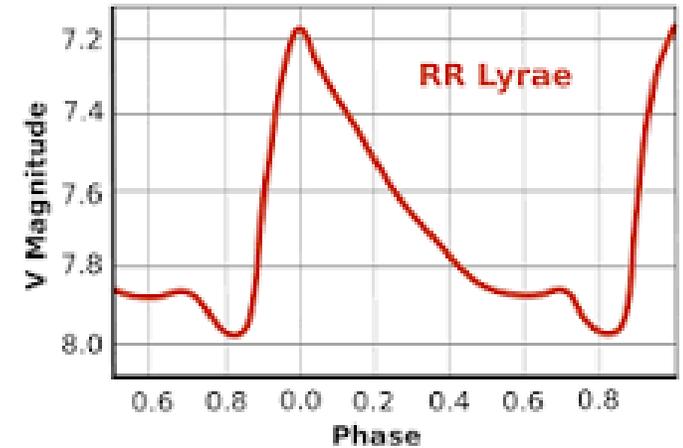
Instabilités et étoiles variables

Le noyau de l'étoile, dégénéré, devient isotherme, pour les faibles M L croît, car le rayon croît, et l'enveloppe devient moins opaque
A $T \sim 10^9 K$, flash de l'hélium, T croît, et le gaz n'est plus dégénéré, le noyau se dilate, puis se refroidit à nouveau: oscillations, car le point d'équilibre est dépassé, et l'étoile revient en arrière.

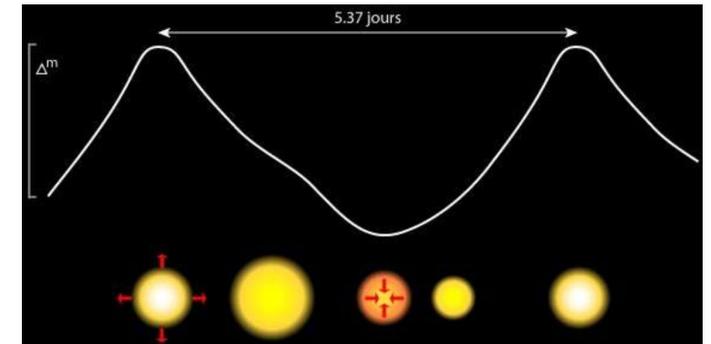
Les oscillations **sont entretenues** par des variations d'opacité, à cause de l'ionisation de He^+ en He^{++}
L'opacité croît quand l'enveloppe est comprimée, la surface de l'étoile ($\tau \sim 1$) remonte, à T plus basse.
L'énergie n'est pas rayonnée, mais sert à ioniser He^+
→ pulsations, ou L_{max} (T_{max}) ne corresp pas à R_{min}

→ **Phase RR-Lyrae** pour les faibles masses et **Céphéides** pour les massives

RR-Lyrae
P= 40jours



Céphéides P=qques jours

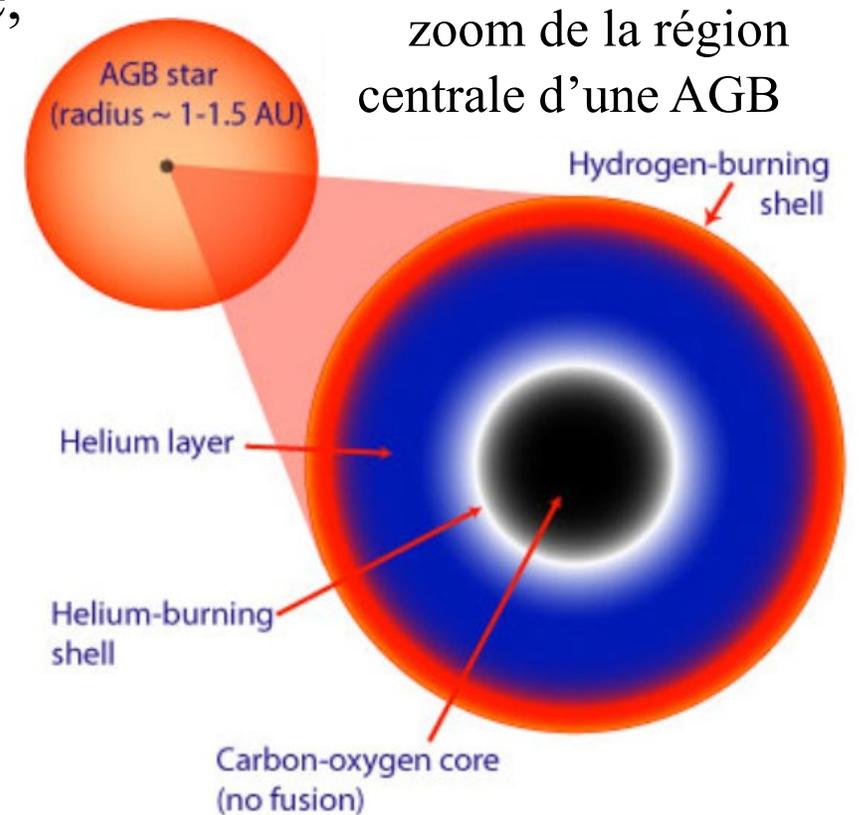
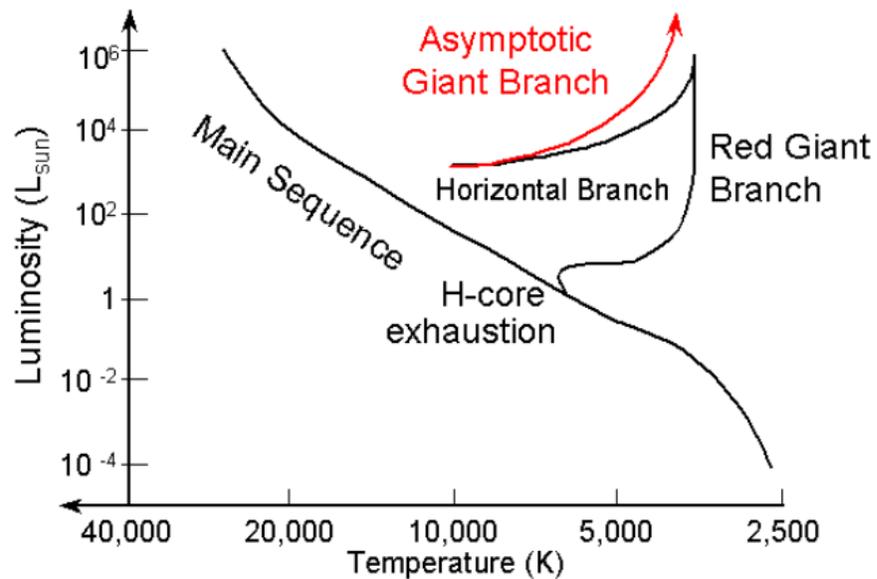


(3) Etoiles de faible masse: AGB

A nouveau, le cœur de carbone/oxygène devient inerte, et se contracte, → réchauffe une fine coquille autour

He brule dans une coquille

Mais l'interaction entre les deux coquilles devient instable, Le comportement est complexe, l'étoile perd de la masse en éjectant l'enveloppe → nébuleuse planétaire



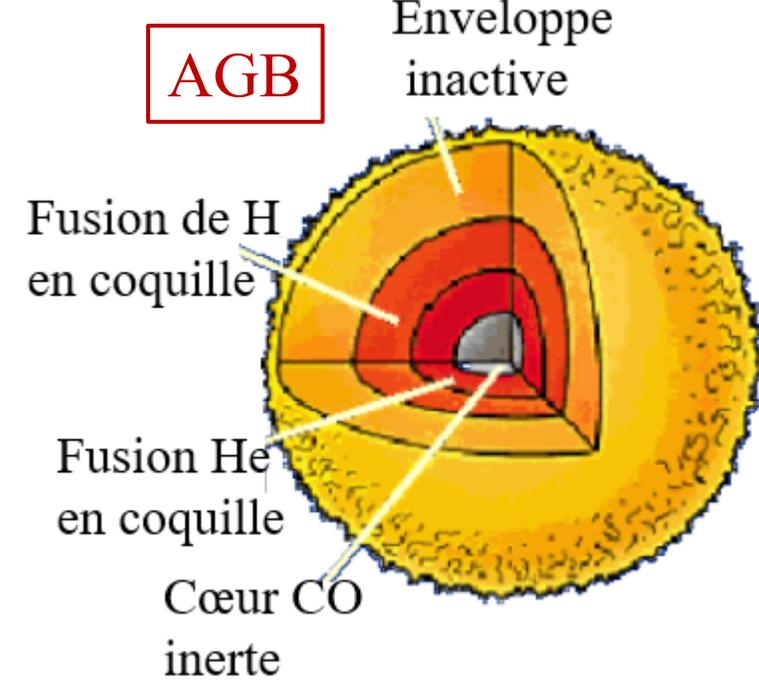
Fin des étoiles de faible masse

Dans la phase AGB (Asymptotic Giant Branch), une étoile de $1 M_{\odot}$ peut avoir une taille de 1.5 AU, et $L = 10^4 L_{\odot}$

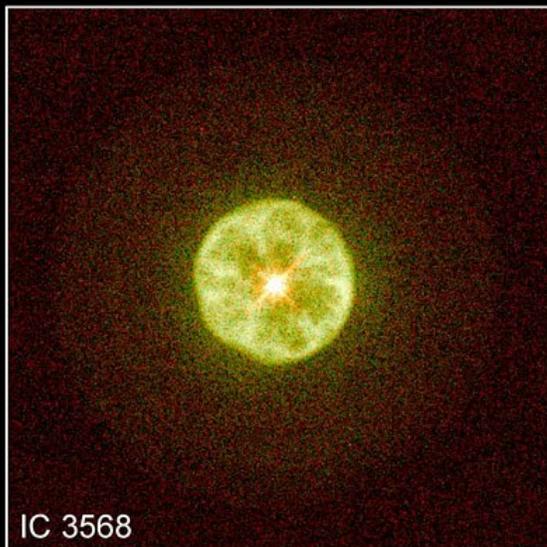
La coquille brûlant He n'est pas dégénérée, mais a des sursauts de réactions de capture de neutrons appelées réactions s (slow) pouvant former des noyaux jusqu'à 83 protons (bismuth)
Par convection, ces éléments sont observés à la surface
Un sursaut peut durer ~ 100 a tous les 10^4 - 10^5 ans
→ étoiles variables Mira

Pendant ces périodes d'instabilité, l'enveloppe perd de la masse 10^{-6} - $10^{-4} M_{\odot}/\text{an}$

