



# LE DIAGRAMME HR

JP. Maratrey - juillet 2009

Le diagramme de Hertzsprung-Russell (Diagramme HR) est un graphe montrant la luminosité d'un ensemble d'étoiles en fonction de leur température.

Ce type de diagramme a permis d'étudier les populations d'étoiles et d'établir la théorie de l'évolution stellaire.

## Un peu d'histoire

**Ejnar Hertzsprung** (1873-1967) est un chimiste danois.

En 1913, il détermine la distance de plusieurs Céphéides de la Voie Lactée par la méthode de la parallaxe statistique, et permet de calibrer la relation Période-Luminosité découverte par Henrietta Leavitt.

Il travaille à l'observatoire de Leyde aux Pays-Bas de 1919 à 1946. Il en devient le directeur en 1937.

Il découvre deux astéroïdes. Un autre astéroïde et un cratère lunaire portent son nom.

**Henry Russell** (1877-1957) est un astronome américain.

Professeur d'astronomie à l'université de Princeton en 1905, il devient le directeur de l'observatoire de cette université en 1911.

Un cratère sur la Lune, un autre sur Mars et un astéroïde portent son nom.

En 1912, ils découvrent indépendamment l'un de l'autre que la luminosité des étoiles dépend de leur température de surface.



Hertzsprung



Russell

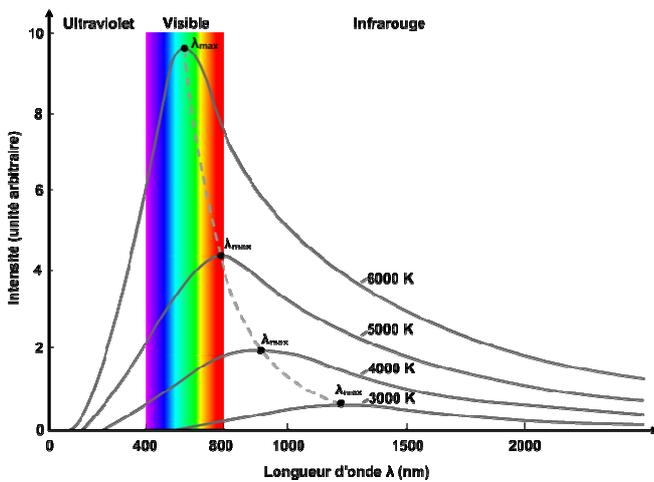
## Le corps noir

En physique, un « corps noir » est un objet idéal dont le spectre ne dépend que de sa température, à l'exclusion de toute autre considération : nature, pression, forme, masse, densité ...

L'objet réel qui se rapproche le plus du corps noir est un four dont une des parois est percée d'un petit trou pour pouvoir mesurer le rayonnement émis par les parois intérieures, à différentes températures, dans toutes les longueurs d'ondes.

C'est le physicien allemand **Gustave Kirchhoff** (1824-1887) qui introduit ce modèle théorique, qui permit à **Max Planck** (1858-1947), également allemand, de poser une des bases, avec d'autres physiciens, de la mécanique quantique au début du XX<sup>ème</sup> siècle.

Un spectre de corps noir ne dépendant que de la température, plaçons sur un graphe l'intensité de chaque longueur d'onde pour une température donnée. Nous obtenons la représentation suivante :



Les étoiles ont un spectre continu proche de celui des corps noirs.

On note que pour une température donnée, la courbe d'émission présente un maximum, d'autant plus située vers les faibles longueurs d'ondes que la température est élevée.

Une étoile peu chaude, à 3 000 K, émettra surtout dans l'Infrarouge, et un peu dans le rouge.

Le Soleil, avec 5 800 K, émet son maximum dans le vert. En ajoutant les émissions dans les autres couleurs, le mélange visible donne du jaune. Mais le Soleil émet également dans l'Ultraviolet et dans l'Infrarouge, à des niveaux d'intensité plus faibles.

Notons également que plus la température de l'étoile est élevée, plus l'intensité du rayonnement, et donc du maximum est forte. Une étoile brillante est une étoile chaude et bleue (en dehors des phases de naissance et de géante rouge). A contrario, une étoile rouge (non géante) est peu brillante et peu chaude.

### Les axes du diagramme

En ordonnée :

Le diagramme HR montre en ordonnée (axe vertical), la luminosité de l'étoile, exprimée en termes de magnitudes. C'est la magnitude absolue qui nous intéresse, c'est-à-dire la luminosité réelle de l'étoile.

