



Les étoiles

École d'été « l'univers à la portée de tous »
23-26 août 2017

Observons les étoiles

- Il y a 6000 étoiles visibles à l'œil nu sur la sphère céleste
- Elles ont une apparence ponctuelle
- Dès le VI^{ème} siècle, Jean Philopon, philosophe chrétien au VI^e siècle considère que les étoiles sont des soleils.

Les étoiles sont le creuset de la matière d'où proviennent les éléments naturels

Classification Périodique des éléments

Masse molaire atomique en g.mol⁻¹

Symbole

Numéro atomique (nombre de charge)

Fond : **Vert** = Métaux vrais ; **Rose** = Non métaux ; **Bleu** = Semi-Conducteurs ; **Jaune** = Gaz nobles
Cadre rouge = élément rare

1,0 H 1 Hydrogène																	4,0 He 2 Hélium						
6,9 Li 3 Lithium	9,0 Be 4 Béryllium																	10,8 B 5 Bore	12,0 C 6 Carbone	14,0 N 7 Azote	16,0 O 8 Oxygène	19,0 F 9 Fluore	20,2 Ne 10 Néon
23,0 Na 11 Sodium	24,3 Mg 12 Magnésium																	27,0 Al 13 Aluminium	28,1 Si 14 Silicium	31,0 P 15 Phosphore	32,1 S 16 Sulfure	35,5 Cl 17 Chlore	39,9 Ar 18 Argon
39,1 K 19 Potassium	40,1 Ca 20 Calcium	45,0 Sc 21 Scandium	47,9 Ti 22 Titane	50,9 V 23 Vanadium	52,0 Cr 24 Chrome	54,9 Mn 25 Manganèse	55,8 Fe 26 Fer	58,9 Co 27 Cobalt	58,7 Ni 28 Nickel	63,5 Cu 29 Cuivre	65,4 Zn 30 Zinc	69,7 Ga 31 Gallium	72,6 Ge 32 Germanium	74,9 As 33 Arsenic	79,0 Se 34 Sélénium	79,9 Br 35 Brome	83,8 Kr 36 Krypton						
85,5 Rb 37 Rubidium	87,6 Sr 38 Strontium	88,9 Y 39 Yttrium	91,2 Zr 40 Zirconium	92,9 Nb 41 Niobium	95,9 Mo 42 Molybdène	98,8 Tc 43 Technétium	101,1 Ru 44 Ruthénium	102,9 Rh 45 Rhodium	106,4 Pd 46 Palladium	107,9 Ag 47 Argent	112,4 Cd 48 Cadmium	114,8 In 49 Indium	118,7 Sn 50 Étain	121,8 Sb 51 Antimoine	127,6 Te 52 Tellure	126,9 I 53 Iode	131,3 Xe 54 Xénon						
132,9 Cs 55 Césium	137,3 Ba 56 Baryum	138,9 La 57 Lanthane	178,5 Hf 72 Hafnium	180,9 Ta 73 Tantale	183,9 W 74 Tungstène	186,2 Re 75 Rhenium	190,2 Os 76 Osmium	192,2 Ir 77 Iridium	195,1 Pt 78 Platine	197,0 Au 79 Or	200,6 Hg 80 Mercure	204,4 Tl 81 Thallium	207,2 Pb 82 Plomb	209,0 Bi 83 Bismuth	209 Po 84 Polonium	210 At 85 Astate	222 Rn 86 Radon						
223 Fr 87 Francium	226,1 Ra 88 Radium	227 Ac 89 Actinium	(261) Rf 104 Rutherfordium	(262) Db 105 Dubnium	(266) Sg 106 Seaborgium	(264) Bh 107 Bohrium	(269) Hs 108 Hassium	(268) Mt 109 Meitnerium	(271) Ds 110 Darmstadtium														

Etat du corps simple correspondant aux éléments :
 Noir = Solide ; Rouge = Gazeux ; Vert = Liquide.
 Les éléments en rose sont obtenus par synthèse

Lanthanides

138,9 La 57 Lanthane	140,1 Ce 58 Cérium	140,9 Pr 59 Praseodyme	144,2 Nd 60 Néodyme	145 Pm 61 Prométhée	150,0 Sm 62 Samarium	152,0 Eu 63 Europium	157,3 Gd 64 Gadolinium	158,9 Tb 65 Terbium	162,5 Dy 66 Dysprosium	164,9 Ho 67 Holmium	167,3 Er 68 Erbium	168,9 Tm 69 Thulium	173,0 Yb 70 Ytterbium	175,0 Lu 71 Lutécium
227 Ac 89 Actinium	232,0 Th 90 Thorium	231,0 Pa 91 Protactinium	238,0 U 92 Uranium	237 Np 93 Neptunium	242 Pu 94 Plutonium	243 Am 95 Americium	247 Cm 96 Curium	249 Bk 97 Berkélium	251 Cf 98 Californium	254 Es 99 Einsteinium	253 Fm 100 Fermium	256 Md 101 Mendelevium	254 No 102 Nobelium	257 Lw 103 Lawrencium

Actinides

Observons les étoiles

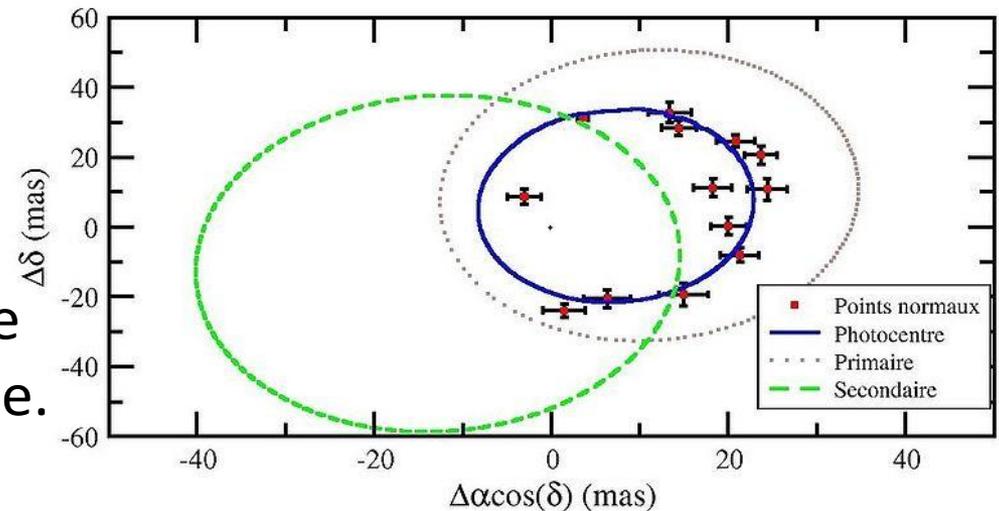
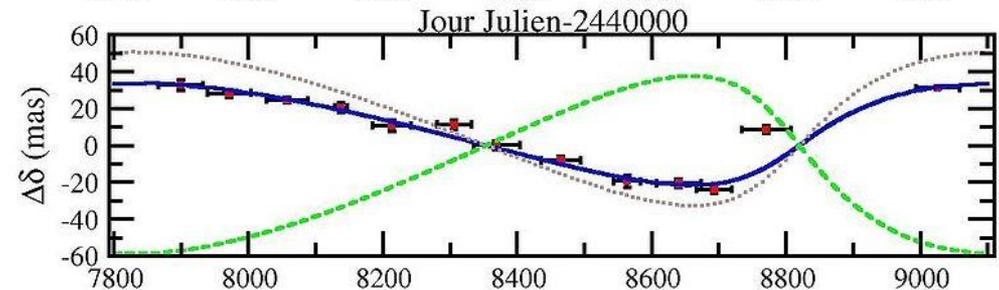
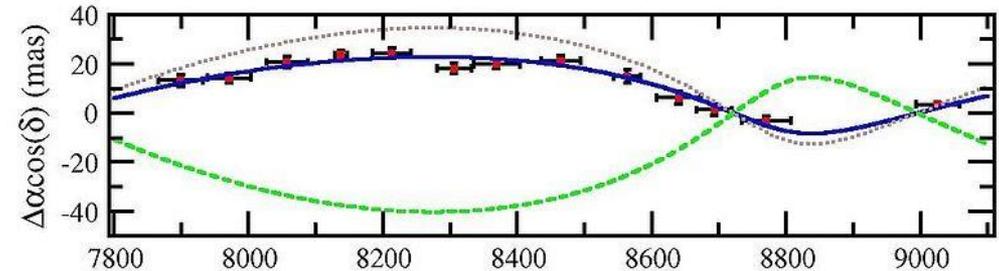
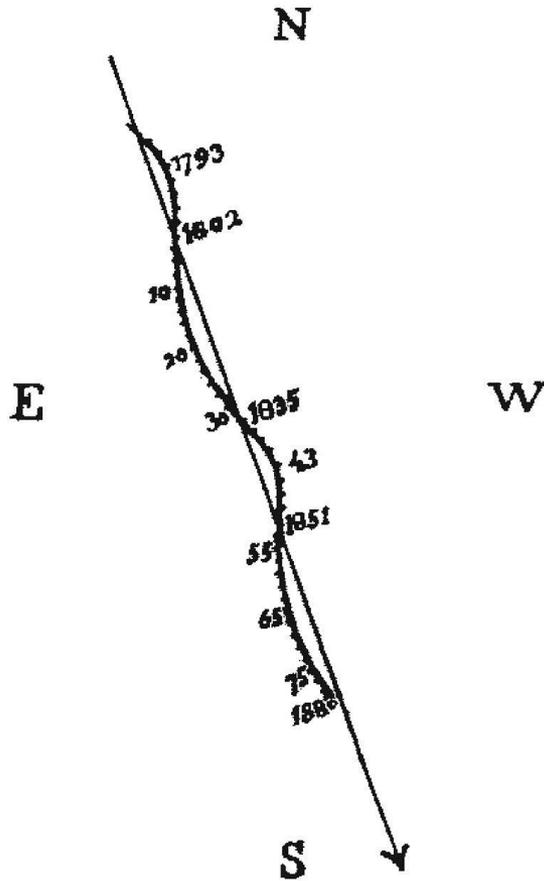
- Astrométrie: positions, mouvements propres, distances...
- Photométrie: luminosité, variabilité
- Spectroscopie: composition chimique, T_{eff} , vitesses radiales, $V \sin i$,...
- Imagerie HRA: rayons, déformation, motifs de surface,...
- ...
- Sismologie: sonder l'intérieur des étoiles...

Astrométrie

- Mesurer les positions des étoiles pour connaître leur mouvement propre et l'existence d'un compagnon
- Se servir des étoiles comme système de référence

Détecter les binaires par l'astrométrie

HIP 61100



Le photocentre de l'étoile double oscille autour du centre de masse.