Nébuleuse planétaire
Helix, oxygène
hydrogène



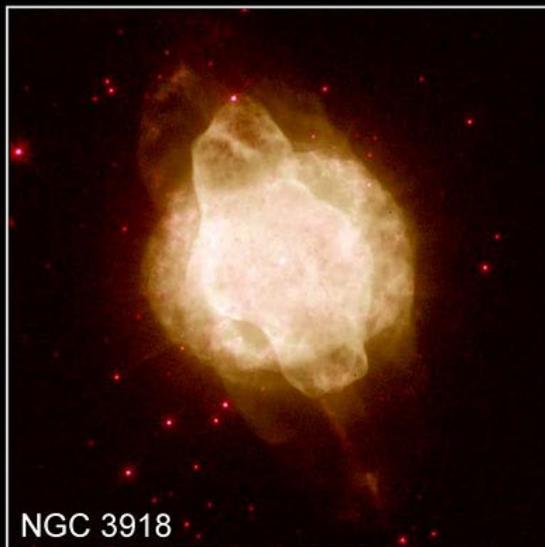
Nébuleuses planétaires



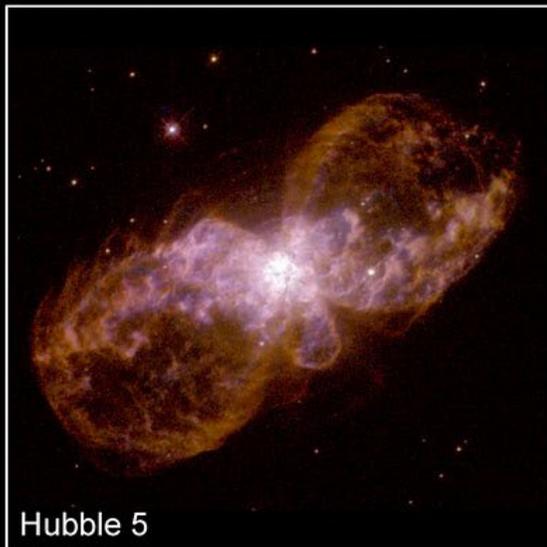
IC 3568



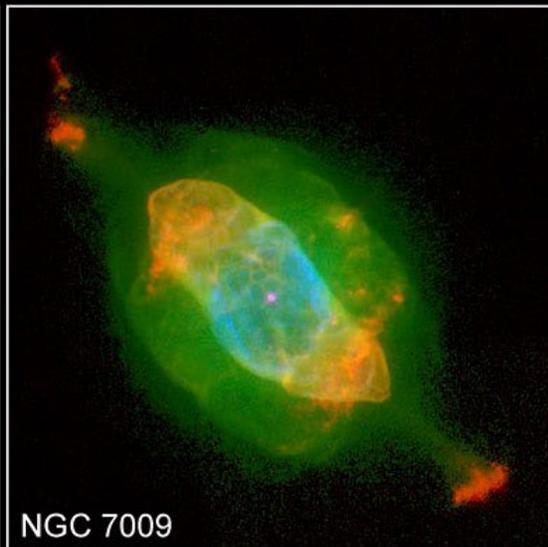
NGC 6826



NGC 3918



Hubble 5



NGC 7009



NGC 5307



Plus ou moins complexes selon la binarité, et la projection

Planetary Nebula Gallery
Hubble Space Telescope • WFPC2

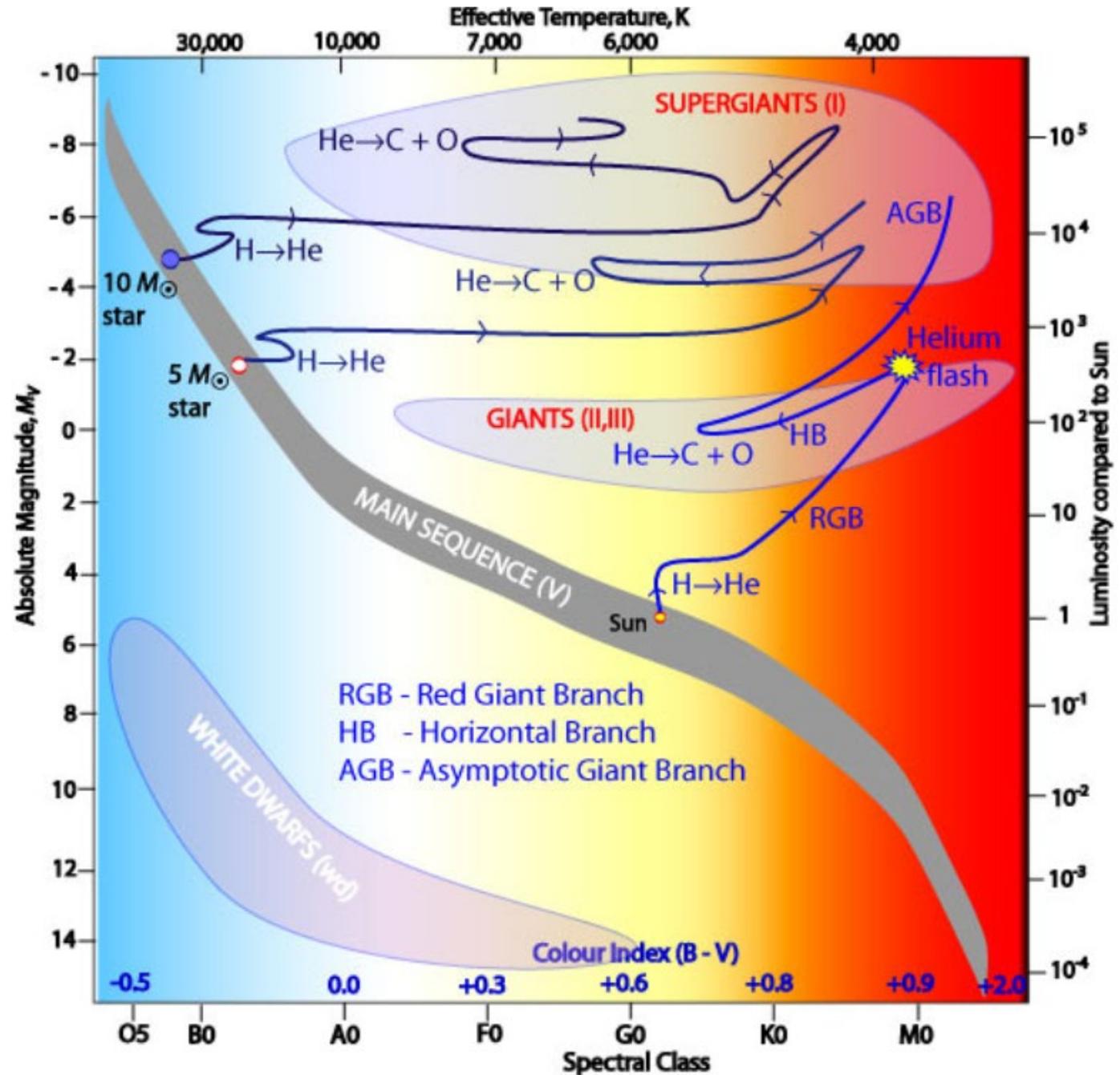
Etoiles de masses intermédiaires

Masses plus élevées, cycle CNO
la température est plus forte au centre
→ Convection → centre homogène
Mélange des couches, apporte H

Lorsque H est épuisé dans le cœur,
l'étoile sort de la SP

Plus d'énergie → contraction du cœur,
Chauffage d'une mince coquille $H \rightarrow He$

A chaque contraction, **crochet à gauche**
Puis repart à droite vers les géantes



Etoiles intermédiaires → massives

Entre 2 et 6 M_{\odot} , le cœur ne devient pas dégénéré, mais atteint la limite de Schönberg-Chandrasekhar (SC), ou le cœur isotherme n'est plus stable et s'effondre

→ Fusion de He en C, O

Phase rapide, 1Myr devient une supergéante bleue, puis cœur C-O inerte

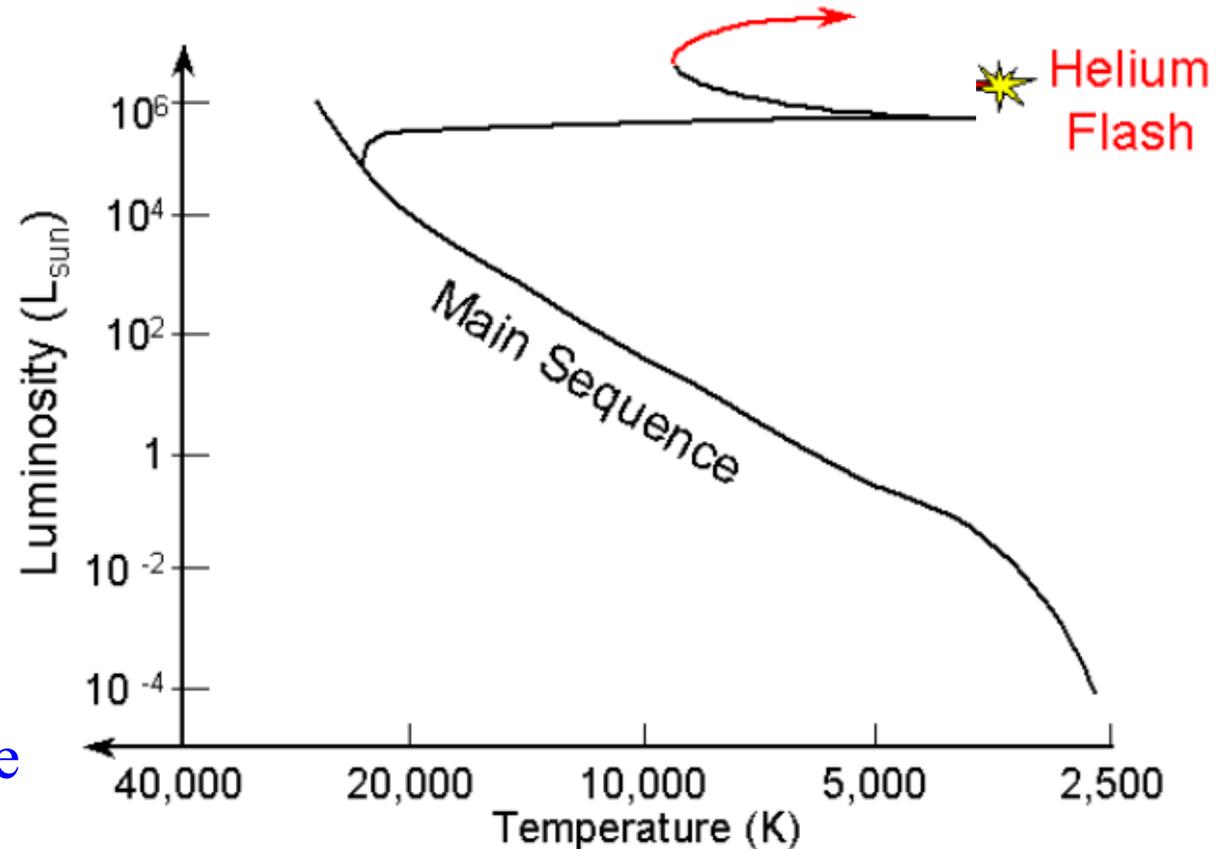
→ Repart vers supergéante rouge

Explique le « trou » des géantes jaunes en HRD

→ Si $M < 8 M_{\odot}$, le carbone ne fusionne pas en Fe

L'enveloppe perd de la masse,

Se dirige vers les naines blanches O-Ne-Mg



Etoiles $4 M_{\odot} < M < 8 M_{\odot}$

A ces masses, pas de Helium flash (coeur non dégénéré)
évolution plus continue (10^6 et non 10^9 ans)