La magnitude absolue M et la luminosité L d'une étoile sont liées par la relation :

$$M = -2,5 \log L + C \quad \text{où } C \text{ est une constante.}$$

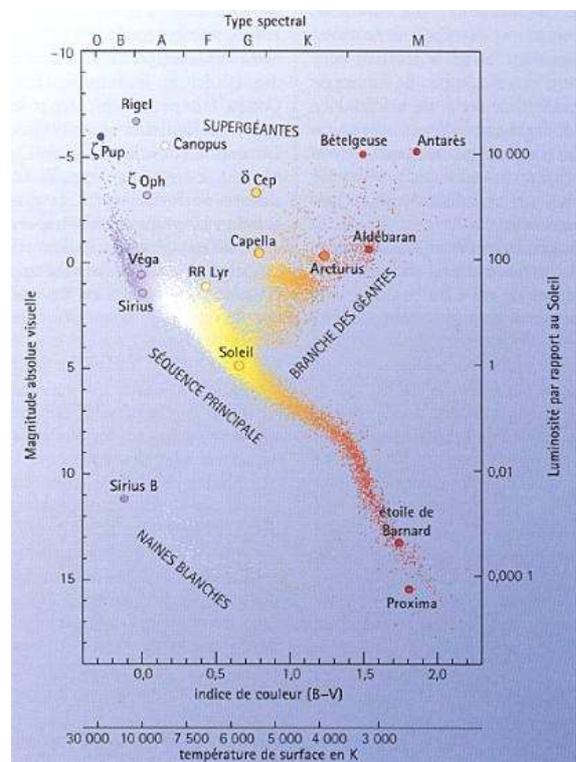
La magnitude est une fonction logarithmique de la luminosité. L'axe est linéaire si les magnitudes absolues sont représentées, et logarithmique si c'est la luminosité.

Si le diagramme représente les étoiles d'un amas particulier où toutes les étoiles sont à la même distance, l'axe vertical pourra donner la magnitude apparente :

En effet, la magnitude apparente m et la magnitude absolue M sont liées à la distance d (en parsecs) par la relation :

$$m - M = 5 \log(d) - 5$$

Dans un diagramme HR d'un amas d'étoiles, on trouvera donc plus volontiers la magnitude apparente, résultat direct d'une mesure.



Comme dans toute mesure de magnitude apparente, l'extinction interstellaire devra être prise en compte. Entre l'étoile à mesurer et l'observateur, existe plus ou moins de matière, des nuages de gaz et de poussières, qui absorbent une partie de la lumière émise, et diminue l'éclat qui nous parvient.

En abscisse :

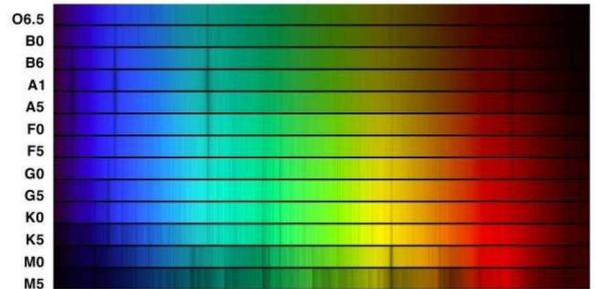
L'axe horizontal donne une variable représentative de la température de surface de l'étoile.

Plusieurs données caractérisent cette température, et l'on trouvera l'une ou l'autre dans les diagrammes :

- La température effective (ou température de couleur) elle-même. La température effective d'une étoile est la température d'une surface émettant comme un corps noir, ce qui est proche de la réalité.
- Le type spectral, obtenu selon la classification de Harvard : O, B, A, F, G, K, M pour les principaux types. Le type spectral est déterminé suivant l'intensité des raies du spectre émis.

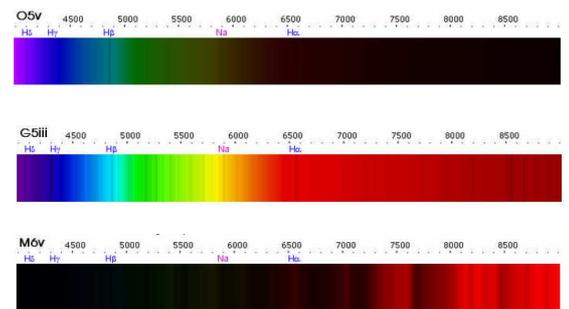
Une étoile O est très chaude, et ne comportera que des raies d'éléments fortement ionisés. La partie visible du spectre continu ne montrera que très peu de rouge.

Au contraire, une étoile M est relativement froide, et aura un spectre comportant des raies d'éléments non ionisés. La partie visible du spectre continu ne montrera que très peu de bleu.



Comme c'est la température qui ionise les éléments d'une étoile, on voit la relation entre type spectral et température.