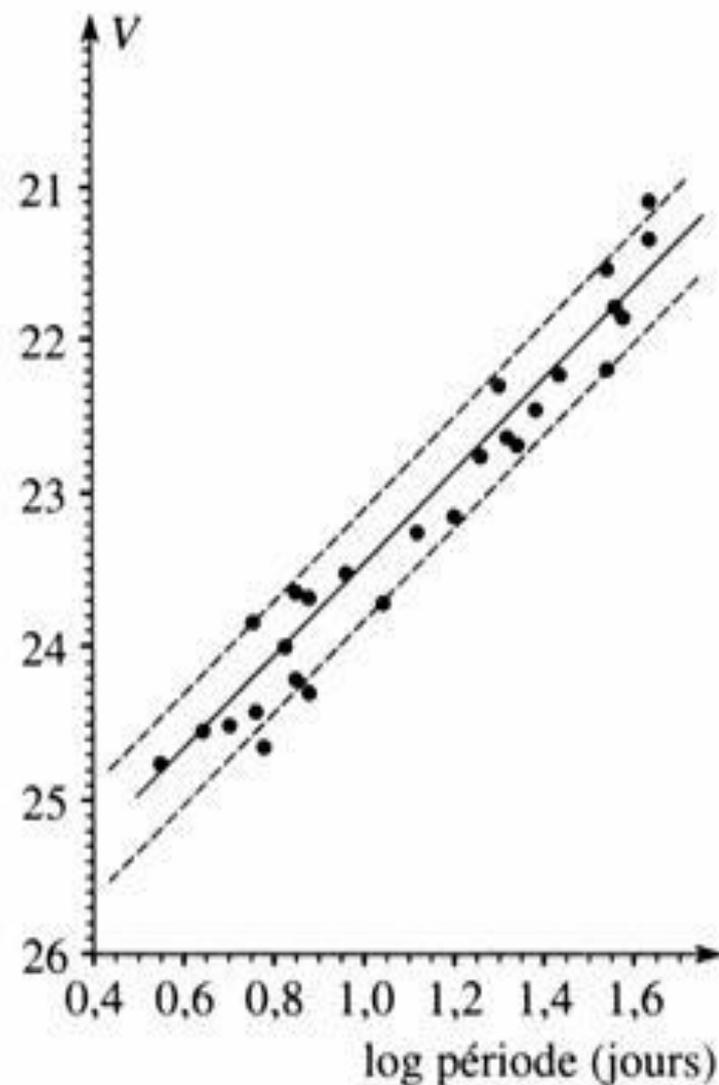
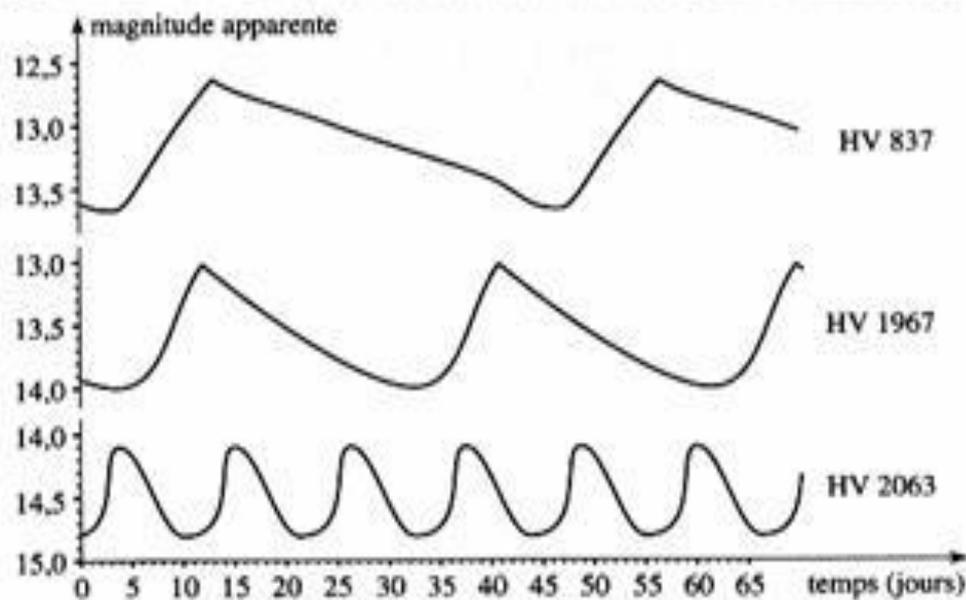
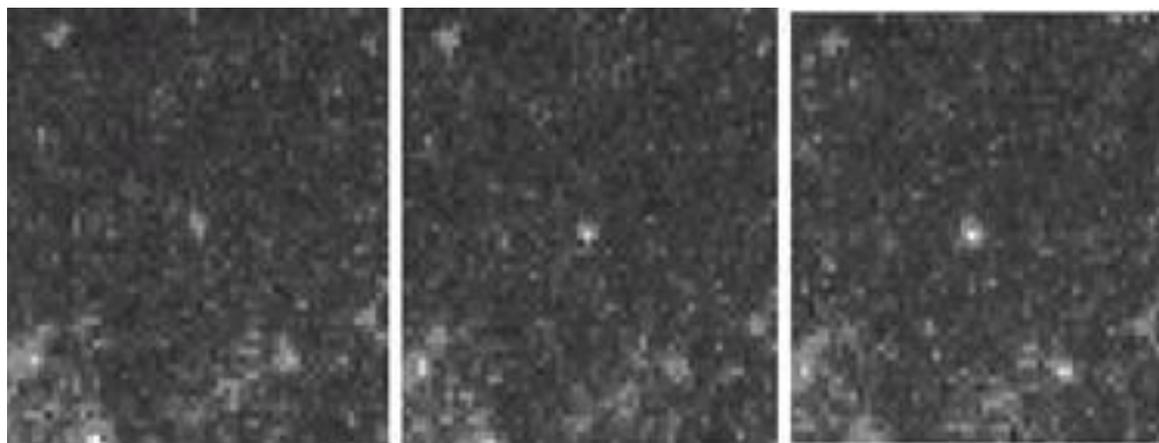
Photométrie

- Mesurer le flux lumineux des étoiles au cours du temps pour détecter sa variabilité
- Pourquoi les étoiles sont-elles variables?

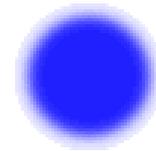
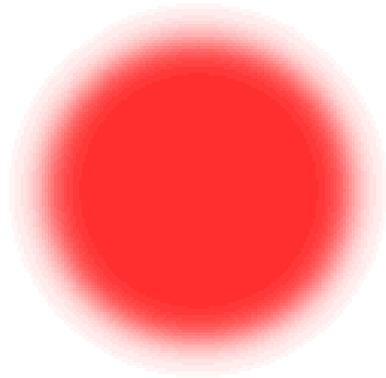
Photométrie: les étoiles variables

- Les variables pulsantes ont une variation de volume qui entraîne une variation de luminosité
- Les variables par rotation présentent des taches claires ou sombres
- Les variables éruptives ont des modifications périodiques d'activité dans la chromosphère
- Les variables cataclysmiques sont le fait de systèmes binaires avec échange de matière

Des variables typiques: les Céphéïdes



Détecter les binaires par la photométrie



Fonctionnement, température, nature et taille des étoiles

- Comment faire ces mesures?
- Comment modéliser le fonctionnement d'une étoile?

Spectroscopie

- Mesurer les « couleurs » des étoiles pour connaître leur composition et leur température

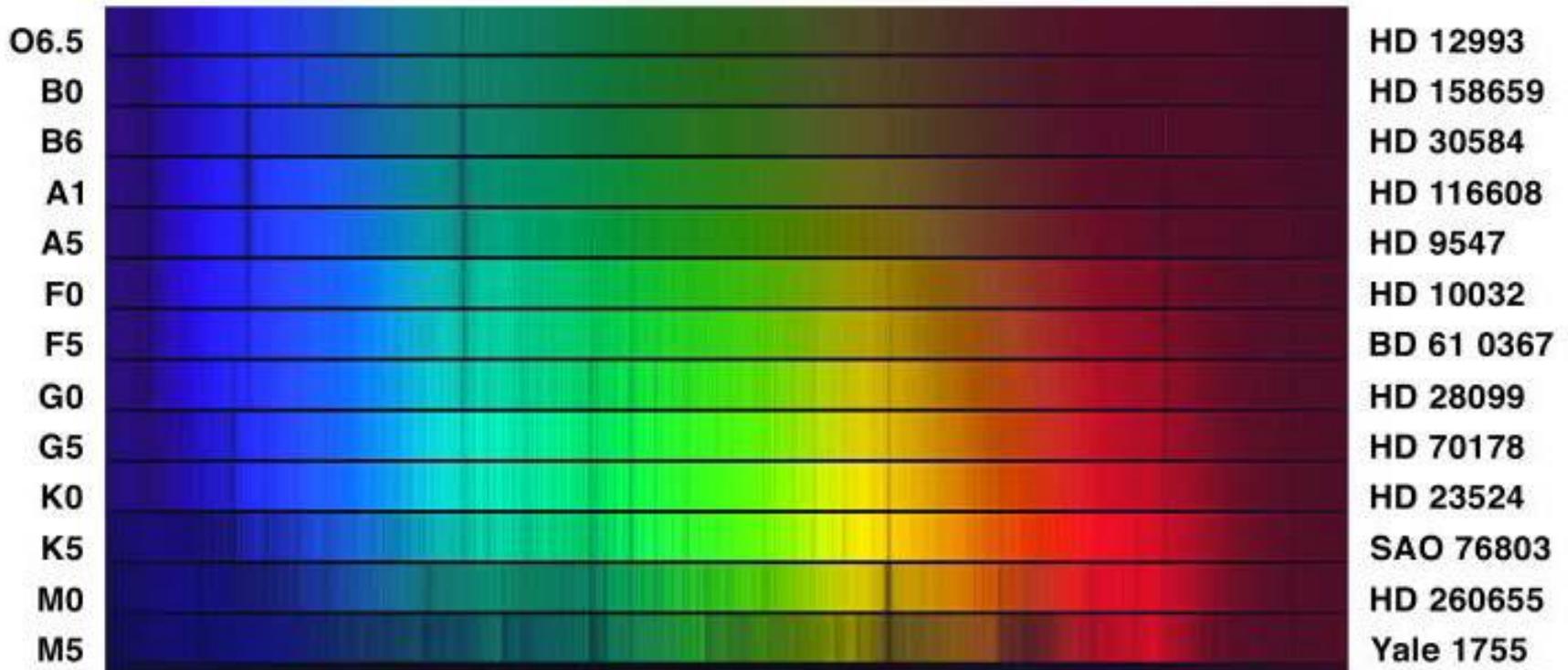
Spectroscopie: la couleur des étoiles

- Les étoiles paraissent colorées: elles ne sont pas toutes identiques au Soleil et leur température les fait briller dans des longueurs d'onde variées.
- Chaque étoile émet dans la plupart des longueurs d'onde avec un pic dans une couleur particulière.
- Certaines couleurs sont absorbées par des composants de l'étoile.

Et la couleur ?

indices photométriques/spectroscopie

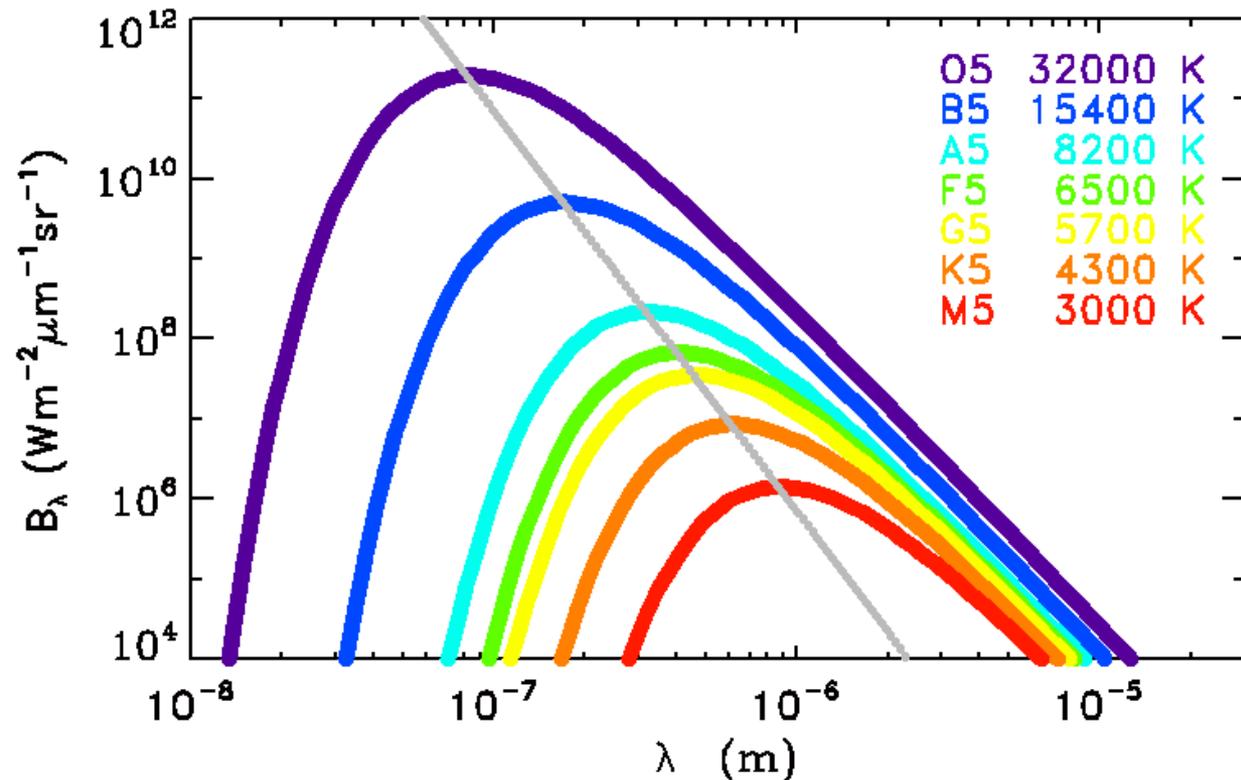
Spectroscopie: que voit-on? Le spectre des étoiles montre une distribution spectrale d'intensité assez large, qui varie d'une étoile à l'autre



Et la couleur ?

indices photométriques/spectroscopie

L'enveloppe de cette distribution peut être interprétée comme le spectre de rayonnement d'un corps noir de température caractéristique T_{eff} (température effective de l'étoile)