Phase de fusion du carbone, Donne O, Ne, Mg

Très inefficace

→ Beaucoup de neutrinos

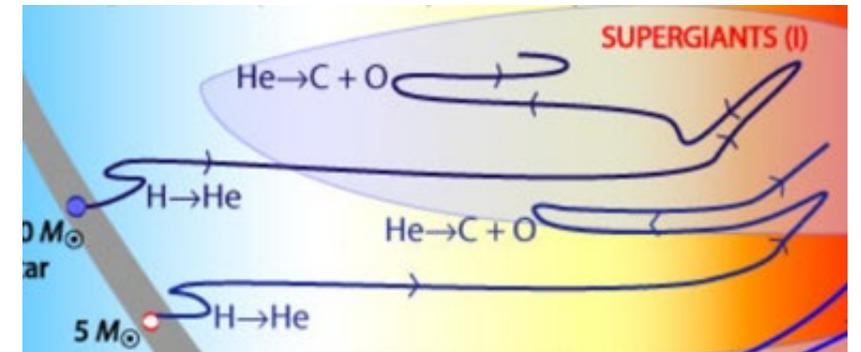
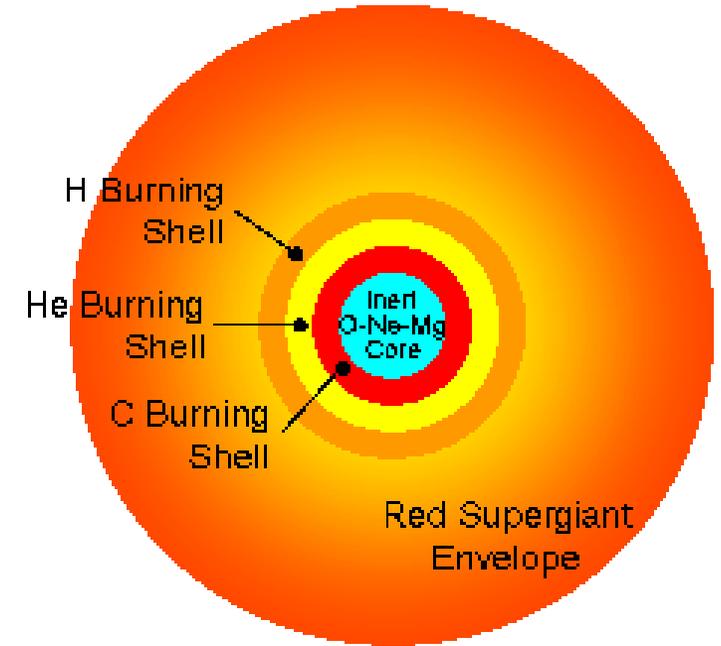
Durée 1000 ans – C épuisé

A partir de $5M_{\odot}$, la pression de radiation domine

Le cœur contracte, il peut se former des fines
coquilles où C, He, et H peuvent brûler

Evolution quasi horizontale, R croît et T décroît

Rapidement l'enveloppe est éjectée



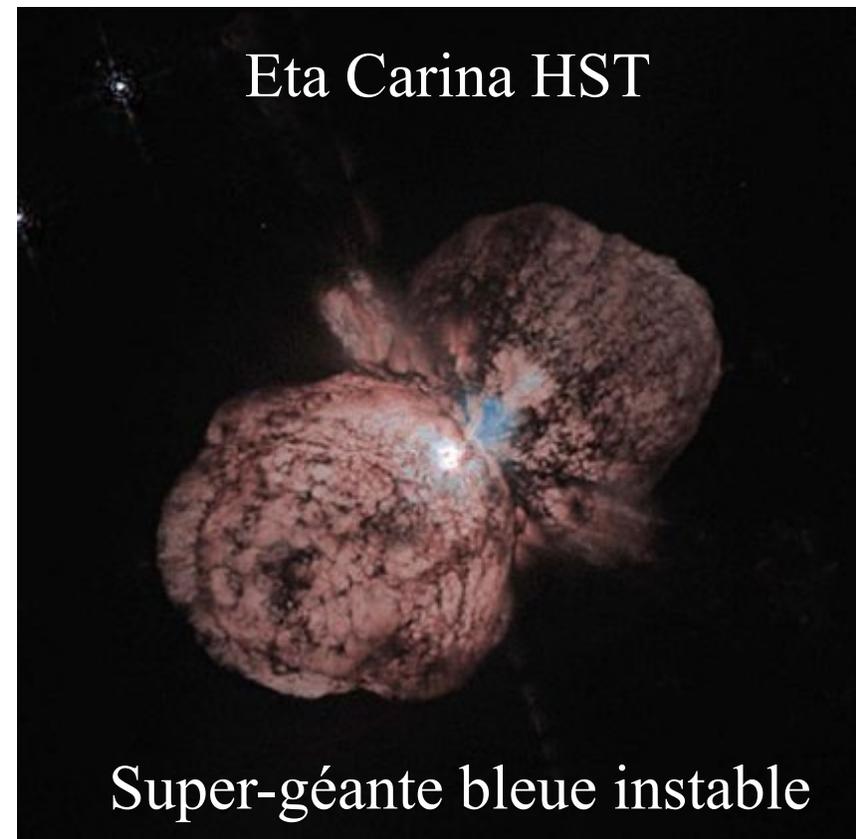
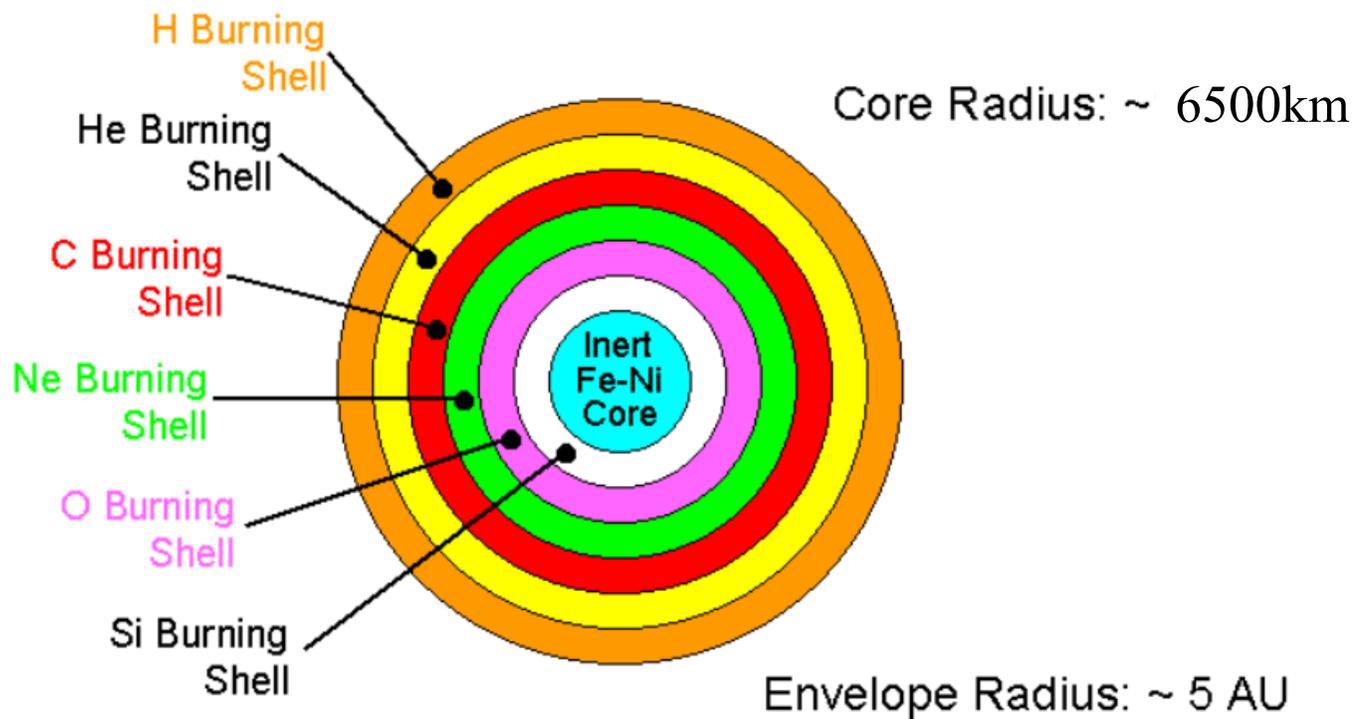
Etoiles massives $> 8 M_{\odot}$

Evolution très rapide (enveloppe ne suit plus)

Ne fusionne $T > 1.5 \cdot 10^9$ K dure qqes ans

Puis O, puis Silicium $T > 3.5 \cdot 10^9$ K

Forme un coeur Ni/Fe devient inerte $1-2 M_{\odot}$



Grande éruption en 1840
 $250 M_{\odot}$ initialement?