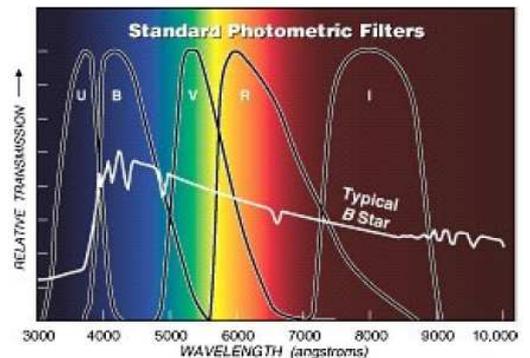
Type spectral	O	B	A	F	G	K	M
Couleur	Bleue	Bleue	Bleue	Bleue à blanc	Blanc à jaune	Orange à rouge	Rouge
Température (K)	> 30 000	30 000 10 000	10 000 7500	7 500 6 000	6 000 5 000	5 000 3 500	< 3 500
Étoiles	Delta Orionis (Mintaka) Zeta Orionis (Alnitak)	Rigel Spica Deneb	Sirius Véga	Canopus Procyon	Soleil Capella	Arcturus Aldébaran	Bételgeuse Antarès



- L'indice de couleur. C'est une caractéristique qui mesure la différence de magnitude d'une étoile dans deux longueurs d'ondes différentes. Une étoile rouge, froide, émettra plus dans le rouge que dans le bleu. A l'inverse, une étoile bleue, chaude, émettra plus dans le bleu que dans le rouge.

Dans la pratique, on emploiera les gammes de longueurs d'ondes normalisées, et les magnitudes apparentes seront notées U pour l'UV, B pour le bleu, V pour le vert, R pour le rouge et I pour l'IR.

- U : maximum à 350 nm (domaine des « métaux<sup>1</sup> »)
- B : maximum à 435 nm (plaques photo)
- V : maximum à 550 nm (ou visible)

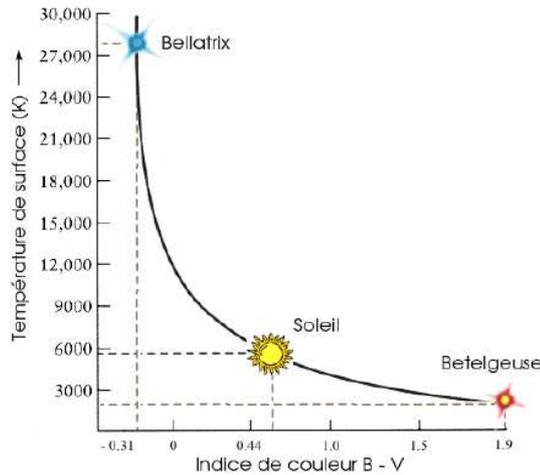
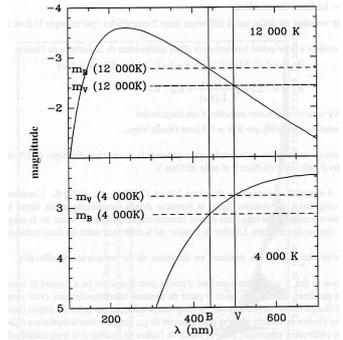


<sup>1</sup> Pour les astronomes, les « métaux » regroupent tous les éléments autres que l'hydrogène et l'hélium.

L'axe horizontal pourra donc être gradué en indice de couleur : B-V, U-B, R-I... B-V est le plus utilisé.

Si B-V est positif, l'étoile émet plus dans le vert que dans le bleu, l'étoile est plutôt froide et peu lumineuse. Si B-V est négatif, c'est le contraire, l'étoile émet plus dans le bleu que dans le vert, et elle est chaude et lumineuse.

Par convention, l'étoile Véga a été retenue comme référence d'indice de couleur (B-V = 0,0) et magnitude apparente (m = 0,0).