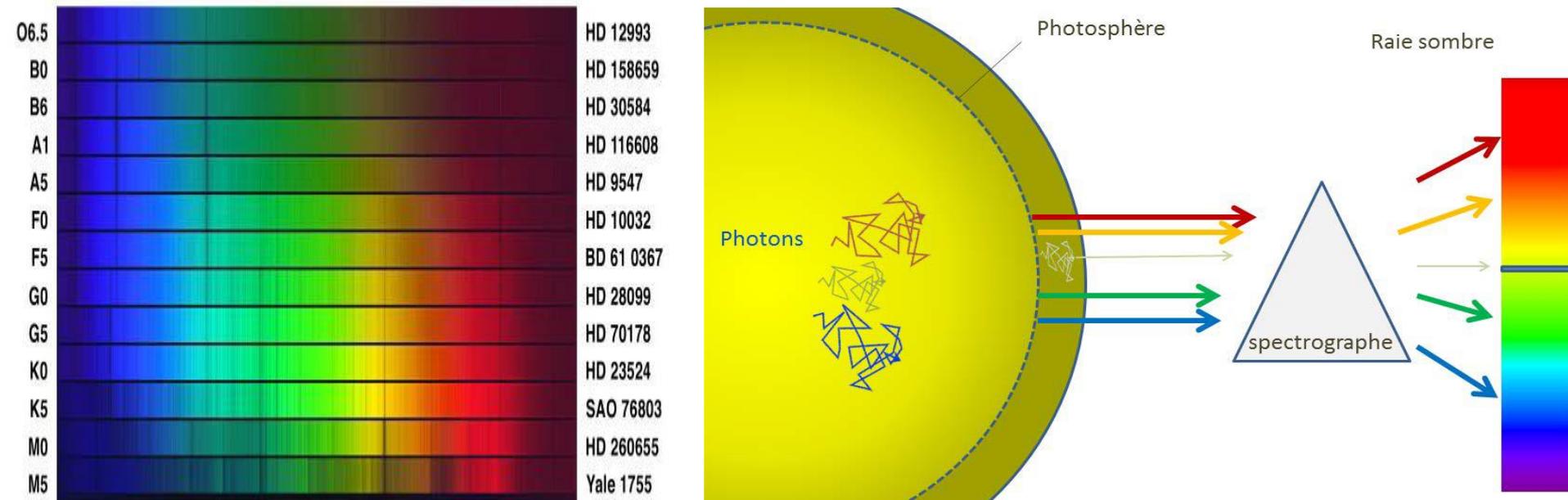


Et la couleur ?

indices photométriques/spectroscopie

Les spectres stellaires montrent des raies d'absorption

- Ces raies sont causées par l'absorption du rayonnement par les couches stellaires superficielles (plus froides)



L'analyse spectroscopique de ces raies est très riche en information sur la composition des étoiles

Et la couleur ?

indices photométriques/spectroscopie

UBVRI (Système photométrique de Johnson)

- B-V (mB -mV) constitue un indice de couleur
- L'indice B-V est utilisé comme indicateur de température efficace T_{eff}

Classification des étoiles: les classes spectrales

Classe	température	couleur
O	28000 - 50000 °C	bleue
B	9600 - 28000 °C	bleue - blanche
A	7100 - 9600 °C	blanche
F	5700 - 7100 °C	jaune - blanche
G	4600 - 5700 °C	jaune comme le Soleil
K	3200 - 4600 °C	jaune - orange
M	1700 - 3200 °C	rouge



le diagramme HR – une synthèse observationnelle et un outil précieux pour la compréhension des étoiles

Diagramme de Hertzsprung et Russell: du nom des deux physiciens qui ont eu l'idée de représenter les étoiles en fonction de B-V (indicateur de T_{eff}) et de L (luminosité = puissance rayonnée)

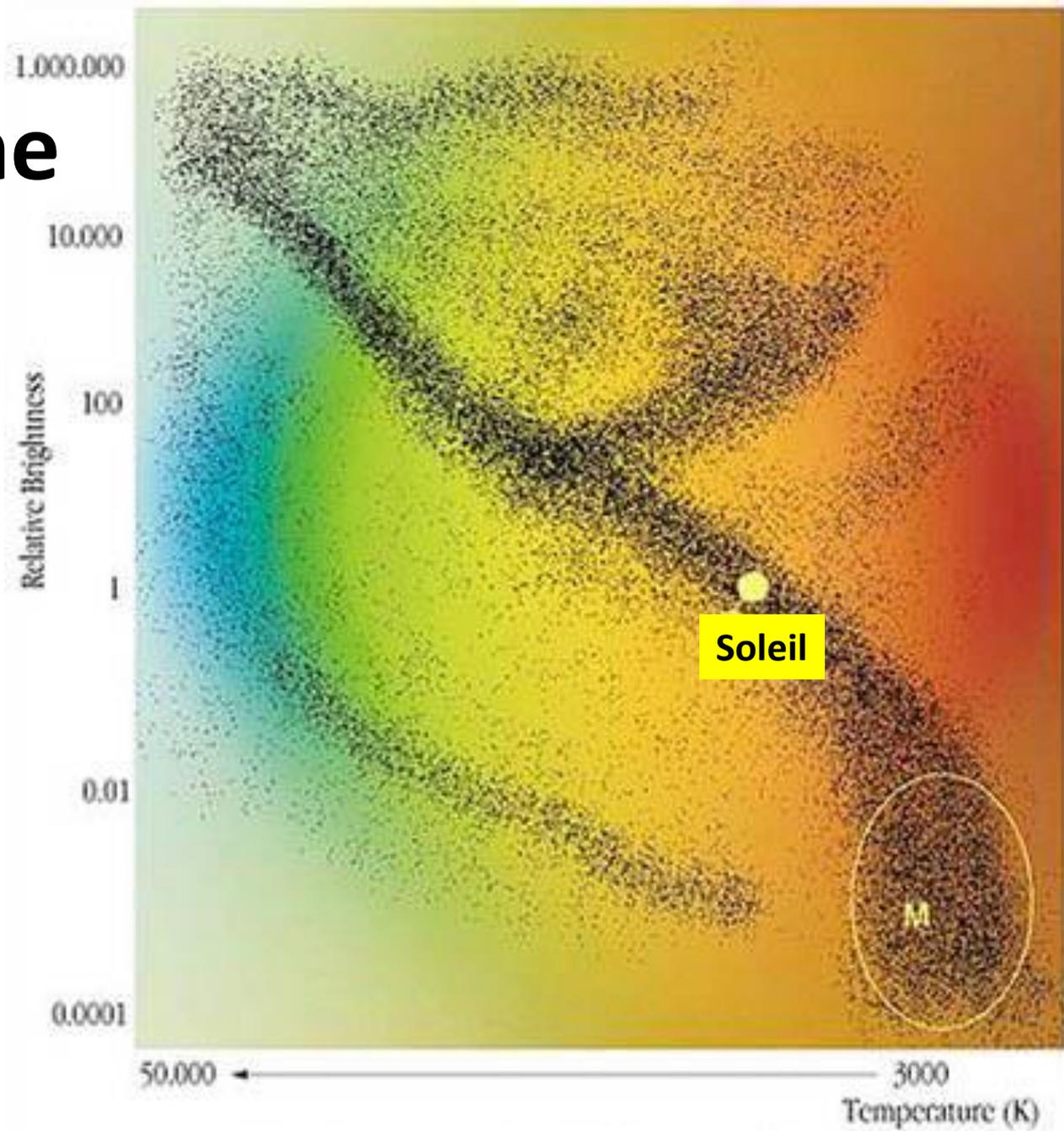
La relation entre couleur et température

$$\lambda \times T = 3000$$

Longueur d'onde en Angströms

Température en Kelvins

le diagramme HR

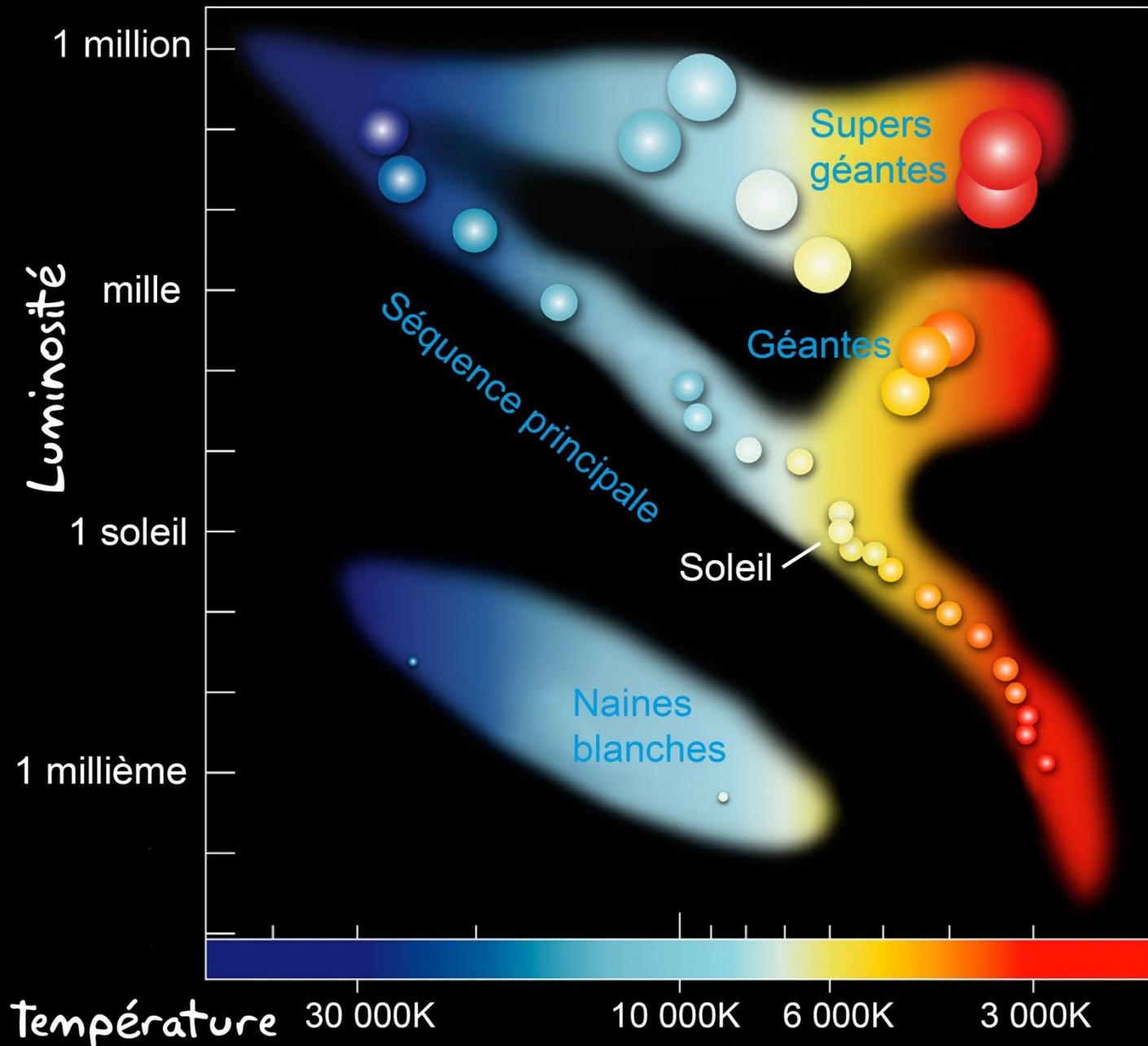


le diagramme HR

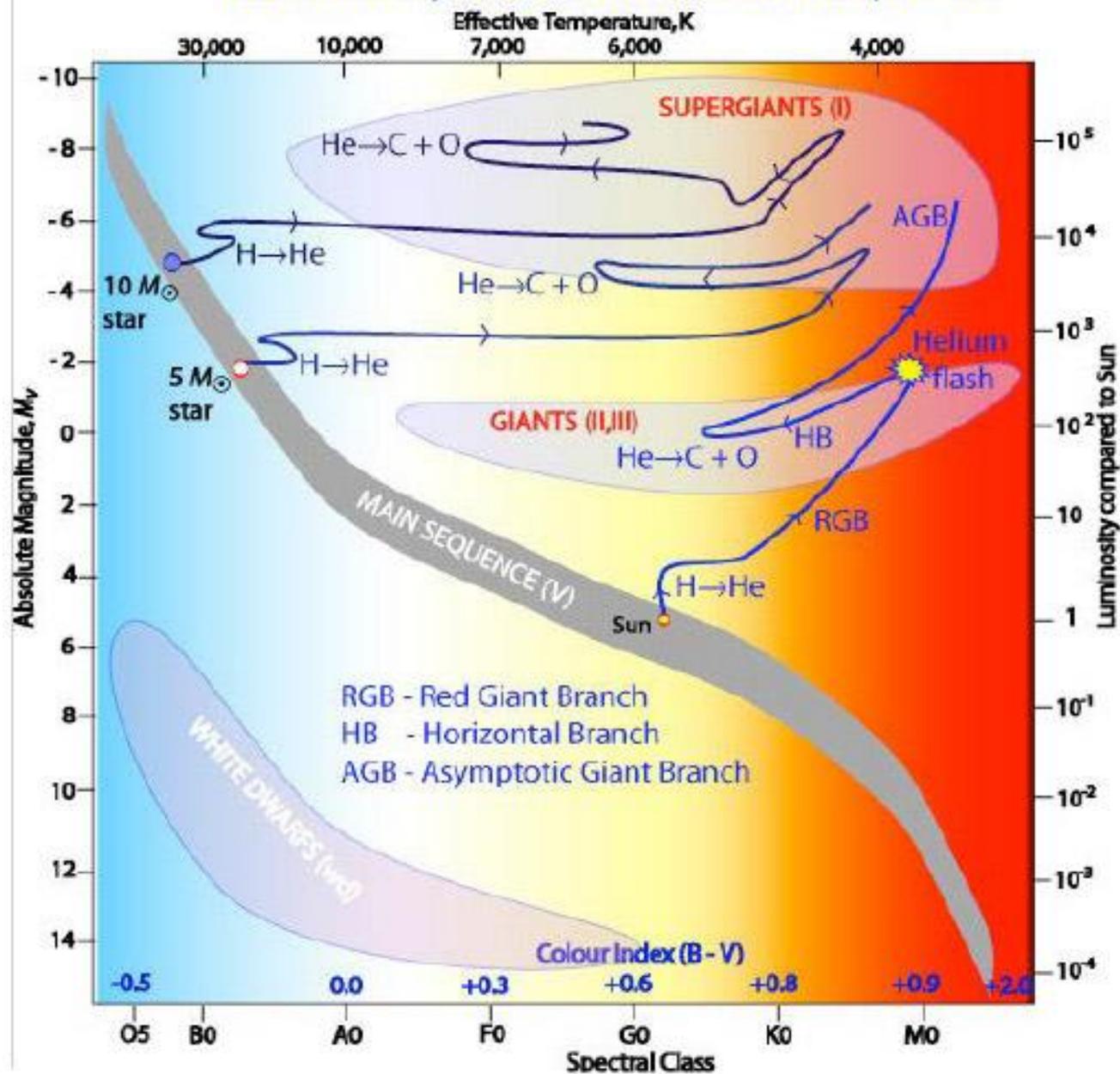
Les étoiles se regroupent dans des structures

- La gamme d'indice B-V correspond à des $\sim 3000\text{K} < T_{\text{eff}} < 30000\text{K}$
- la gamme de luminosité L couvre 8 ou 9 ordres de grandeur... les étoiles chaudes ici ont des luminosités plus de 10000 fois supérieures à celle du Soleil !!!
- grâce à la loi de Stefan-Boltzmann on peut déterminer le rayon. On obtient des rayons qui varient d'un centième à plusieurs centaines de rayons solaires.