Carbon-flash possible,
Si coeur dégénéré

Etoiles massives (fin)

Le cœur de fer devient dégénéré,

Si sa masse est $> 1.4 M_{\odot}$, pas d'équilibre possible

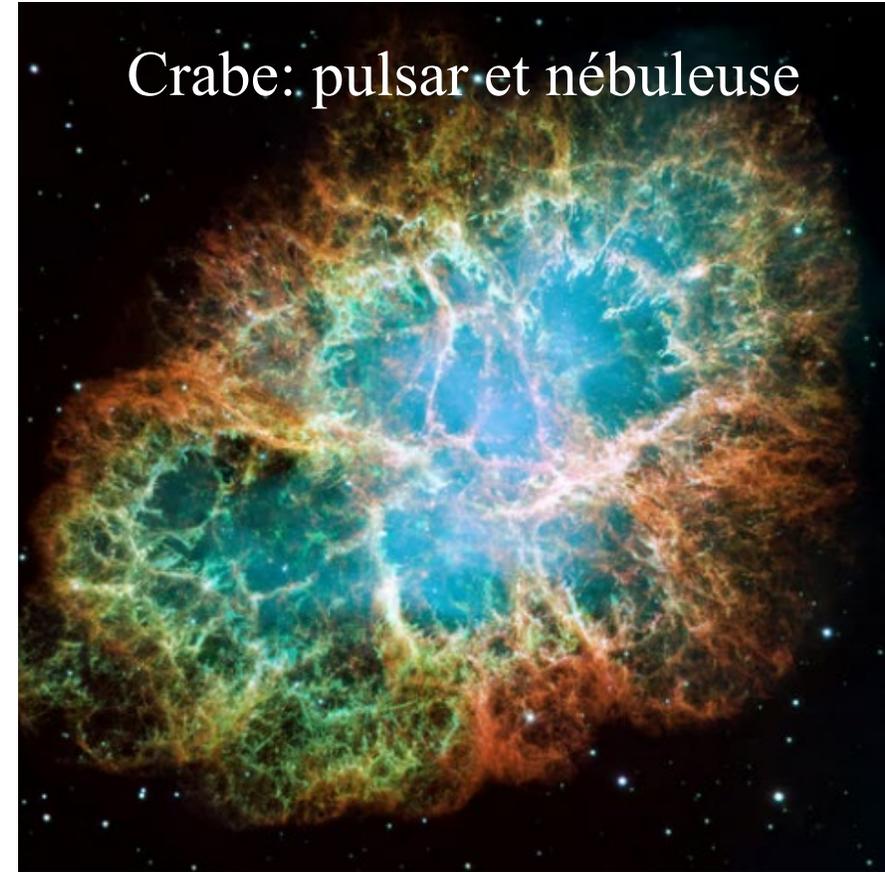
→ Cœur de neutrons

L'enveloppe s'effondre et rebondit sur ce cœur

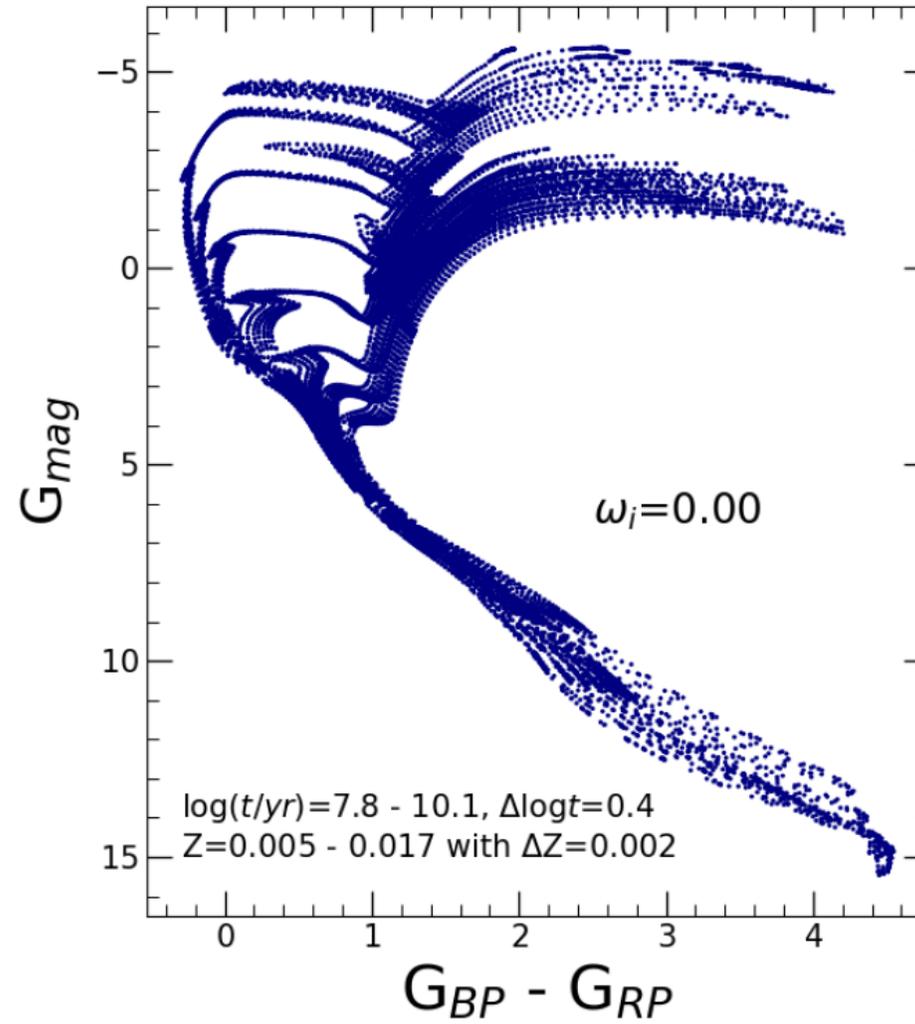
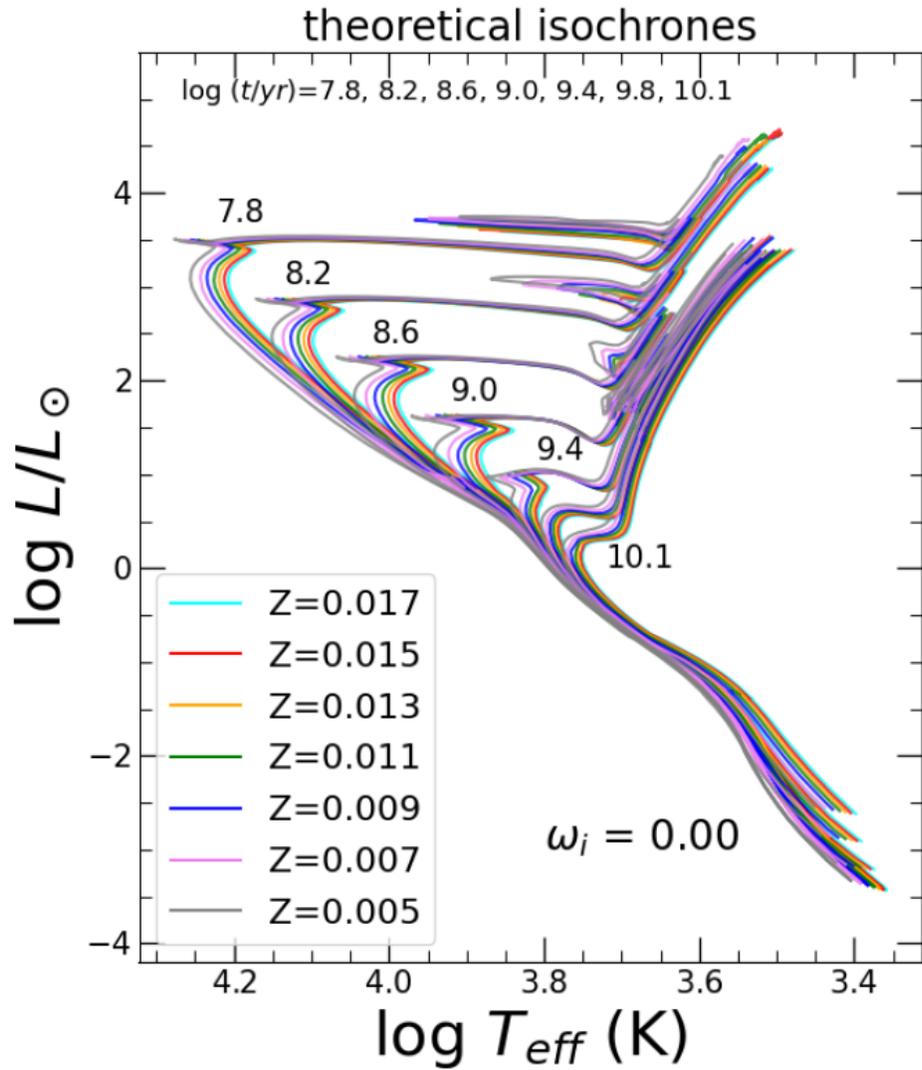
→ Supernova de type 2