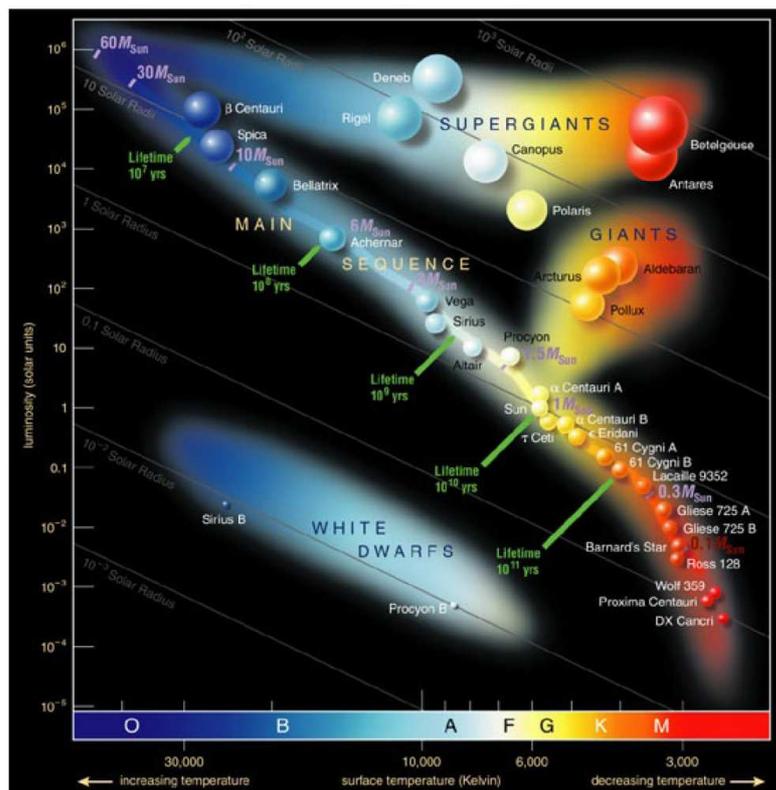
Ce graphique donne une idée de l'indice de couleur en fonction de la température. Plus l'étoile est chaude, plus elle vire au bleu.

Inversement, le rouge indique une température basse.

### Le contenu du diagramme HR

Voyons ce que contient le diagramme, et comment s'y répartissent les étoiles.

Une première remarque. Les données d'entrée du diagramme (luminosité, température) ne concernent que la partie visible, observable des étoiles. Les températures et rayonnements qui règnent à l'intérieur des étoiles sont bien plus importants, et sont déduits du calcul et de la modélisation, et non de l'observation directe.



## **La séquence principale**

Hertzsprung et Russell se sont rendus compte que la plupart des étoiles se situaient grossièrement dans leur diagramme sur une ligne inclinée partant du bas à droite jusqu'au haut et à gauche. Cette ligne est appelée la séquence principale, dans laquelle la luminosité est à peu près proportionnelle à la température. Autrement dit, plus l'étoile est chaude, plus elle brille.

Les étoiles situées dans cette bande tirent leur énergie des réactions nucléaires transformant l'hydrogène en hélium. C'est le cas du Soleil. Une majorité d'étoiles est dans ce cas.

Le premier intérêt du diagramme HR est donc de repérer facilement les étoiles qui brûlent leur hydrogène. Les plus chaudes (100 000 K ou plus), les plus bleues, brûleront leur combustible plus rapidement, et auront une durée de vie assez courte (plusieurs millions d'années), mais seront très lumineuses. A contrario, les étoiles situées en bas et à droite du diagramme seront relativement froides (vers 3 000 K tout de même) et émettront dans le rouge. Les réactions nucléaires seront plus lentes, et l'étoile vivra plus longtemps, plusieurs dizaines de milliards d'années. Elles seront peu lumineuses.

Mais il existe des étoiles rouges très lumineuses (Antares, Betelgeuse...), et des étoiles bleues peu brillantes. Cela signifie qu'elles sont à un autre stade de leur évolution, et ne sont plus ou pas encore sur la séquence principale.

## **La branche des géantes rouges**

Lorsqu'une étoile a fini de consommer son hydrogène dans son noyau, la force de gravité prend le dessus sur la force de répulsion due à ces réactions, et le noyau se contracte. Ce faisant, la température de ce noyau augmente, et la pression de radiation se fait plus importante. Les couches périphériques de l'étoile sont comme soufflées, et l'étoile grossit. C'est une géante rouge.

La luminosité globale de l'étoile est répartie sur une plus grande surface, et la température de surface diminue. Par contre, du fait même de cette augmentation de surface, la luminosité augmente. L'étoile devient plus froide, et plus lumineuse.

Sur le diagramme HR, elle se situe en haut (lumineuse), et à droite (froide).

Toutes les géantes rouges issues d'étoiles de masse inférieure à 8 masses solaires sont situées sur cette branche des géantes rouges.

## **La branche des super-géantes rouges**

Si l'étoile d'origine est plus massive ( $> 8 M_{\odot}$ ), la température du cœur sera plus importante, les couches externes de la géante rouge sont repoussées encore plus loin, l'étoile est encore plus grosse, encore plus lumineuse. C'est la branche des super géantes rouges.

## **La branche des géantes bleues**

Les étoiles les plus massives sont aussi les plus chaudes et les plus volumineuses. On les retrouve en haut à gauche dans le diagramme HR. Elles brûlent leur hydrogène très rapidement, et leur durée de vie est courte. C'est la raison pour laquelle on n'en observe relativement peu.