La vie des étoiles

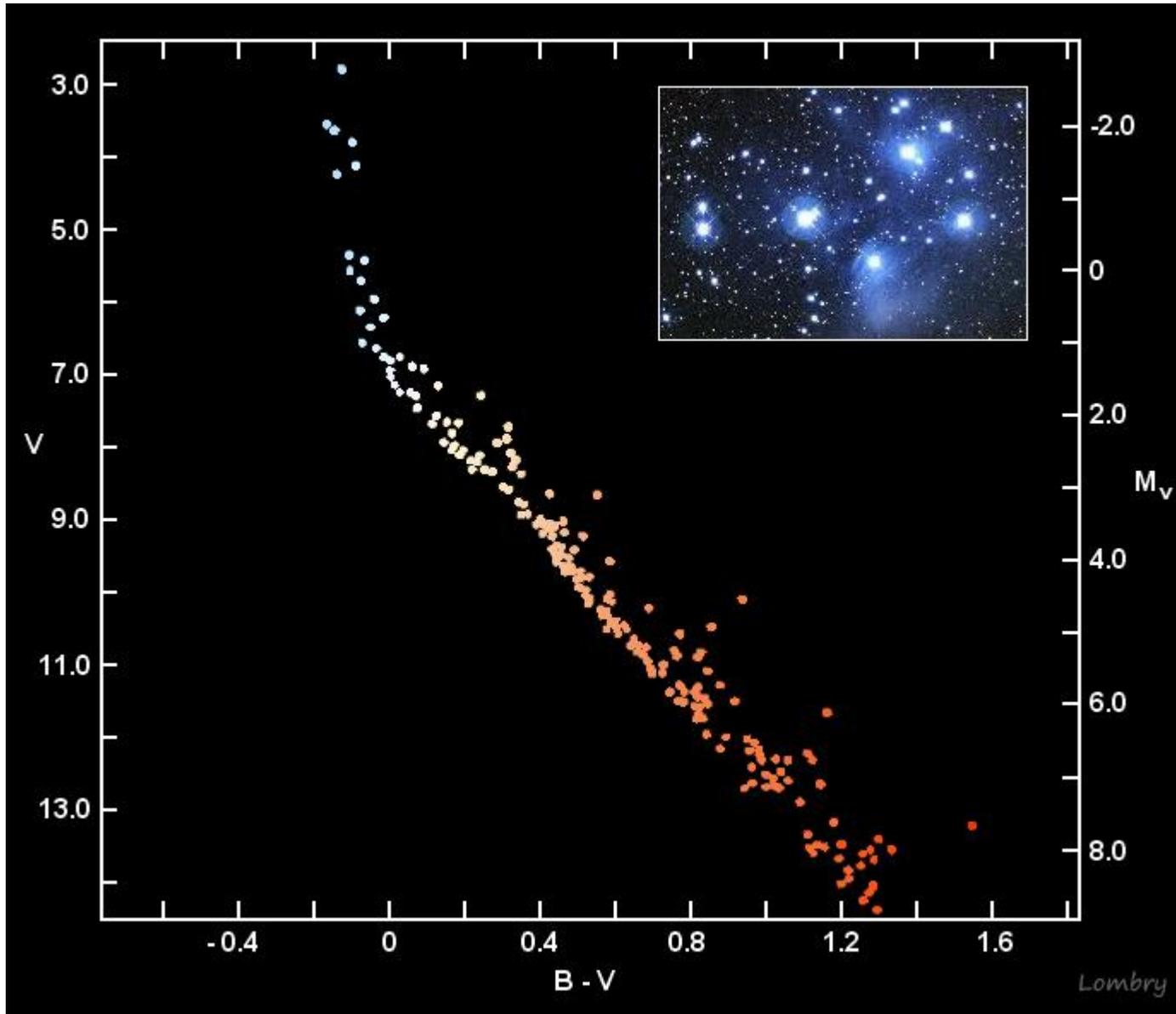


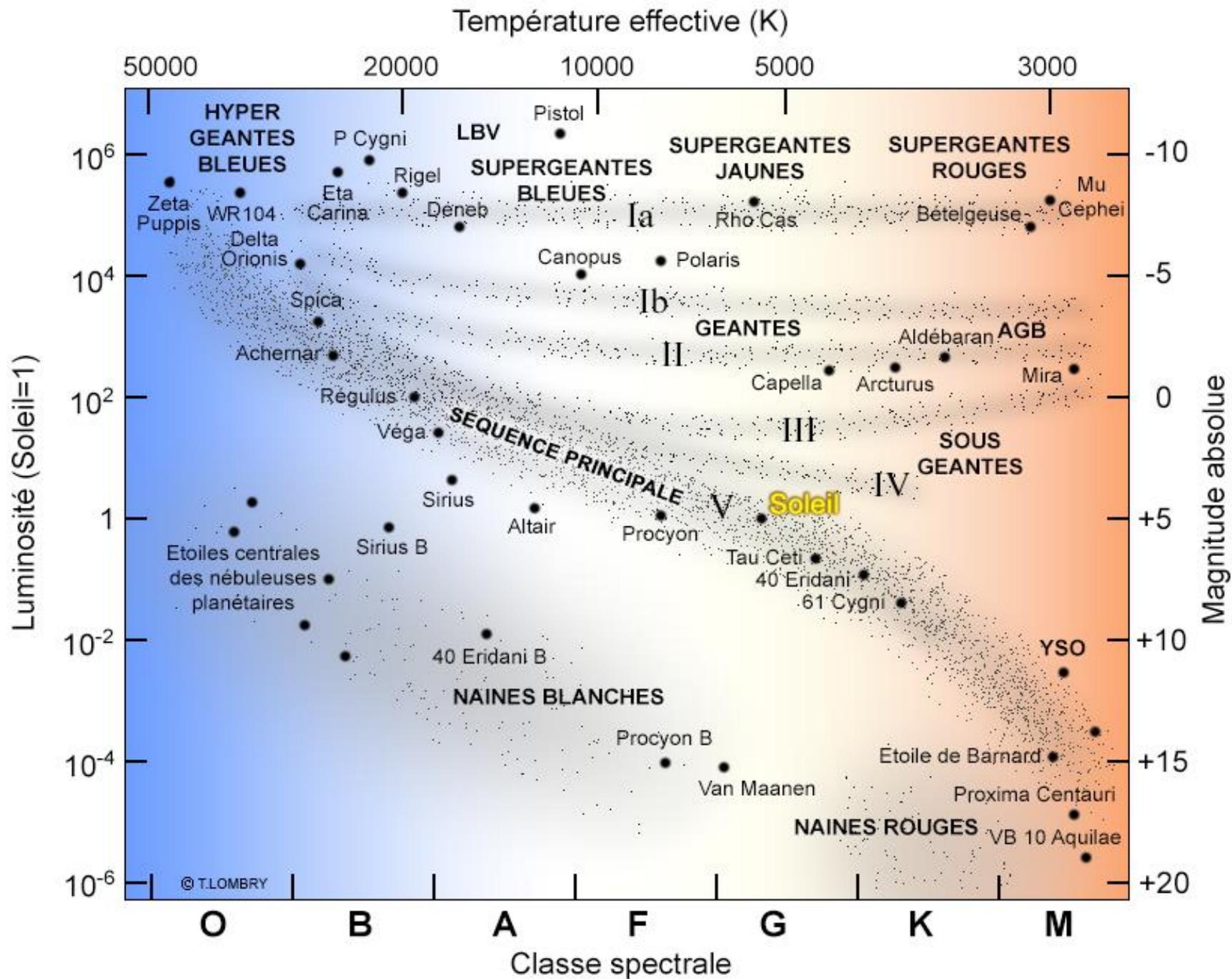
Evolutionary Tracks off the Main Sequence



Les étoiles évoluent sur le diagramme en fonction de leur âge et de leur masse.

Le diagramme HR de l'amas des Pléiades: étoiles de même âge mais tailles différentes

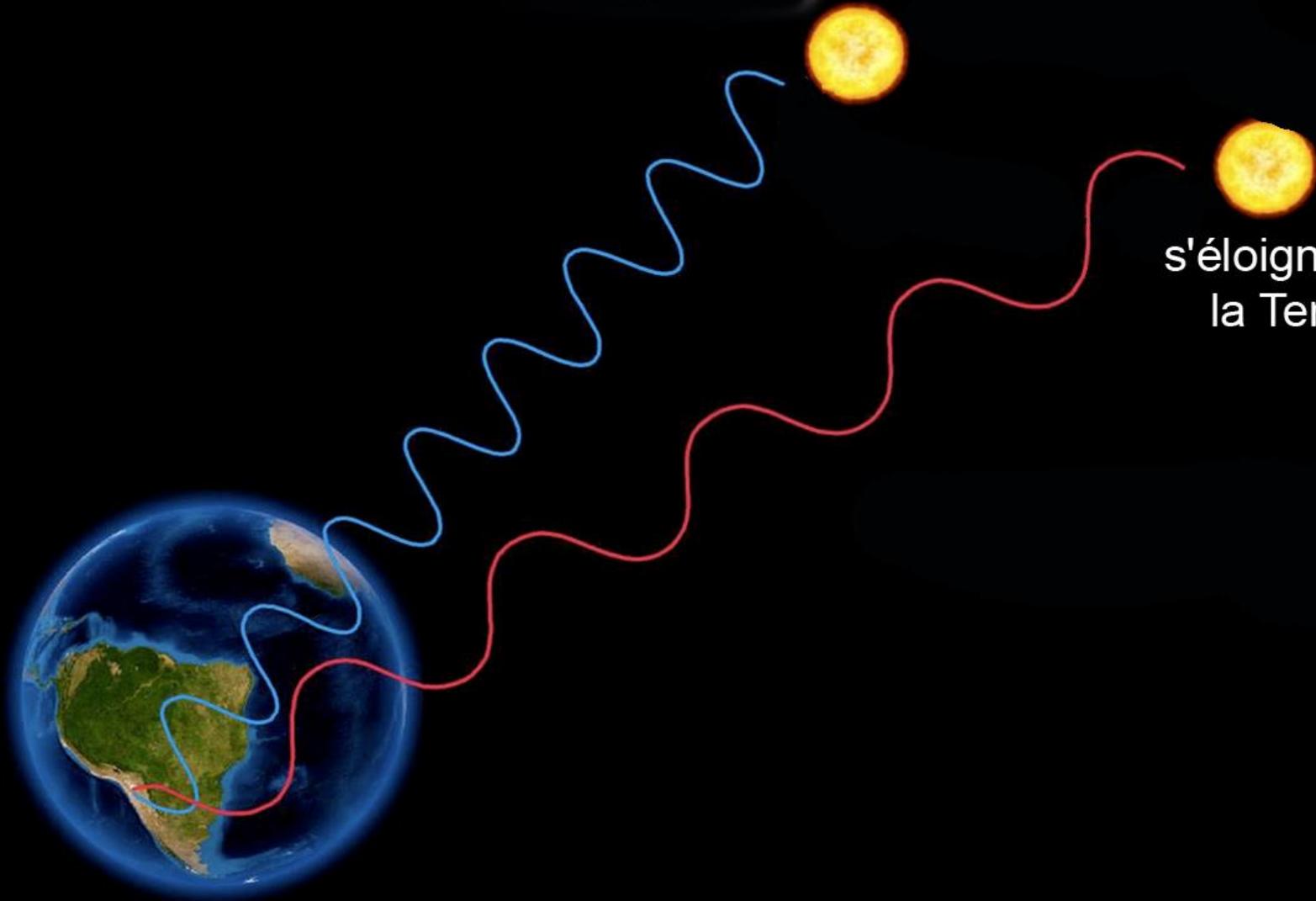




La vitesse radiale des étoiles

se rapproche de la Terre

s'éloigne de
la Terre



En résumé

- les étoiles émettent de la lumière car leurs enveloppes sont chaudes [$\sim 3000\text{K}, 50000\text{K}$]
- la photométrie nous renseigne sur leur luminosité et leur T_{eff} (via les indices de couleur)
- la spectroscopie nous renseigne sur leur composition chimique, leur T_{eff} , leur gravité de surface ($\log g$), leur mouvement radial (V_{rad}) en complément de leur mouvement propre (angulaire), leur vitesse de rotation projetée ($V \sin i$)...
- on ne mesure directement des masses que dans certains cas d'étoiles binaires...