Si sa masse est $> 3 M_{\odot}$ → trou noir

Crabe: pulsar et nébuleuse



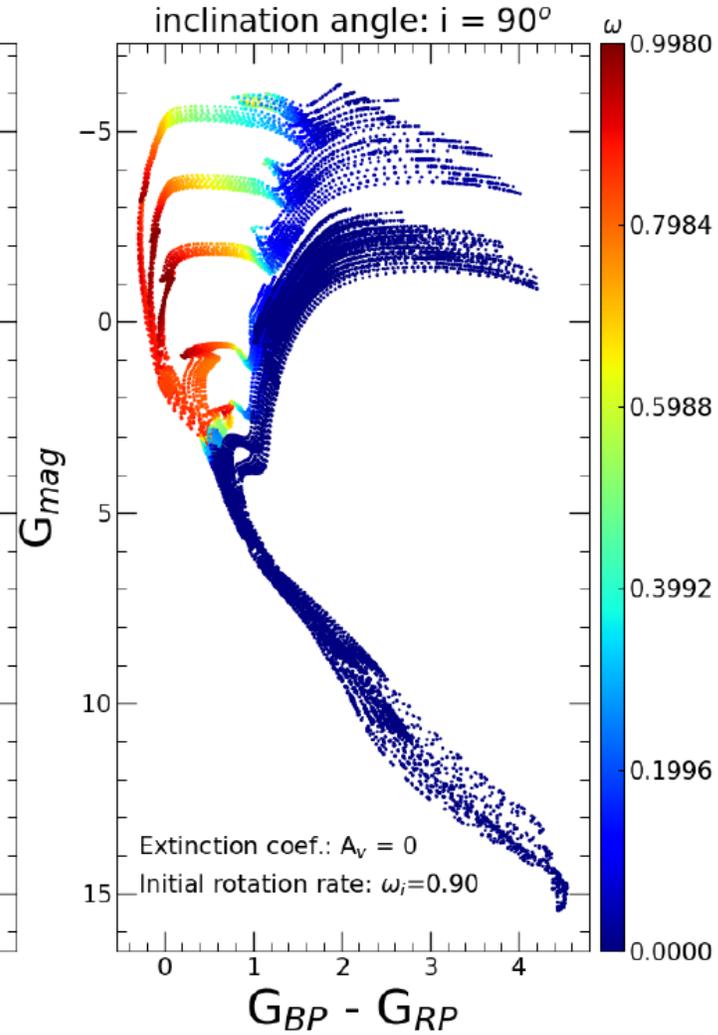
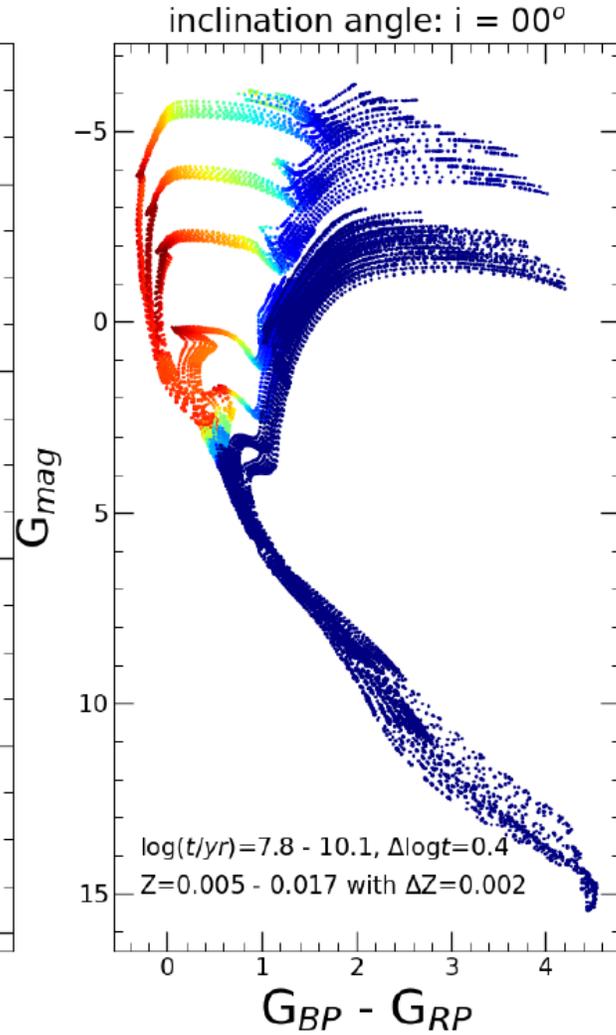
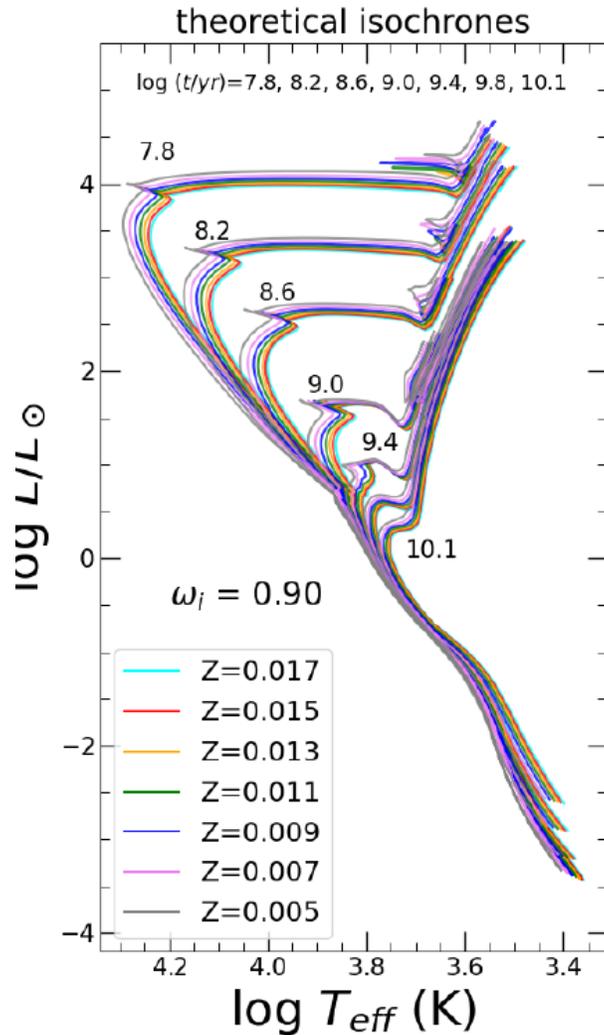
Isochrones: métallicité (et rotation)



Isochrones: rotation

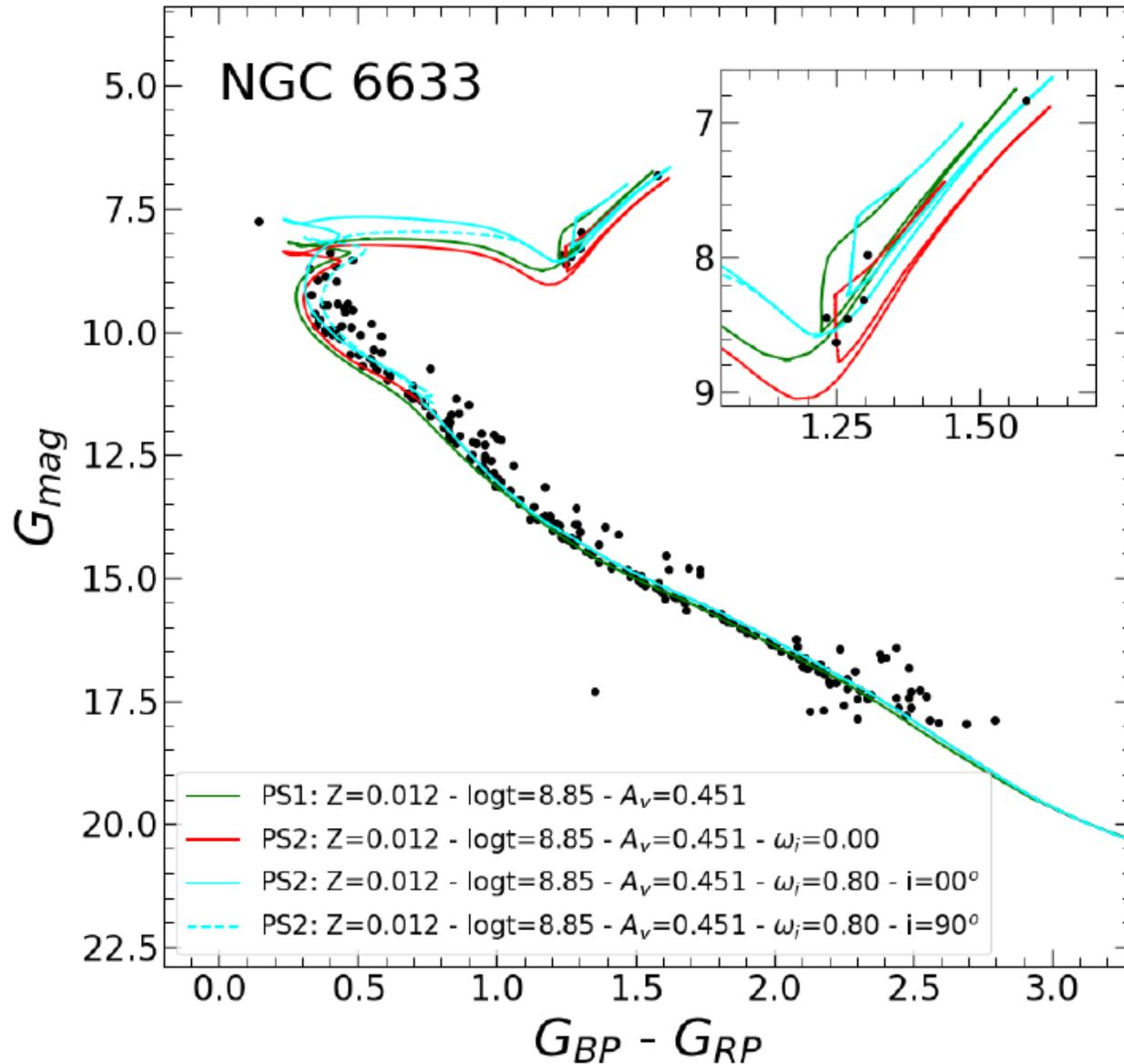
Etoiles en rotation, ω compte, mais aussi l'inclinaison sur la los
 Avec rotation, plus de perte de masse

$$\omega = \frac{\Omega}{\Omega_c}, \quad \Omega_c = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{\frac{GM}{R_{\text{pol}}^3}}$$