A la fin de leur vie, lorsque l'hydrogène est consommé, c'est l'hélium qui fusionne. La température est encore plus élevée, et elles gonflent pour devenir des super-géantes bleues. C'est peu de temps (astronomique) après qu'elles explosent en supernovas.

## **La branche des naines blanches**

Quand une étoile peu massive, comme le Soleil, arrive en fin de vie, elle quitte la séquence principale et se retrouve dans la branche des géantes rouges. Le stade suivant (très court : quelques dizaines de milliers d'années) est la nébuleuse planétaire. Les couches externes de l'étoile sont éjectées dans l'espace, et il ne reste qu'un cœur très chaud et très petit (taille de la Terre) en rotation rapide.

Le « très chaud » la place à gauche dans le diagramme HR. Le « très petit » signifie peu lumineux (peu de surface d'émission), et la place en bas du diagramme.

Sirius B, le compagnon de la brillante Sirius est une naine blanche et se trouve dans ce coin en bas à gauche du diagramme.

## Que nous apprend le diagramme HR ?

Beaucoup de choses, en vérité.

D'abord on sait, si l'étoile est sur la séquence principale, qu'elle brûle son hydrogène. Si elle est dans la branche des naines blanches, elle a fini sa vie et se refroidit lentement. Si elle est dans la branche des géantes, son agonie est proche. En d'autres termes, on connaît son stade d'évolution.

Le diagramme HR permet aussi, selon la position de l'étoile, d'évaluer son rayon, sa masse, sa durée de vie et sa distance.

Voici la répartition et les caractéristiques des étoiles selon leur type spectral dans la séquence principale :

	O	B	A	F	G	K	M
Température (K)	40 000	20 000	8 500	6 500	5 700	4 500	3 200
Rayon ( $\odot$ )	10	5	1,7	1,3	1	0,8	0,3
Masse ( $\odot$ )	50	10	2	1,5	1	0,7	0,2
Luminosité ( $\odot$ )	100 000	1 000	20	4	1	0,2	0,01
Durée de vie ( $10^6$ ans)	10	100	1 000	5 000	10 000	50 000	100 000
Abondance (%)	0,000 01	0,05	0,3	1,5	4	9	80

Répartition selon la position dans le diagramme HR, hors séquence principale :

	Naines blanches	Géantes	Supergéantes
Type spectral	D	F G K M	O B A F G K M
Température (K)	< 50 000	1 000 / 3 000	4 000 / 40 000
Rayon ( $\odot$ )	< 0,01	10 / 50	30 / 500
Masse ( $\odot$ )	< 1,44	1 / 5	10 / 70
Luminosité ( $\odot$ )	< 0,01	50 / 1 000	30 000 / 1 000 000
Durée de vie ( $10^6$ ans)	-	1 000	10
Abondance (%)	5	0,5	0,000 1

Le symbole ( $\odot$ ) indique que les valeurs du tableau sont ramenées à celles du Soleil. Par exemple, une étoile du type spectral O est 50 fois plus massive que le Soleil.

Le type spectral, la température, la couleur et la luminosité sont des données d'entrée du diagramme.

### Le rayon

Reprenons le Diagramme HR de la page 4.

Le rayon de l'étoile va conditionner sa surface d'émission. Plus le rayon sera grand, plus le volume de l'étoile et sa surface émissive seront grands, et plus la luminosité sera grande.

Le rayon sera aussi influencé par la température de l'étoile.

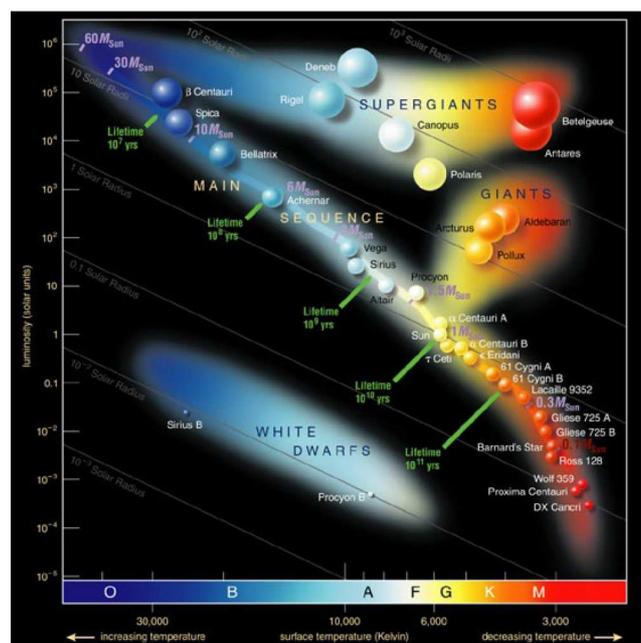
Globalement, les étoiles du haut du diagramme seront plus grosses que celles du bas. Les traits inclinés en gris donnent quelques valeurs des rayons des étoiles comparés à celui du Soleil.