Modèles et codes d'évolution stellaires

- La compréhension de la structure des étoiles repose sur: Les propriétés observationnelles telles que celles décrites précédemment)
- Des modélisation théoriques d'étoiles (analytiques ou numériques)
- Des connaissances théoriques des lois fondamentales de la physique et des propriétés de la matière et de son interaction avec la lumière.
- Les modèles permettent d'extrapoler vers l'intérieur les caractéristiques physiques observées à la surface des étoiles.

Le fonctionnement des étoiles

- La majeure partie de sa vie, une étoile est en équilibre hydrostatique: *pression compense gravité*
- La chaleur générée au cœur par diverses réactions de fusion nucléaires est transportée à travers l'étoile (par rayonnement ou convection) et rayonnée en surface
- La séquence évolutive d'une étoile est faite d'un enchainement de phases (de plus en plus courtes) où l'énergie nucléaire est produite par fusion d'éléments de plus en plus lourds (jusqu'au fer Fe au cœur puis en couche).

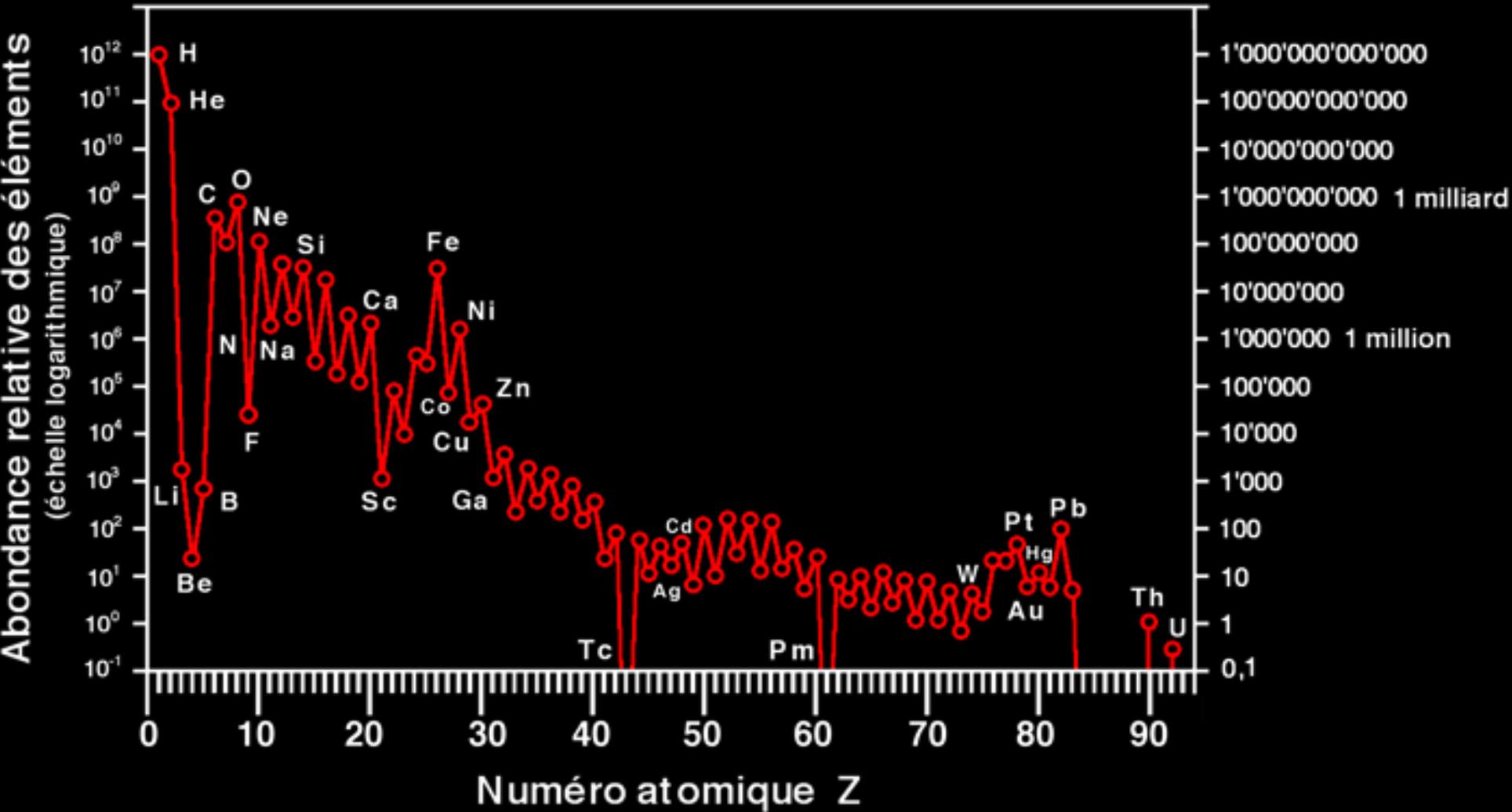
Le creuset des éléments naturels

1 H Hydrogène																	2 He Hélium																														
3 Li Lithium	4 Be Béryllium											5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène	9 F Fluor	10 Ne Néon																														
11 Na Sodium	12 Mg Magnésium											13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon																														
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton																														
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon																														
55 Cs Césium	56 Ba Baryum	* *	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantale	74 W Tungstène	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astaté	86 Rn Radon																														
87 Fr Francium	88 Ra Radium	** **	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Uub Ununbium	113 Uut Ununtrium	114 Uuq Ununquadium	115 Uup Ununpentium	116 Uuh Ununhexium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium																														
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>57 La Lanthane</td> <td>58 Ce Cérium</td> <td>59 Pr Praséodyme</td> <td>60 Nd Néodyme</td> <td>61 Pm Prométhium</td> <td>62 Sm Samarium</td> <td>63 Eu Europium</td> <td>64 Gd Gadolinium</td> <td>65 Tb Terbium</td> <td>66 Dy Dysprosium</td> <td>67 Ho Holmium</td> <td>68 Er Erbium</td> <td>69 Tm Thulium</td> <td>70 Yb Ytterbium</td> <td>71 Lu Lutécium</td> </tr> <tr> <td>89 Ac Actinium</td> <td>90 Th Thorium</td> <td>91 Pa Protactinium</td> <td>92 U Uranium</td> <td>93 Np Neptunium</td> <td>94 Pu Plutonium</td> <td>95 Am Américium</td> <td>96 Cm Curium</td> <td>97 Bk Berkélium</td> <td>98 Cf Californium</td> <td>99 Es Einsteinium</td> <td>100 Fm Fermium</td> <td>101 Md Mendélévium</td> <td>102 No Nobélium</td> <td>103 Lr Lawrencium</td> </tr> </tbody> </table>																		57 La Lanthane	58 Ce Cérium	59 Pr Praséodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutécium	89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Américium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendélévium	102 No Nobélium	103 Lr Lawrencium
57 La Lanthane	58 Ce Cérium	59 Pr Praséodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutécium																																	
89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Américium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendélévium	102 No Nobélium	103 Lr Lawrencium																																	

Abondance relative des éléments dans l'univers

Atome	Abréviation	Quantité rencontrée par 1 000 000 atomes H	Proportion (%)
Hydrogène	H	1 000 000	92,47
Hélium	He	80 000	7,40
Oxygène	O	700	0,065
Carbone	C	400	0,037
Azote	N	100	0,0092
Néon	Ne	100	0,0092
Silicium	Si	40	0,0037
Fer	Fe	30	0,0028
Magnésium	Mg	30	0,0028
Soufre	S	20	0,0018
Aluminium	Al	3	0,0003
Sodium	Na	2	0,0002
Nickel	Ni	2	0,0002
Calcium	Ca	2	0,0002
Argon	Ar	1	0,0001
Reste		2	0,0002

Abondance relative des éléments



Évolution des étoiles

Nuages de gaz (hydrogène)

effondrement gravitationnel=étoile nouvelle

Hydrogène → hélium

Épuisement du carburant

Augmentation de la température

Nucléosynthèse → fer

Éjection de matière, perte de masse

1) Masse solaire (90% des étoiles)

Géante rouge

Naine blanche (densité 1 tonne/cm³)

Naine brune

2) Jusqu'à deux masses solaires

Géante rouge

Étoile à neutron (diamètre 1,5km,
densité 1 million de tonnes/mm³)