Ω_c détruit
 l'étoile

Application à l'amas ouvert jeune NGC6633



Etoiles massives, plus sensibles
à la rotation

Age $10^{8.85}$ an

La rotation donne un meilleur accord
avec les observations

Surtout au turn-off

Les effets de l'inclinaison sont clairement
visibles

Par contre les étoiles du He-clump

Ne montrent pas de rotation

➔ Deux populations

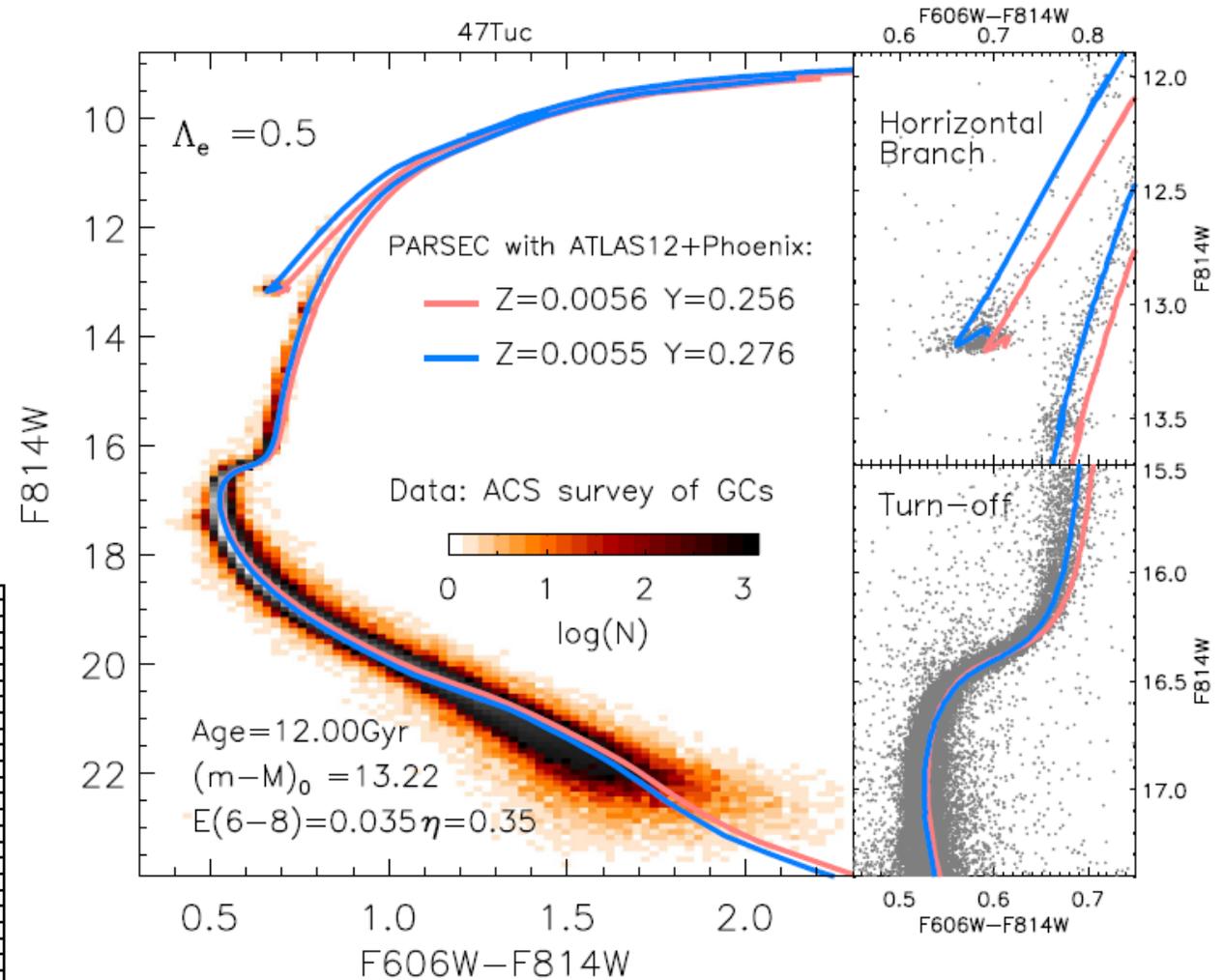
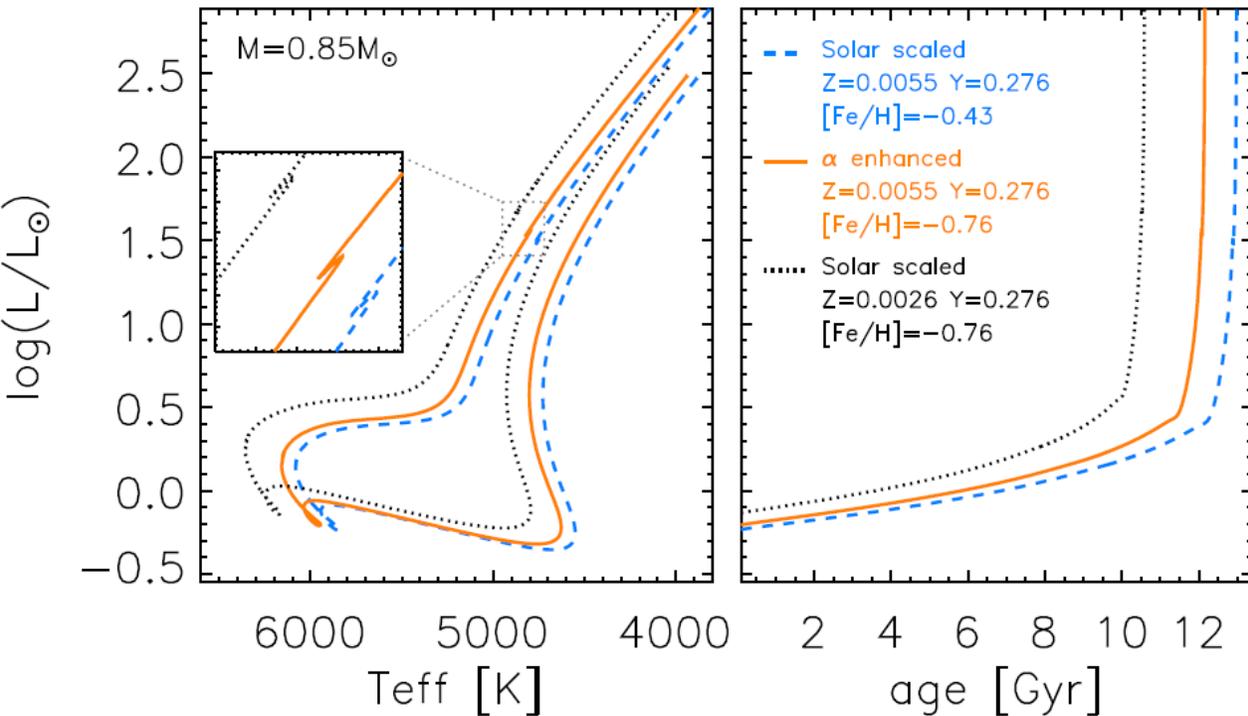
Calibrations 47 Tuc

Calibration pour 47 Tuc, 2 valeurs de α/Fe

α/Fe indicateur de SF rapide

→ age, distance, extinction, et

Perte de masse des RGB

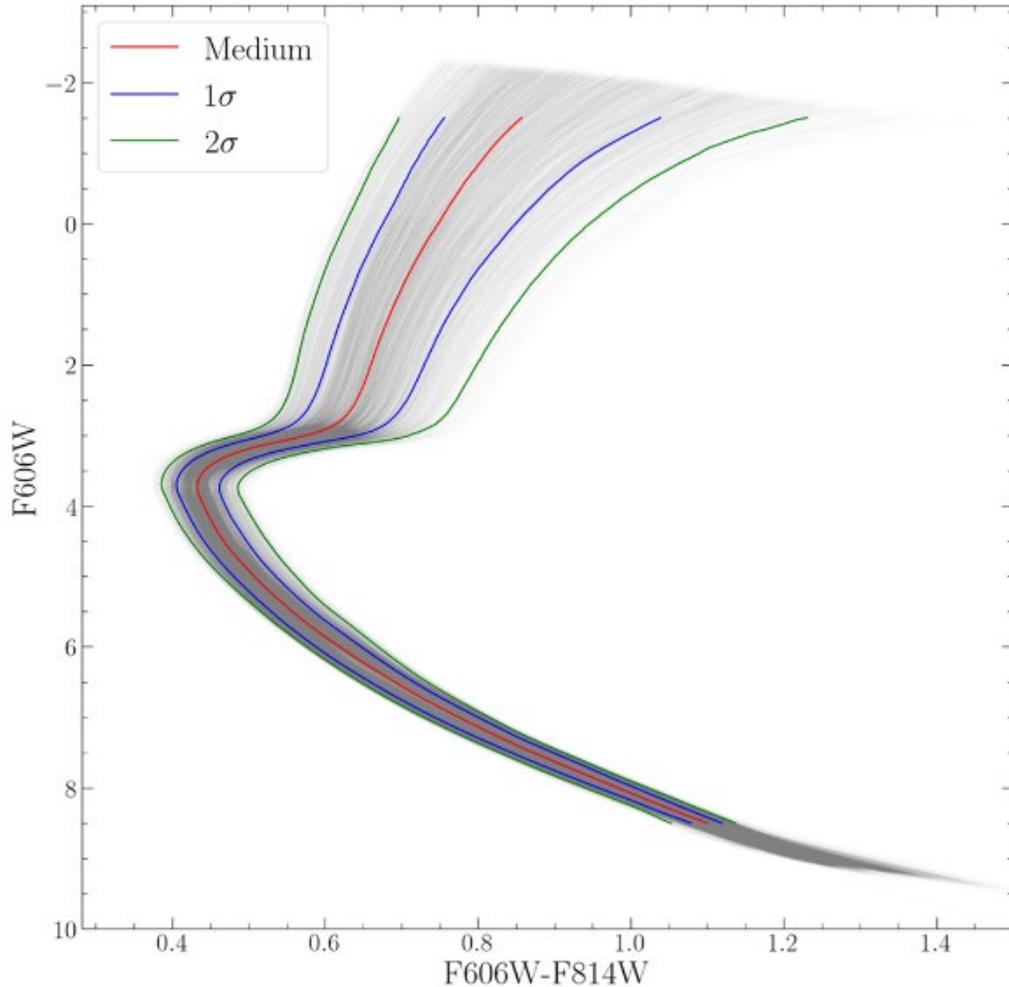


Rouge: 1ère generation d'étoiles

Bleu: 2ème generation d'étoiles

Détermination de l'âge de M92

Difficile d'obtenir des âges absolus, il faut corriger de l'extinction, des distances, métallicité, etc..



Simulation de 20 000 ensembles pour l'amas globulaire M92, avec des isochrones stellaires

Variation de la physique: opacités, réactions nucléaires, coefficients de diffusion, conditions de l'atmosphère, abondances, et convection