### La masse

Par le même raisonnement, on peut facilement admettre que plus l'étoile est haute dans la séquence principale, plus sa masse sera grande. Plus l'étoile est massive, et plus sa température est élevée.

### La durée de vie

Comme on l'a déjà vu, plus l'étoile est massive, plus sa température est élevée, plus les réactions thermonucléaires sont vives et rapides, et plus courte est sa durée de vie. Les étoiles du haut du diagramme vivent peu de temps.



## La distance

Si une étoile est assez lumineuse pour qu'elle nous donne un spectre, nous aurons son type spectral. Cette information nous dit également si elle est sur la séquence principale.

Dans ce cas, la loi statistique de cette séquence principale nous donne une idée de la magnitude absolue de l'étoile, mais avec une certaine marge d'erreur, au vu de la largeur de la bande principale.

Recoupée avec la magnitude apparente mesurée et corrigée de l'absorption interstellaire, le calcul nous donne la distance avec l'équation :

$$(1) \quad m - M = 5 \log(d) - 5$$

m = magnitude apparente  
M = magnitude absolue  
d = distance en parsecs

Pour réaliser correctement cette évaluation, il nous faut un diagramme HR le plus juste possible, avec des mesures de température (en fait, d'indice de couleur B-V), ce qui est relativement précis, et des mesures de la magnitude absolue. Cette dernière est faite sur des étoiles dont on connaît la distance par ailleurs.

Ceci a été réalisé par le satellite Hipparcos, qui a mesuré précisément la magnitude apparente et la parallaxe, donc la distance, de 2,5 millions d'étoiles proches, jusqu'à 500 al de la Terre.

On obtient le diagramme HR ci-contre, que l'on considère comme représentatif de l'environnement proche du Soleil.

On remarque que pour une même couleur, la magnitude absolue est assez imprécise. La distance calculée le sera aussi. Seul l'ordre de grandeur sera à considérer.

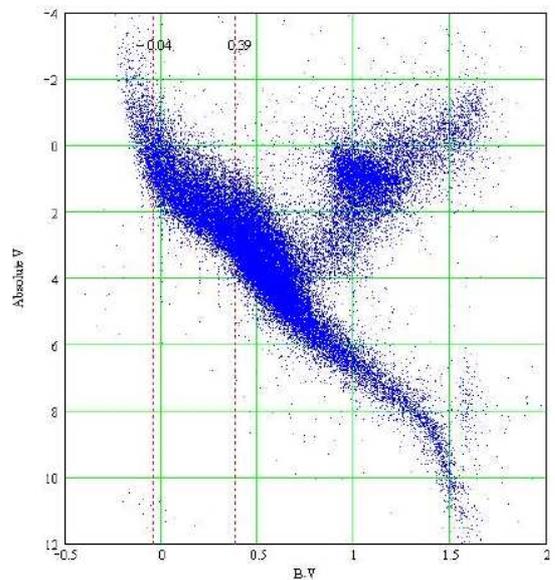


Diagramme HR d'Hipparcos

## Age des amas d'étoiles

Mais l'une des caractéristiques les plus importantes que l'on peut tirer du diagramme HR est l'âge des amas d'étoiles, ainsi qu'une estimation plus précise de leur distance.

Dans un amas, qu'il soit ouvert ou globulaire, on peut considérer que toutes les étoiles sont à la même distance de nous. Ce qui revient à remplacer en ordonnée la magnitude absolue par la magnitude apparente dans le diagramme HR.

D'autre part, on estime que toutes les étoiles sont nées en même temps. C'est vrai pour un amas ouvert, c'est une hypothèse très probable pour les amas globulaires.

### Les amas ouverts

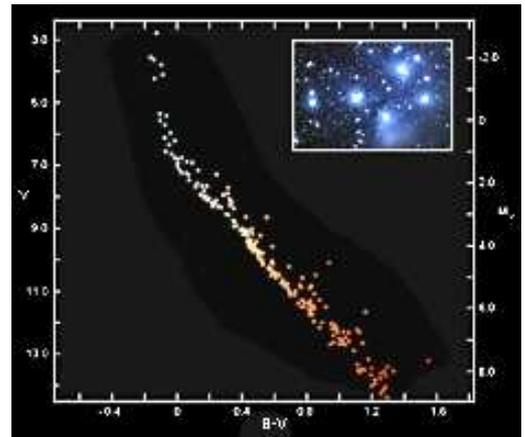
Les étoiles d'un amas ouvert naissent d'un même nuage de gaz et de poussières géant, qui se fractionne pour donner autant d'étoiles de toutes tailles. Les étoiles massives et chaudes, celles qui sont en haut du diagramme, vivent peu de temps. On peut donc dire qu'un amas qui contient beaucoup d'étoiles de ce type est jeune. Ses étoiles massives n'ont pas eu le temps d'exploser en supernovas. C'est le cas des amas ouverts.