Pulsar

3) Jusqu'à trois masses solaires

Supernova

Nucléosynthèse dans le MIS →

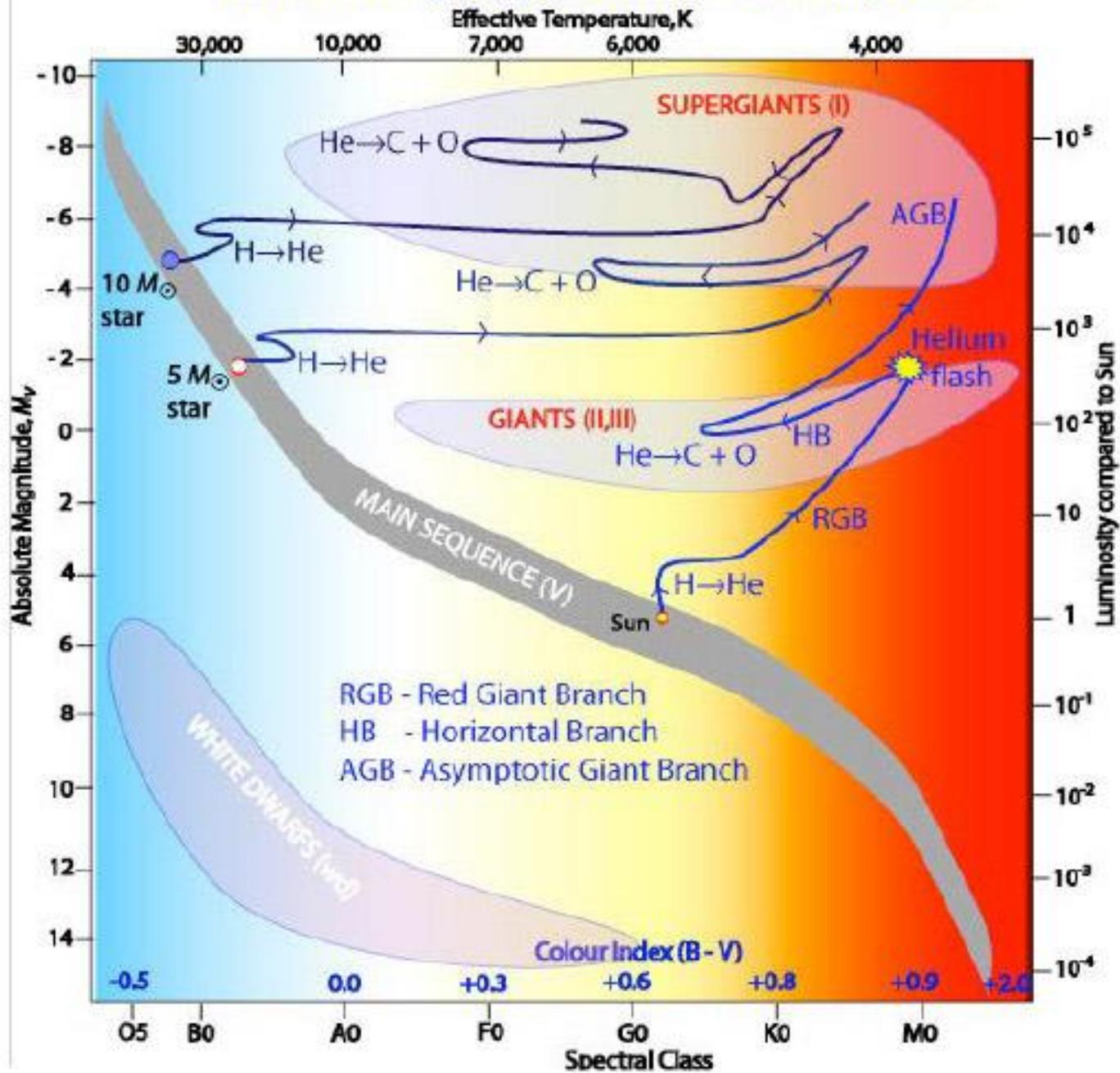
éléments lourds

4) Plus de trois masses solaires

Trou noir

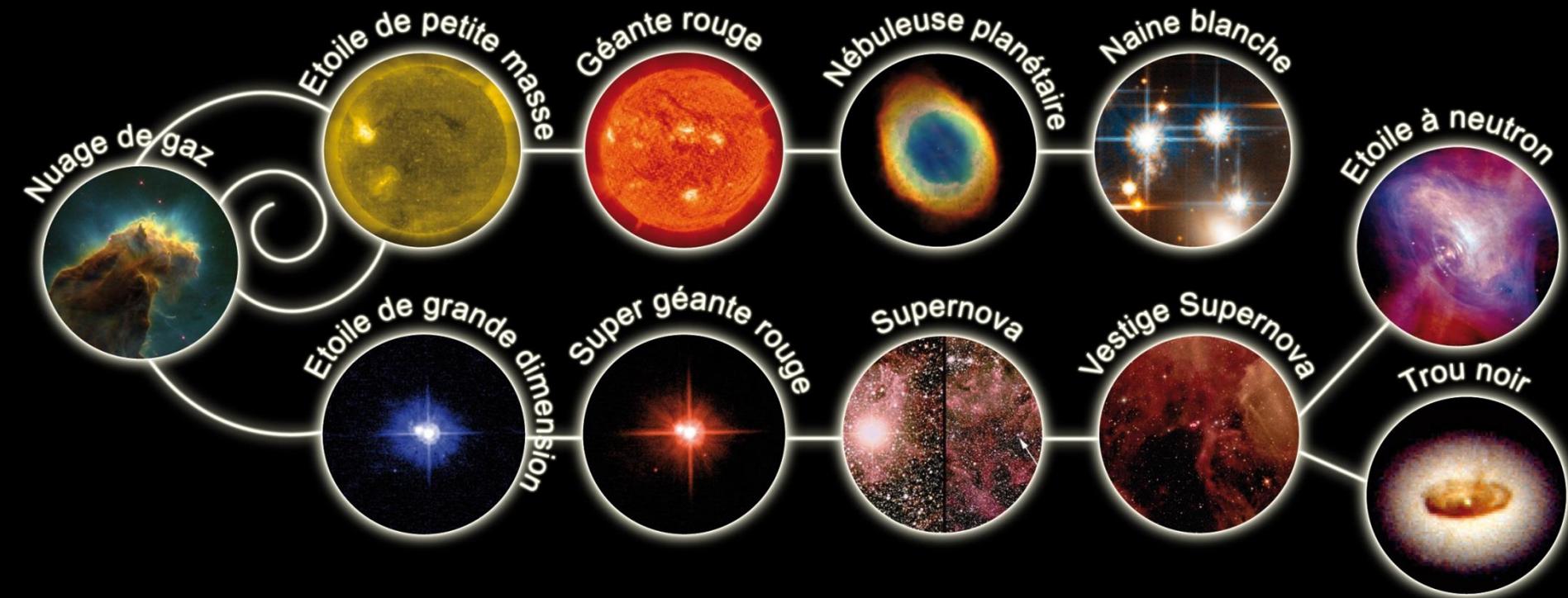
Masse initiale (en unité de masse solaire)	Fusion	Evolution	Stade final
< 0.08	D	Naine brune, et non étoile	Naine brune
0.08 - 0.5	H	Evolution très lente, sur une durée de vie supérieure à l'âge de l'Univers	Naine blanche d'hélium (?)
0.5 - 7	H, puis He	Fin en nébuleuse planétaire	Naine blanche C, O
8 - 25	H, puis He, puis C et O	Fusion de H sur la séquence principale puis fusion He, C, O... lors de la phase de supergéante rouge. Structure en couche avec un coeur de fer entouré d'éléments de plus en plus légers en train de fusionner	Supernova de type II, puis étoile à neutrons
25+	idem	idem	Supernova de type II, puis trou noir

Evolutionary Tracks off the Main Sequence



L'observation d'étoiles différentes

- Soit elles sont nées avec des masses différentes mais leur fonctionnement est identique
- Soit elles sont différentes car elles sont jeunes ou vieilles



Naines brunes

- Dans les années 90, des objets présentant une très faible luminosité et un indice de couleur très rouge ont été clairement identifiés comme naines brunes : objet de masse insuffisante pour amorcer la fusion de l'hydrogène. Les moyens observationnels actuels permettent de les détecter en grand nombre, par exemple dans un amas. Les modèles de structure interne montrent qu'ils présentent un rayon de l'ordre de celui de Jupiter, pour une température effective de 1000 à 1500 K pour les plus chauds.

L'hydrogène est épuisé

- En fin de séquence principale, la plupart des enveloppes stellaires autour du noyau ne sont pas convectives, mais radiatives : l'énergie est évacuée par les photons, sans transport de matière, donc sans mélange. Dès lors, il est inéluctable que, l'hydrogène central arrive à épuisement. L'étoile quitte la séquence principale.

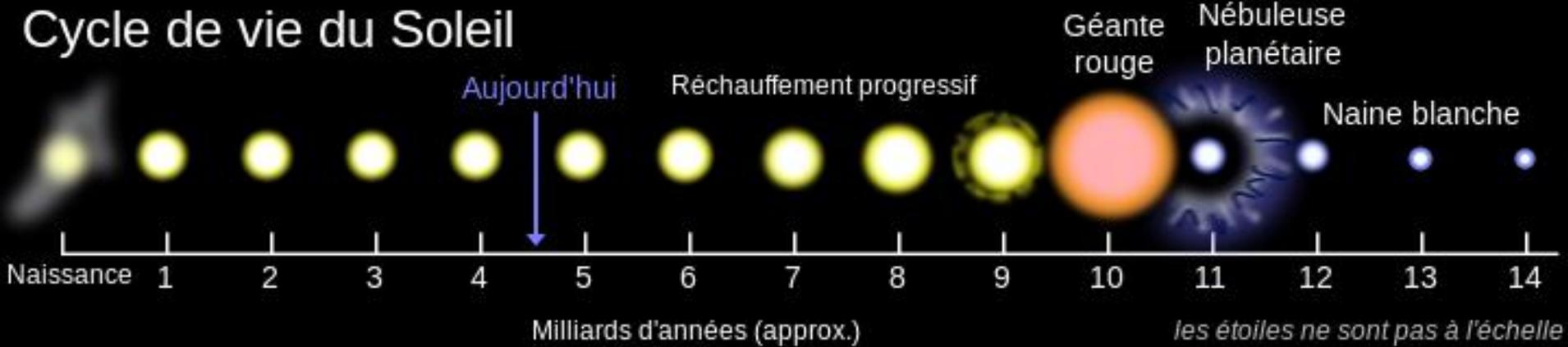
Les sous-géantes

- En fait durant cette phase, comme la suivante, l'hydrogène continue à brûler, mais en une fine couche autour du noyau d'hélium.
- L'étoile se déplace dans le diagramme HR vers les faibles températures. La baisse de température et l'augmentation du rayon se compensent approximativement : l'évolution a lieu à luminosité quasi constante. C'est la phase de sous-géante.
- La rupture de production d'énergie conduit à un déséquilibre de structure, et le noyau d'hélium se contracte pour tenter de retrouver un équilibre. En se contractant, il se réchauffe, et par réaction l'enveloppe extérieure s'étend, et bien sûr la détente s'accompagne d'un refroidissement.

Les branche des géantes rouges

- Les étoiles de masse comparable à celle du Soleil voient leur atmosphère se dilater de plusieurs ordres de grandeur (en réponse au cœur d'hélium inerte qui se ratatine, et toujours avec une couche d'hydrogène en fusion entre le cœur et l'enveloppe). La luminosité s'accroît considérablement : l'étoile parcourt la branche des géantes rouges .
- Durant cette phase, l'étoile redevient entièrement convective. C'est aussi une phase d'instabilité atmosphérique, s'accompagnant au sommet de la branche des géantes d'un fort taux d'éjection de masse. Cette perte de masse apparaît quand la gravité de surface de l'étoile est devenue très faible : les couches périphériques de l'enveloppe stellaire ne sont plus que très (trop) faiblement liées à l'étoile. L'étoile résiduelle a d'autant plus maigri qu'elle était peu massive au départ, ce qui conduit à des géantes rouges aussi peu massive 0.6 masse solaire après la perte de masse.
- Au sommet de la branche des étoiles, les étoiles ont un rayon typiquement entre 100 et 200 fois le rayon solaire, un cœur d'hélium de plus en plus dense et chaud, et une masse allégée.

Le cycle de vie du Soleil



Comment observer

Géante rouge

- Le stade de géante rouge est atteint par une étoile telle le Soleil en fin de vie. La contraction du noyau, à la recherche d'une source d'énergie autre que la fusion de l'hydrogène, s'accompagne de l'extension de l'enveloppe externe, et de vents stellaires, conduisant à l'apparition d'un nuage de poussières circumstellaires.

Supergéante rouge

- Les étoiles les plus massives atteignent le stade de supergéante rouge, telle **Bételgeuse**. Leur atmosphère, réagissant à la fusion des éléments de plus en plus lourds, atteint des tailles considérables, d'où leur dénomination

La fusion de l'hélium

- La contraction du noyau d'hélium conduit à son fort réchauffement. Dès , la fusion de l'hélium peut conduire au carbone. L'étoile, retrouvant une source d'énergie, retrouve donc une situation d'équilibre. L'apport d'énergie de fusion de l'hélium provoque la dilatation du cœur et l'effondrement de l'enveloppe.
- La fusion de l'hélium démarre dans des conditions différentes selon la masse de l'étoile. Une étoile peu massive présente un cœur dégénéré. Cette dégénérescence bloque la fusion de l'hélium, qui ne peut démarrer que dans des conditions brutales, le flash de l'hélium, dès lors qu'une température critique est atteinte. Les étoiles plus massives (de l'ordre de 2 fois la masse du Soleil) ont un cœur plus chaud, non dégénéré, et peuvent commencer la fusion de l'hélium graduellement.
- Les étoiles qui brûlent leur hélium central s'accumulent sur le *clump*, l'extrémité la plus froide de la branche horizontale des géantes.

La branche asymptotique des géantes rouges

- Lorsque l'hélium est épuisé dans le cœur, l'équilibre de l'étoile est perturbé. Sans source d'énergie interne, le cœur se contracte, et donc l'enveloppe recommence à s'étendre. Le mécanisme qui associe la contraction (dilatation) du cœur et la dilatation (contraction) conjointe de l'enveloppe est identique à celui à l'œuvre sur la branche des géantes.
- Ce mécanisme de miroir comporte trois ingrédients : un cœur qui produit peu ou pas de l'énergie, une enveloppe essentiellement convective, et à l'interface une couche d'hydrogène en fusion. Si le cœur se contracte, la couche d'hydrogène voit sa température augmenter, et ceci provoque la dilation de l'enveloppe, et réciproquement.
- Dans le diagramme HR, la branche asymptotique est parallèle à la branche des géantes rouges, un peu plus chaude. L'avenir de l'étoile dépend de sa masse. La perte de masse est aussi cruciale pour cette phase d'évolution.
- La perte de masse pouvant durer jusqu'à un million d'années, ces étoiles de la branche asymptotique s'entourent progressivement d'une enveloppe qui peut atteindre plusieurs masses solaires, et des dimensions importantes, de l'ordre d'une année de lumière, contribuant ainsi à l'enrichissement du milieu interstellaire, avec des éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium.

Fusion des éléments lourds

- Si la masse de l'étoile (plus précisément, de ce qu'il en reste, car la perte de masse est importante au sommet de la branche asymptotique) est assez importante, le cœur pourra se contracter, à l'épuisement des éléments les plus légers, pour démarrer la fusion des éléments plus lourds.
- La fusion du carbone ensuite conduit au néon, à l'oxygène. Tous les éléments jusqu'au fer peuvent ainsi être produits par fusion dans les étoiles les plus massives: une étoile massive est une usine à éléments lourds.

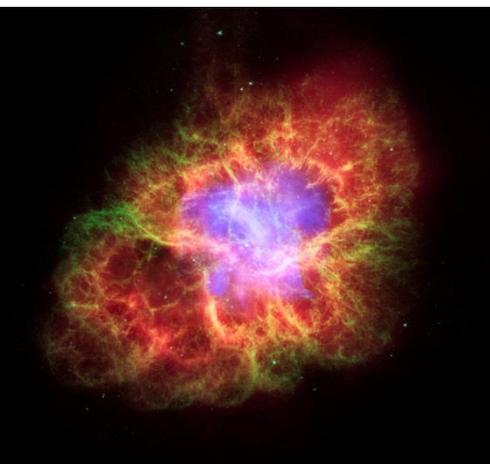
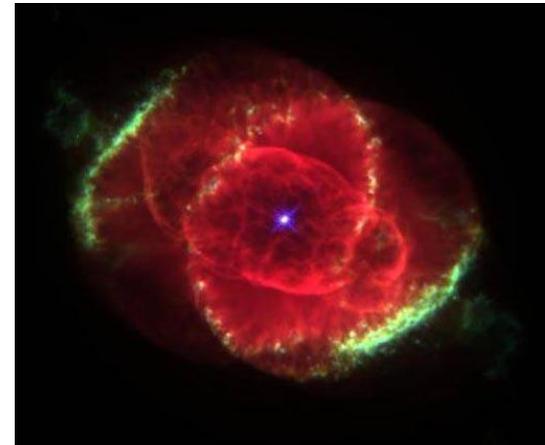
Nébuleuse planétaire

- Si la masse de l'étoile n'est pas trop importante, arrive un moment où la température centrale limitée ne permet plus de trouver de nouvelle source d'énergie. Seule subsiste la pression de dégénérescence des électrons pour soutenir l'étoile. Ses régions internes se contractent jusqu'à former une ***naine blanche***, tandis que les couches externes expulsées par la pression de radiation donnent naissance à une **nébuleuse planétaire**.