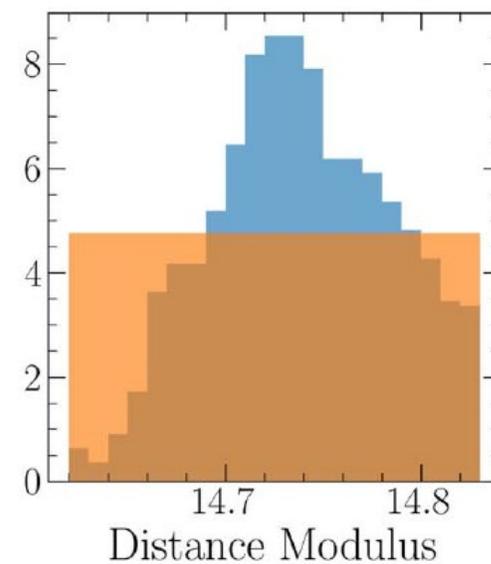
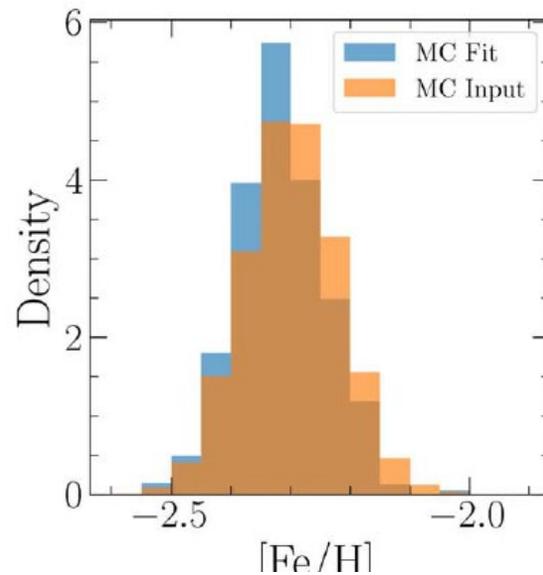
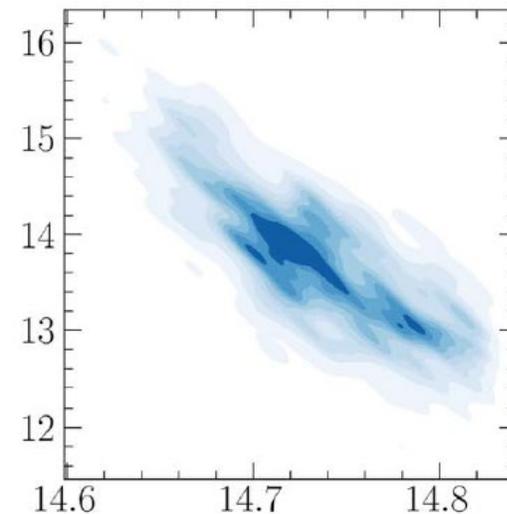
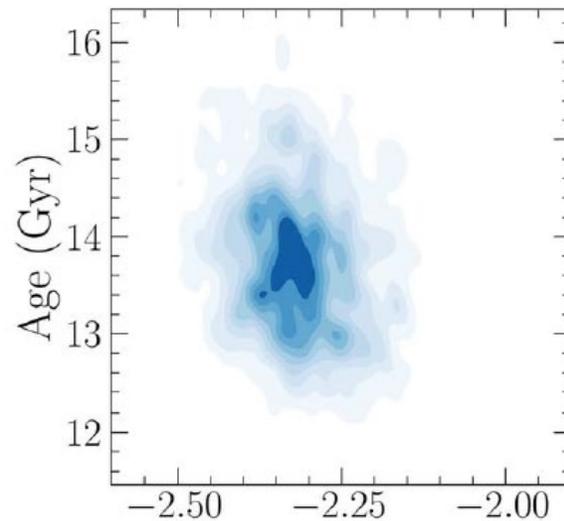
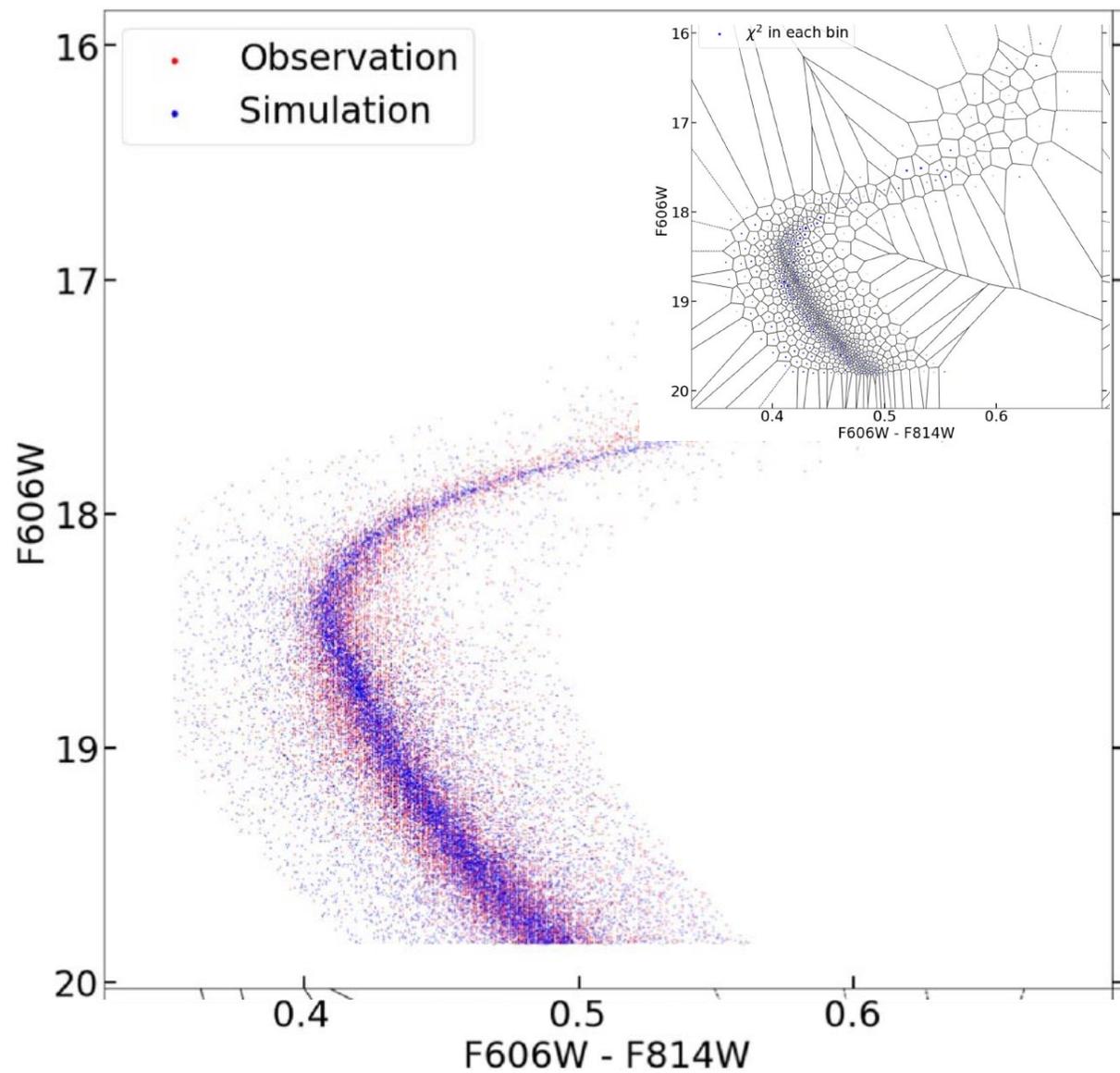
Résultat, comparaison avec HST

Âge = 13.8 ± 0.75 10^9 ans

Erreur dûe essentiellement à la distance

Age de M92

Essentiel de mieux connaître Dist

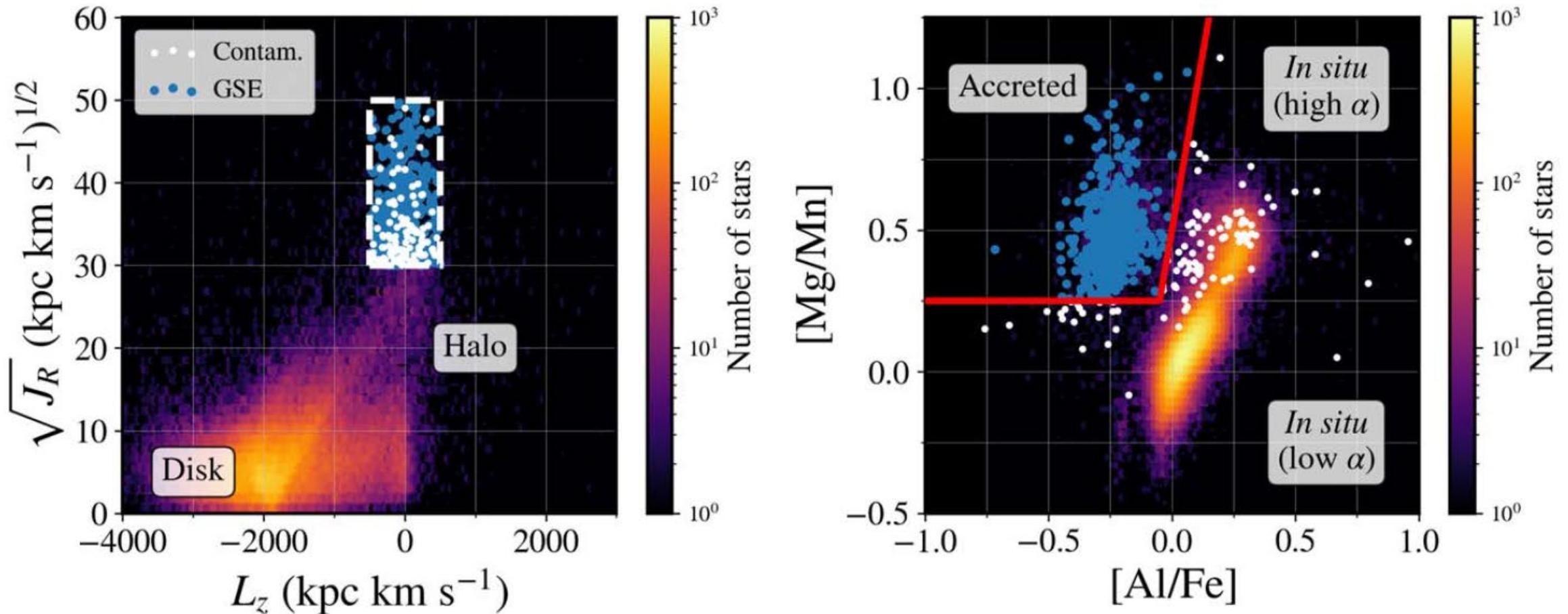


Rencontre Gaia-Encelade (GSE) avec notre Galaxie

Dernière fusion majeure, il y a 8 Gyr Etoiles $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.22$ α/Fe élevé

Confusion avec la Voie lactée? Amas globulaires de GSE

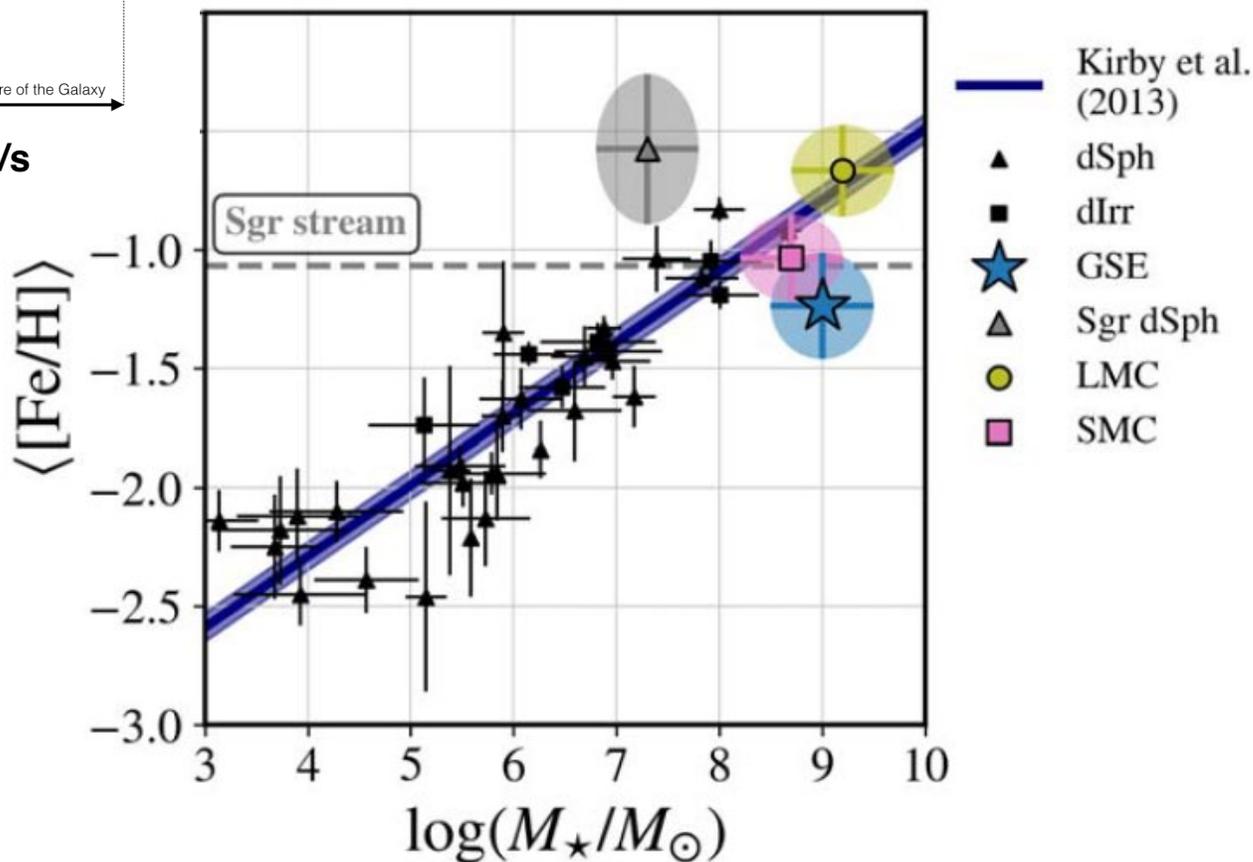
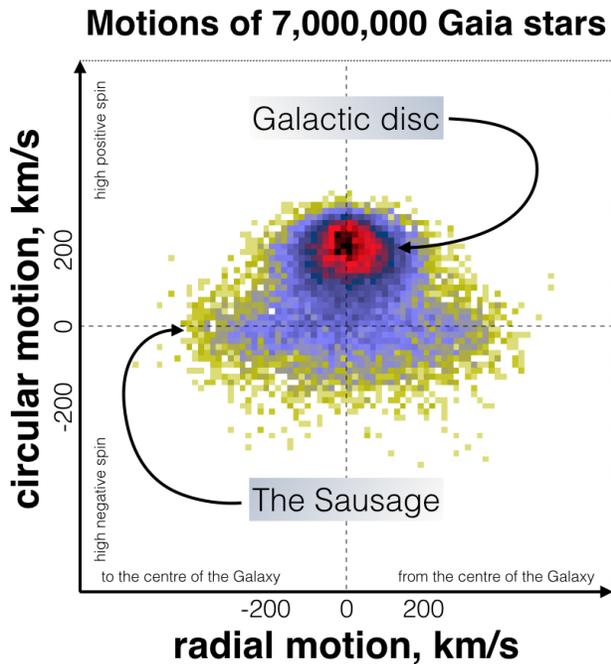
ωCen vient peut-être de là