De plus, ces amas ouverts jeunes naissent alors qu'un bon nombre de générations d'étoiles se sont succédé, étoiles qui ont enrichi le milieu interstellaire des matériaux créés par les réactions nucléaires. La matière dont ils sont faits est donc plus riche en « métaux » que les vieux amas.

En prenant de l'âge, les amas ouverts ont tendance à se disperser. Au bout d'un certain temps, l'amas ouvert n'existe plus. La durée de vie d'un amas ouvert est d'environ un milliard d'années, soit environ 4 tours de la Galaxie.

Un amas très jeune montrera une séquence principale complète, ou presque, avec des petites étoiles, des moyennes comme le Soleil, et des grosses qui n'ont pas encore explosé.

Les étoiles géantes bleues dominent les amas par leur luminosité. Les rouges sont peu lumineuses et donc peu visibles, et la couleur d'un amas ouvert tire nettement sur le bleu, à l'instar de l'amas des Pléiades M 45.



Amas des Pléiades

### Les amas globulaires

Inversement, les amas qui ne contiennent plus d'étoiles massives seront plus âgés. Par exemple, les amas globulaires sont formés d'étoiles peu massives et peu lumineuses. Ils sont anciens. Cette hypothèse est confortée par le fait qu'ils ne présentent plus de nuages de poussières et de gaz.

Toute cette matière diffuse a déjà été consommée, et il n'en reste plus pour former d'autres étoiles.

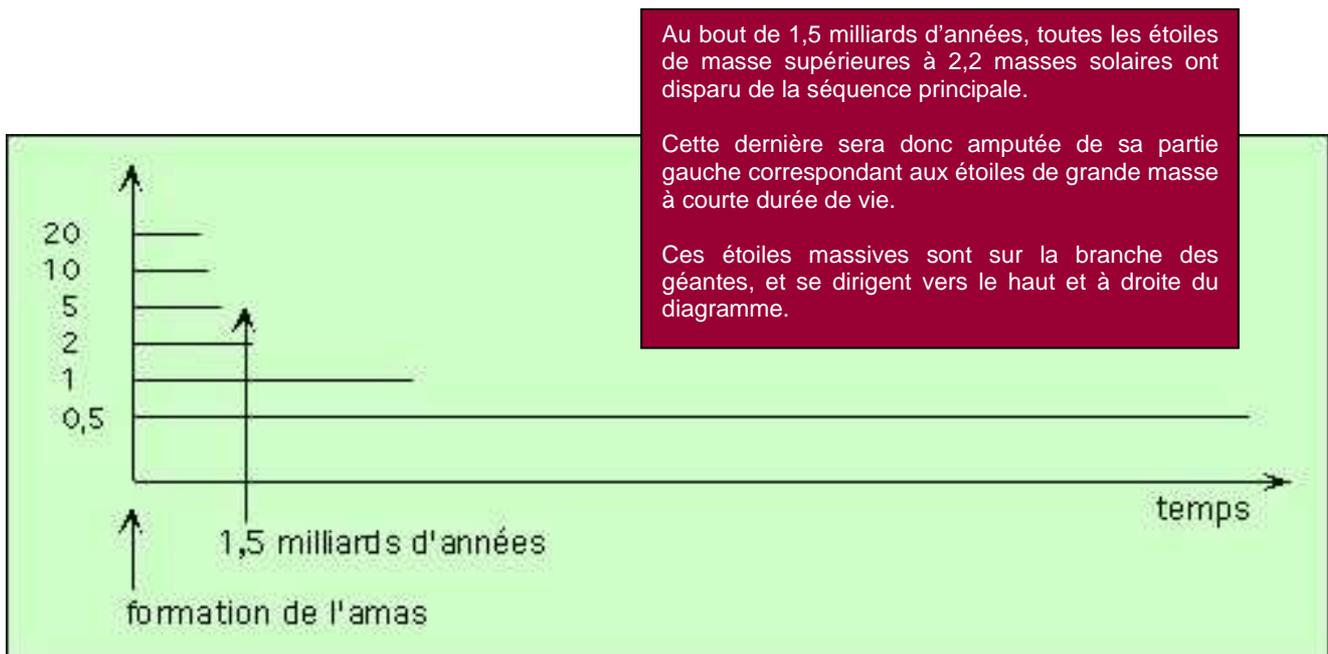
Etant anciennes, les étoiles des amas globulaires sont peu métallisées. La matière qui les a formés n'était que très faiblement enrichie par les toutes premières générations d'étoiles.