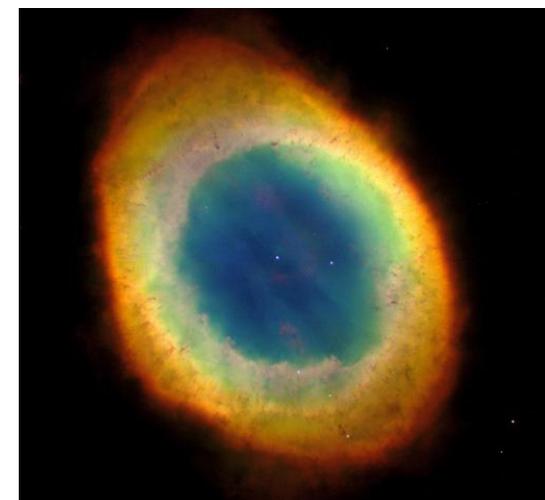
Comment observer

Nébuleuse planétaire

- Une nébuleuse planétaire n'a rien à voir avec une planète, sinon qu'historiquement ce nom a été donné par confusion observationnelle due à un manque de résolution angulaire.
- Une étoile de masse inférieure à 1.5 masse solaire ayant fini de consommer tout son hydrogène, puis son hélium, voit son cœur s'effondrer et se transforme en naine blanche. Les couches externes, expulsées par la pression de radiation, s'étendent autour de l'étoile à une vitesse d'expansion de plusieurs dizaines de kilomètres par seconde. Cette région est ionisée sous l'action des photons ultraviolets émis par l'étoile devenue très chaude ().



Nébuleuses planétaires



Les trous noirs

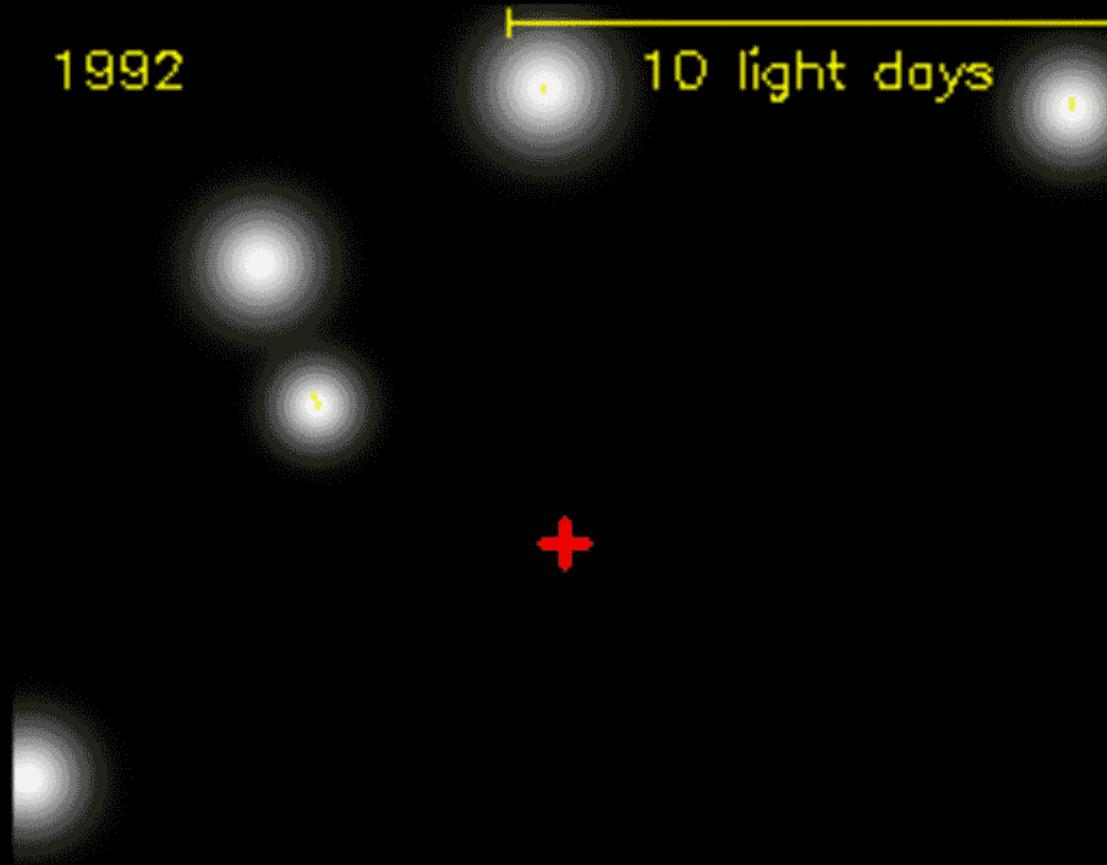
Rayon de Schwarzschild

- Le rayon d'une étoile à neutrons diminuant avec la masse, il s'ensuit une masse volumique et une vitesse de libération énormes. La limite correspond au rayon dit de Schwarzschild.
- Le stade de trou noir est atteint : le rayonnement est piégé par le champ gravitationnel. Un trou noir se signale alors par le formidable gradient de champ gravitationnel qu'il induit dans son entourage.

Masse d'un trou noir

- Pour arriver au stage de trou noir stellaire, une étoile doit au-moins posséder un noyau de masse centrale supérieure à 3 masses solaires. Ceci correspond à une masse progénitrice initialement bien plus élevée (>8 masses solaires), mais diminuée des pertes par vent stellaire.

Observer un trou noir



Etoile à neutrons

- Un objet simultanément très chaud (plusieurs centaines de milliers de Kelvin, soit bien plus qu'une étoile de la séquence principale) et très peu lumineux ne peut être, d'après la loi de rayonnement du corps noir, qu'extrêmement petit. C'est ainsi qu'ont été identifiées les étoiles à neutrons, rayonnant l'essentiel de leur énergie dans les domaines X et gamma.

Pulsars

- Un **pulsar** (de l'anglais « pulsating radio source ») correspond à une étoile à neutrons dont on observe le rayonnement électromagnétique modulé par la rotation rapide. La rapidité de la période de rotation observée provient du très petit rayon de l'étoile à neutrons.

Synthèse des éléments lourds

Les hautes températures rencontrées durant les phases énergétiques de la fin de vie des étoiles les plus massives permettent la fusion des éléments jusqu'au fer. Ainsi, la synthèse triple conduit, à partir de 3 noyaux d'hélium, à un noyau de carbone.

La température d'ignition augmente avec le nombre de charge des réactifs de la fusion. En revanche, les réactions sont de moins en moins exothermiques, jusqu'au fer.

Les étapes de fusion sont de plus en plus courtes, et à forte température.

Etapas			
Etape	Température (K)	Masse volumique (kg/m³)	Durée
Fusion H	4 · 10 ⁷	5000	7 · 10 ⁶ ans
Fusion He	2 · 10 ⁸	7 · 10 ⁵	5 · 10 ⁵ ans
Fusion C	6 · 10 ⁸	2 · 10 ⁸	600 ans
Fusion O	1.5 · 10 ⁹	10 ¹⁰	6 mois
Fusion Si	2.7 · 10 ⁹	3 · 10 ¹⁰	1 jour
Effondrement du cœur	5.4 · 10 ⁹	3 · 10 ¹²	1/4 s

La limite du fer

Au delà du fer ($Z = 26$, $A = 56$), le bilan des énergies de liaison entre nucléons est défavorable : d'exothermique, la fusion devient endothermique. La forte stabilité du noyau du fer conduit à son pic d'abondance.

Les éléments plus lourds que le fer résultent de phénomène d'*addition de neutrons*, transmutant des noyaux déjà massifs en éléments encore plus massifs (plomb, or, jusqu'à l'uranium). La lenteur du processus, et les conditions thermodynamiques défavorables, expliquent la faible abondance relative de ces éléments plus lourds que le fer.

Poussières d'étoiles

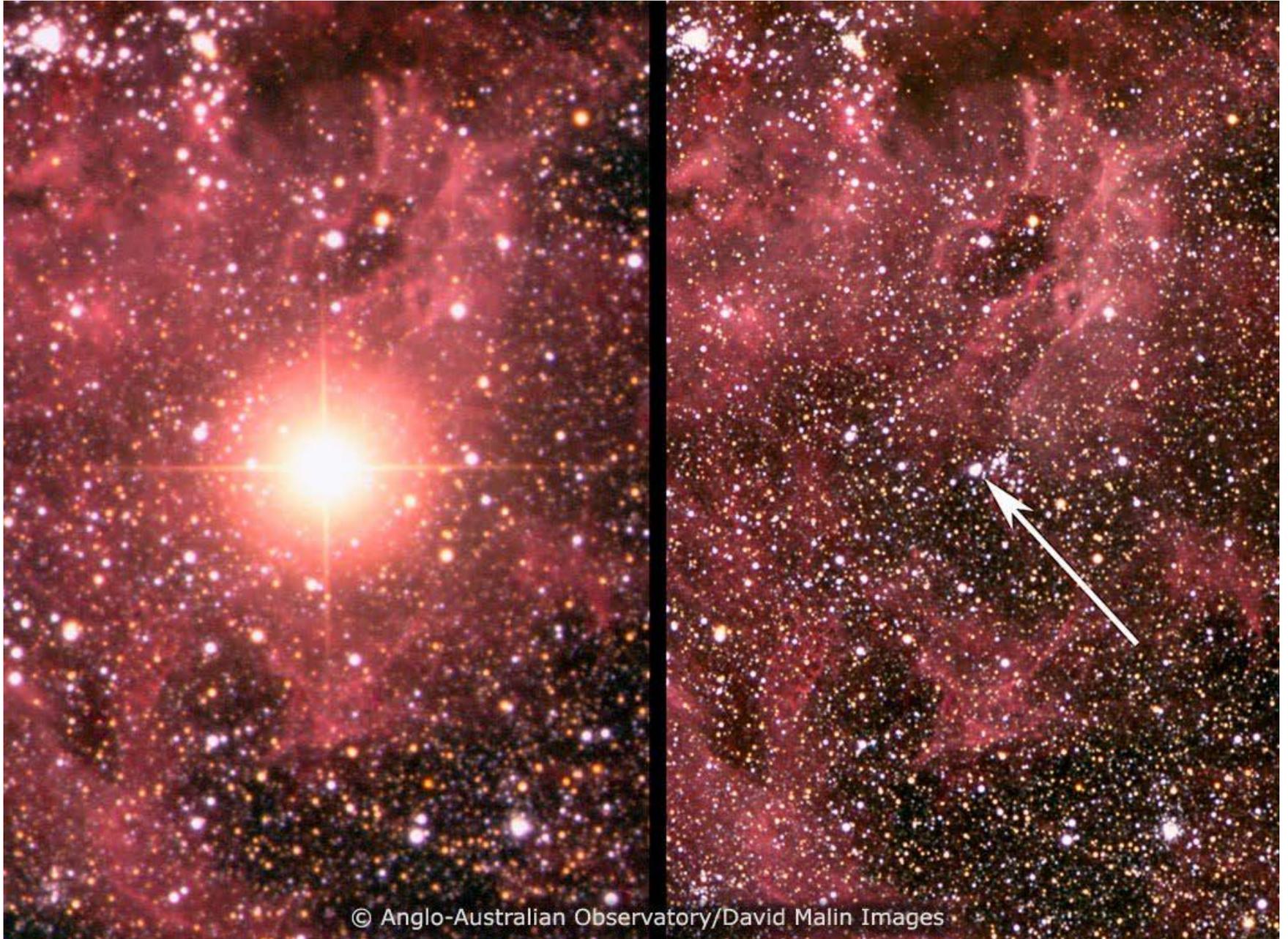
La pression de radiation générée par les températures élevées conduit à un fort vent stellaire, qui souffle l'enveloppe extérieure (comme pour les étoiles Wolf-Rayet par exemple), et donc conduit à essaimer les matériaux lourds synthétisés dans la forge stellaire. Peu à peu, l'Univers s'enrichit en éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium créés lors du big-bang

La phase « supernova »

Supernovae type I ou II		
Supernova	Type I	Type II
Cause	accrétion	effondrement du cœur
Luminosité	-19.5	-18.5
Spectre	métaux	hydrogène et continu
Régions	systèmes stellaires âgés	régions de formation d'étoiles
Précurseur	naine blanche dans un système binaire	étoile très massive
Déclenchement	transfert de masse du compagnon	effondrement du cœur stellaire
Mécanisme	explosion thermonucléaire du cœur carbone/oxygène qui fusionne pour former du fer	onde de choc de rebond de la surface de l'étoile à neutrons
Résidu	rien	étoile à neutrons ou trou noir
Débris expulsés	principalement du fer	tous les éléments lourds (dont beaucoup d'hydrogène)

Enrichit le milieu interstellaire en éléments lourds

Observer une supernova



Sismologie stellaire

- Les étoiles vibrent et l'observation de ces vibrations permet de connaître l'intérieur des étoiles

Les étoiles vibrent; Comment: Ondes propagatives, modes propres de vibration...