Distinction cinématique et chemodynamique

Limberg et al 2022

Rencontre Gaia-Sausage-Encelade avec notre Galaxie



Relation Masse-métallicité

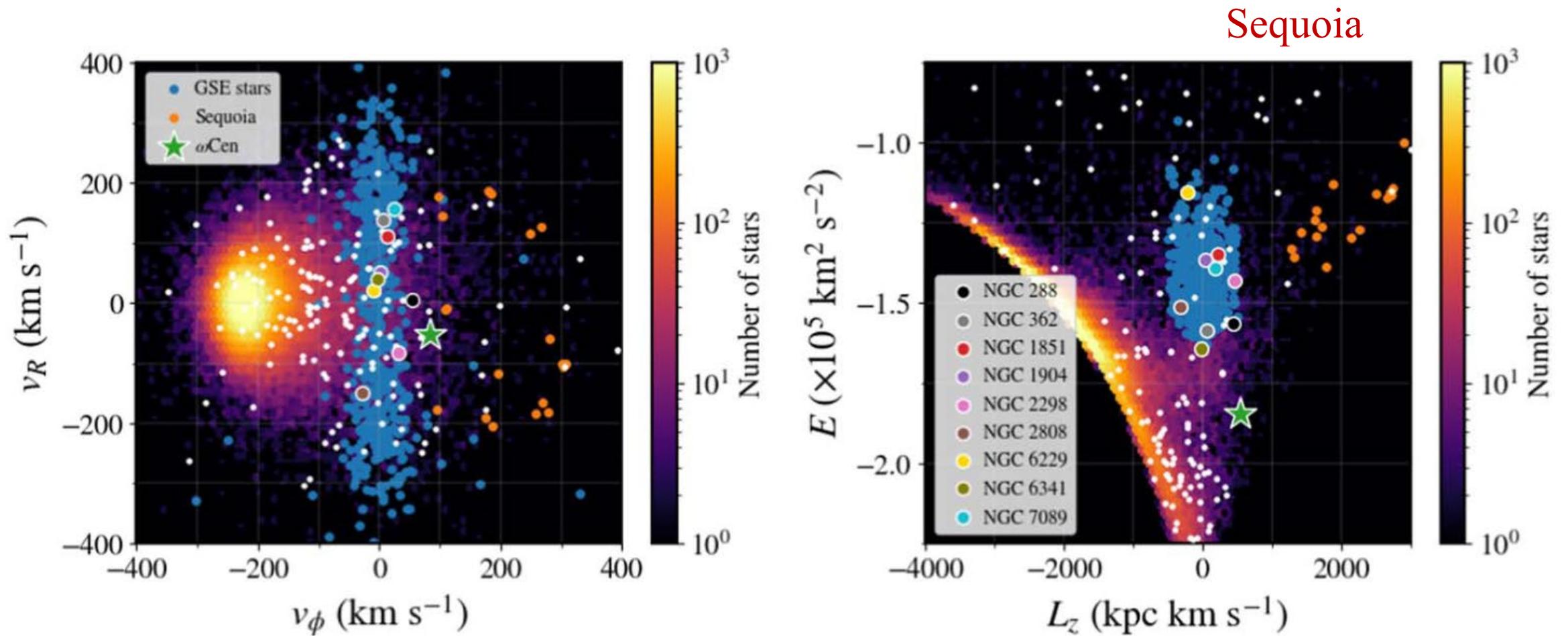
Masse de GSE et $[Fe/H]$ cohérent

Pas de confusion avec les naines autour de la MW qui ont un α/Fe moins fort Sauf Sequoia?

→ Isochrone fit

Limberg et al 2022

Rencontre Gaia-Encelade avec notre Galaxie

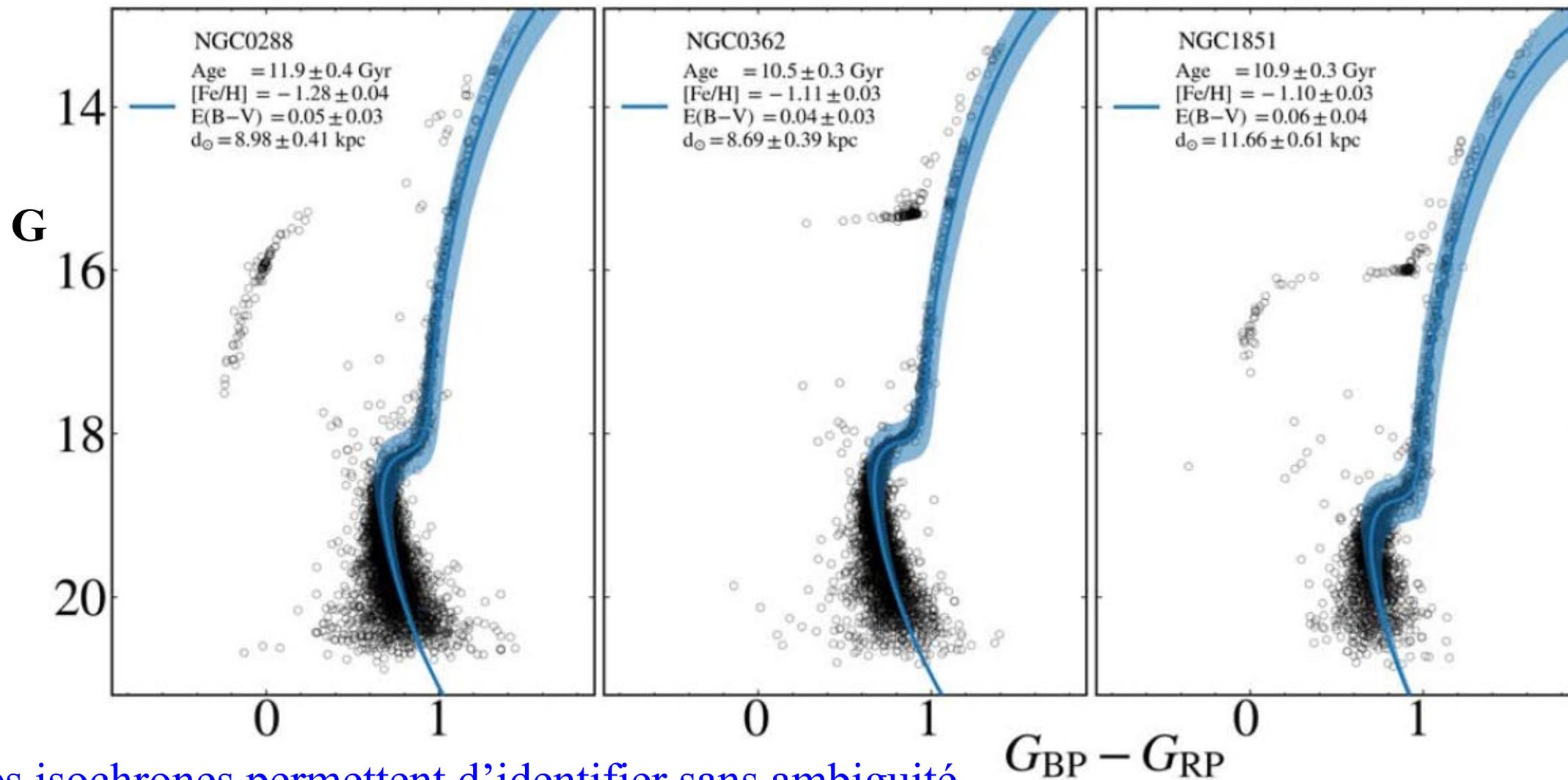


GC de la Voie lactée en blanc

Distinction cinématique

Limberg et al 2022

HRD des amas globulaires de GSE



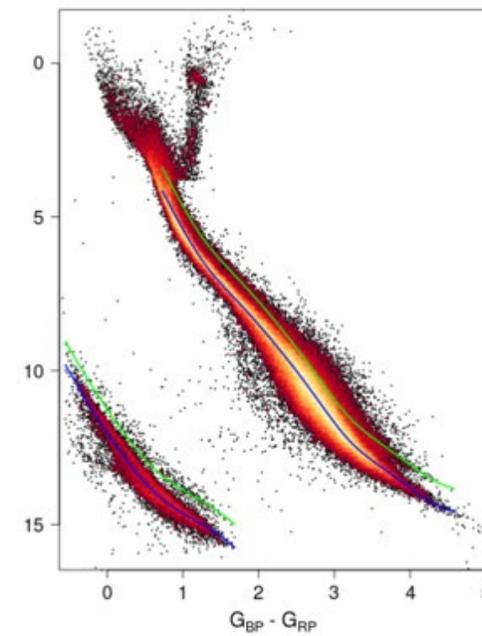
Les isochrones permettent d'identifier sans ambiguïté les GC de GAIA-Sausage/Encelade

Limberg et al 2022

Résumé

1- Classification des étoiles

Le diagramme HR englobe toutes les classes
Avec GAIA, statistique et précision aident
les découvertes



2- Physique interne et atmosphère

Les équations de physique interne
résolues numériquement, convergent avec
les observations

3- Evolution selon la masse

Etoiles de faible masse ou
de masse élevée, destins différents