À l'intérieur des étoiles, deux types d'ondes:

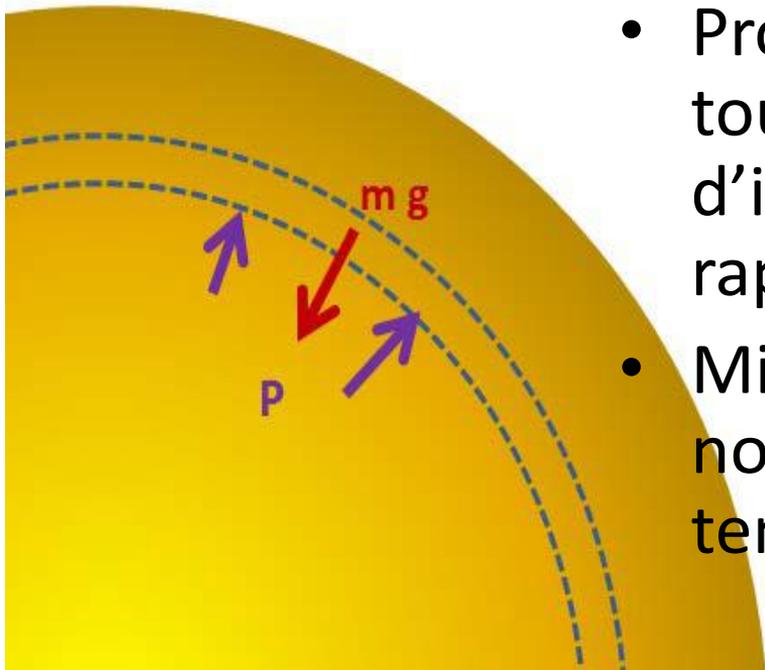
→ ondes de gravité

→ ondes de pression: l'intérieur des étoiles est un fluide compressible, les ondes de pression peuvent se propager partout dans l'étoile à la vitesse du son



Les étoiles vibrent; Comment: Ondes propagatives, modes propres de vibration...

- Ondes de gravité: poussée d'Archimède...
- L'intérieur des étoiles est à l'équilibre hydrostatique: la pression compense la gravité
- Propagation d'ondes de gravité, dans toute l'étoile, sauf...les zones d'instabilité convective où la force de rappel n'existe pas...
- Milieu stratifié: stratification notamment en pression, densité, température...



Les étoiles vibrent: observer ces vibrations et mesurer leur caractéristiques...

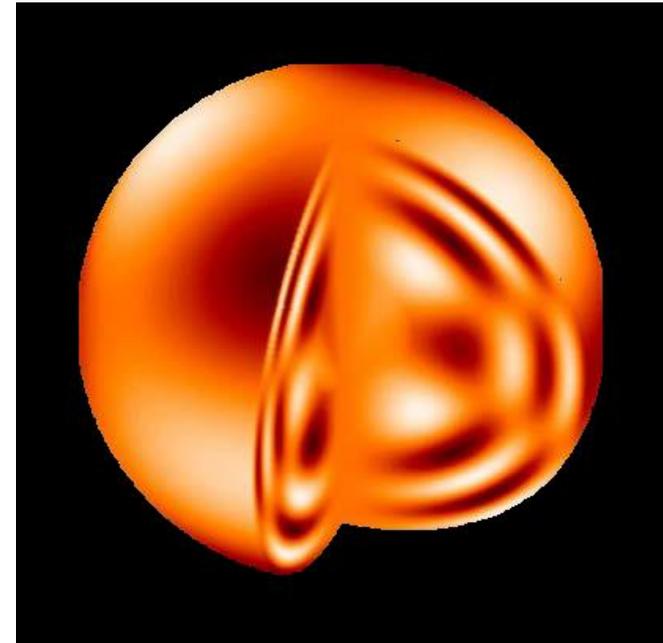
Les pulsations se traduisent à la surface par:

- Des variations de température (et de rayon), donc de luminosité -> photométrie
- Des variations de vitesse radiale -> spectroscopie



© CNES - Octobre 2005/illus. D. Ducros

← CoRot



Sismologie/applications – Bilan

- L'objectif est double:
 - améliorer la compréhension et la modélisation des étoiles
 - tester les processus physiques à l'oeuvre dans les étoiles
- Différentes étoiles représentatives de différentes conditions physiques, diagnostics complémentaires.
- Ambition de la sismologie stellaire à devenir un outil fondamental d'observation, comme spectroscopie ou astrométrie...

Des étoiles au MIS

- Les étoiles enrichissent le milieu interstellaire où une nouvelle nucléosynthèse va se produire.



Le milieu interstellaire (MIS)

École d'été « l'univers à la portée de tous »
23-26 août 2017

Le milieu interstellaire

Qu'y-a-t-il entre les étoiles de la galaxie?

C'est là où s'élaborent les atomes lourds et les molécules complexes.



Le milieu interstellaire (MIS)

Le MIS n'est pas vide...

- ...des densités de matière extrêmement faibles: $n_{\text{max}} < 10^4 - 10^5$ atome/cm³ ... $\ll 10^7$ /cm³, vide poussé en laboratoire ... $\ll 10^{19}$ /cm³ dans l'air que nous respirons
- des régions du MIS où $n \sim 0.1$ /cm³

MIS \sim 10% de la masse en étoiles de la Galaxie

Le milieu interstellaire

Composition:

- Rayonnement
- matière: grains, gaz
- particules énergétiques (cosmiques)
- ... matière noire?

La matière du MIS

(Gaz + poussières) relativement bien mélangés...



La matière/poussière

Nature: 'grains' (agglomération d'atomes/molécules) $\sim 1\text{nm}-0.1\mu\text{m}$

Se manifeste par:

- **Diffusion, absorption, extinction, polarisation...**
- **Émission thermique...(IR)**
- **Raies (bandes) d'absorption...**

Visible (HST)



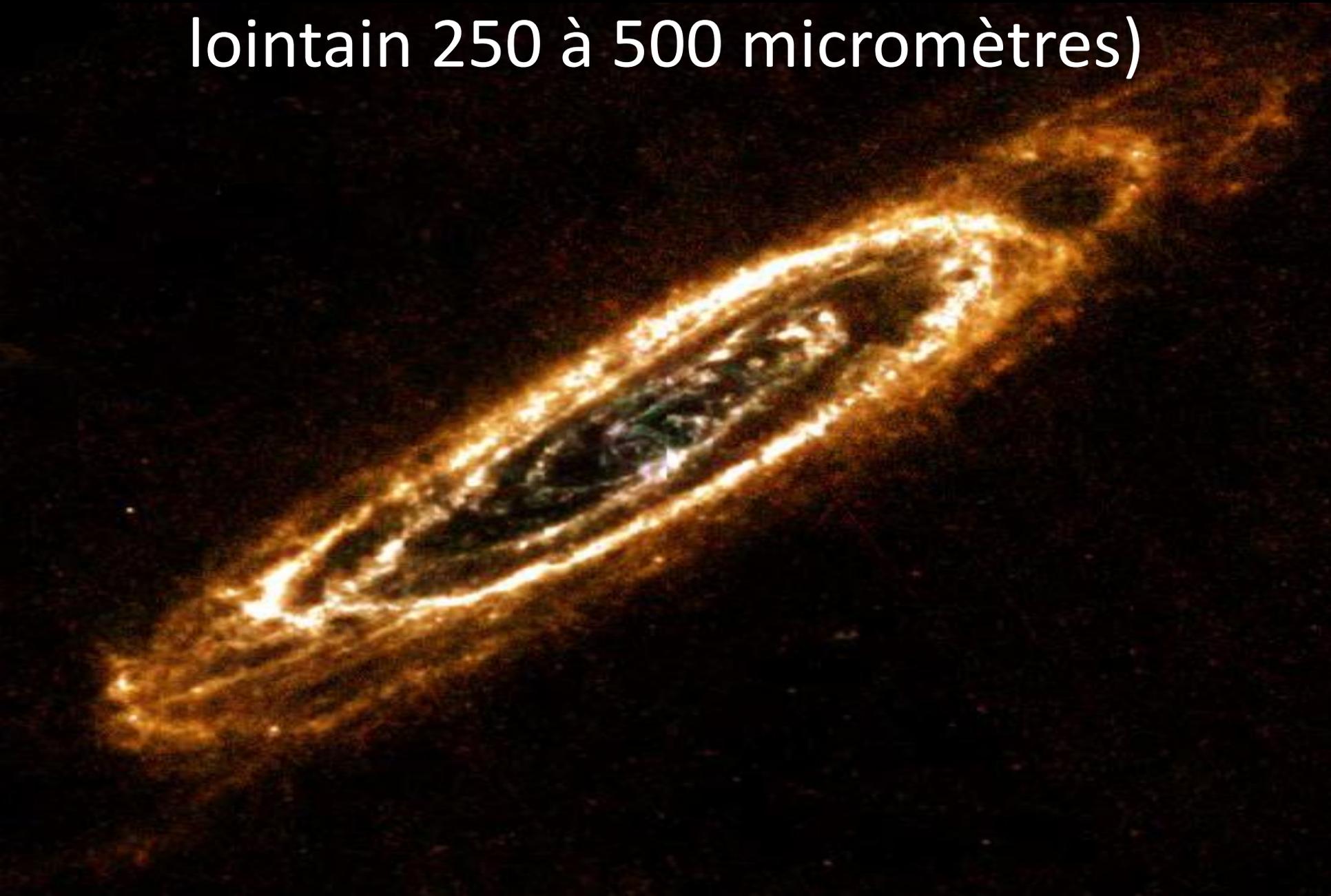
Infrarouge 8 micromètres (Spitzer)



Galaxie d'Andromède (visible)



Galaxie d'Andromède (infrarouge lointain 250 à 500 micromètres)



Composition de la poussière

- Représente 1% en masse du MIS
- Produite dans régions denses et froides (nuages moléculaires et enveloppes d'étoiles évoluées)
- Constituée principalement de grains irréguliers de moins d'un micron
- Constituée de carbone et de silicates principalement
- Observée dans le visible dans les nébuleuses en réflexion et en absorption, dans l'IR lointain (100 μm) en émission thermique.

La matière interstellaire/le gaz

Se manifeste par: absorption/émission dans différentes raies, suivant conditions physiques

- Raies d'absorption V, UV
- Raie 21cm de HI
- Raie d'émission des régions ionisées HII...
- Raies moléculaires...
- Raie de C-O

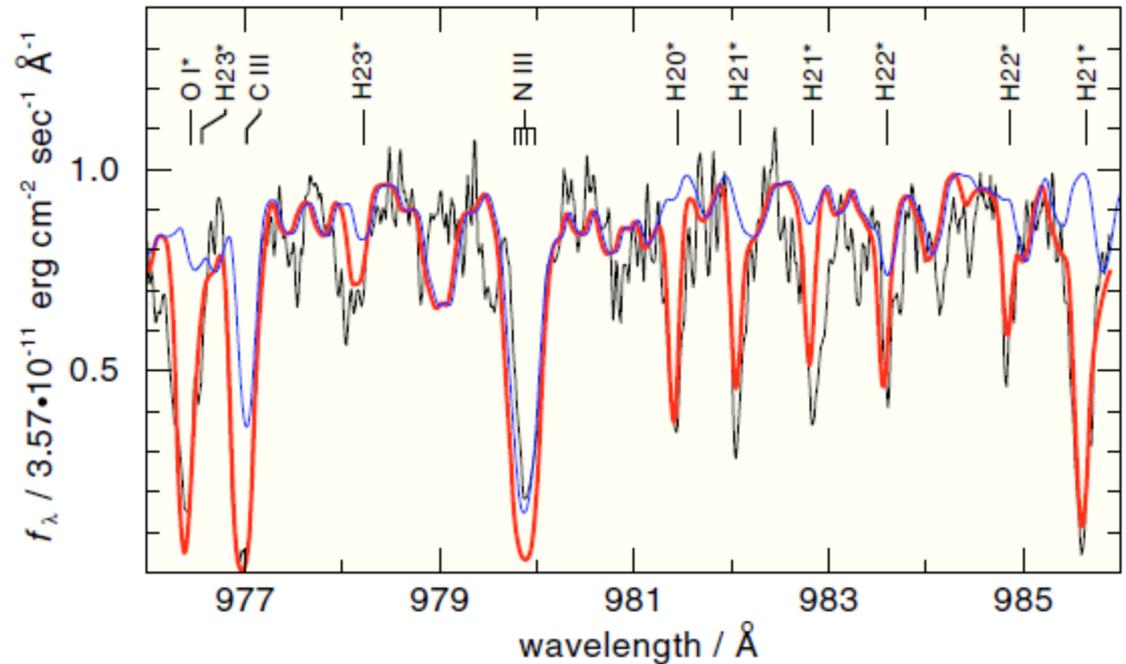


Fig. 2. Comparison of the synthetic stellar spectrum (thin line, blue) and the combined synthetic stellar + ISM spectrum (thick, red) with a section of the FUSE observation of LB 3459. Interstellar lines are labeled with an asterisk.

Nuages moléculaires

- Mélange de poussière et de gaz, contenant des molécules
 - Les NM s'étendent sur des parsecs ou des dizaines de parsecs
 - Densité typique de 10^3 particules/cm³, température de 10 à 150 K

NGC 6611 (HST)



Le milieu interstellaire

Les particules énergétiques (cosmiques)

Observatoire
Pierre Auger (en
Argentine)

1600 conteneurs
de 12 tonnes d'eau
sur 3000 km²