On pense que les amas globulaires se sont formés en même temps que la Galaxie, alors qu'elle n'était pas encore aplatie. Ceci explique leur situation géographique, dans le halo.

Ils ont donc un âge avoisinant celui de la galaxie qui les héberge.

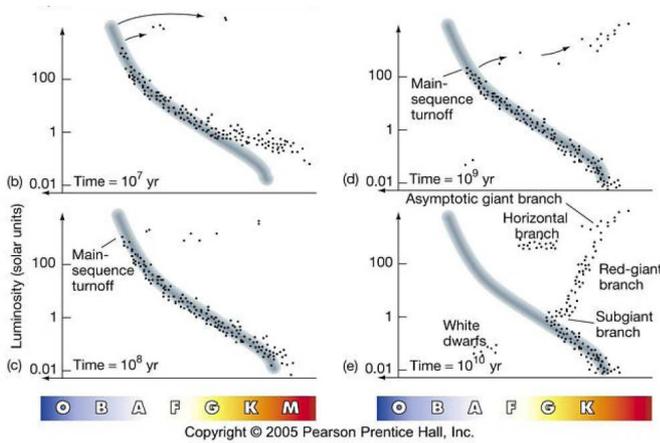
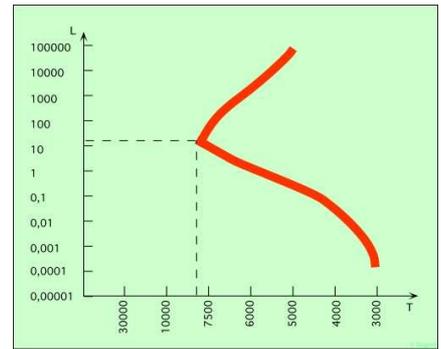
Voyons comment estimer l'âge d'un amas globulaire.

Le graphique ci-dessous représente la durée de vie des étoiles selon leur masse (et donc leur luminosité) dans la séquence principale.



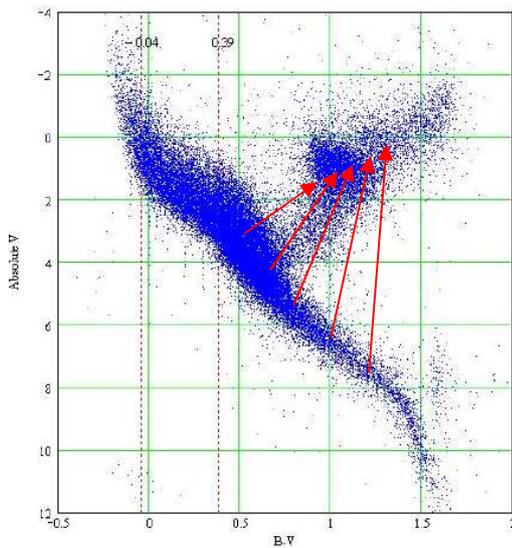
Nous aurons donc, pour cet amas globulaire de 1,5 milliards d'années d'âge, une séquence principale dans la partie basse, puis un coude correspondant à la montée vers les géantes rouges.

La position du coude correspond à l'âge de l'amas, celui de la durée de vie des étoiles de 2,2 masses solaires.



Ces 4 diagrammes représentent l'évolution de 4 amas d'âges différents

Le plus récent comporte peu d'étoiles dans la branche des géantes. Le plus ancien laisse apparaître le coude des géantes assez bas sur la séquence principale.



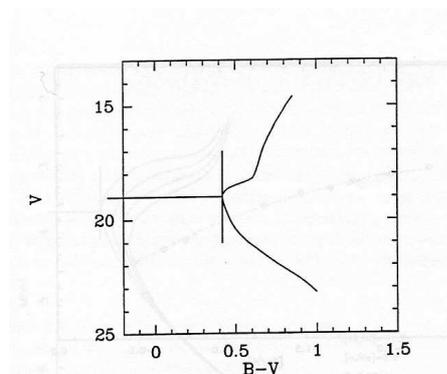
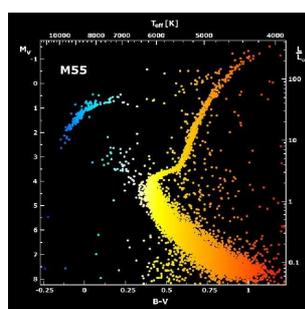
Sur ce diagramme HR d'Hipparcos, les flèches indiquent le chemin des étoiles lorsqu'elles quittent la séquence principale.

On note que plus l'amas est jeune, plus le coude placé haut, et plus l'angle du coude est fermé.

A la limite, le coude des étoiles froides est difficile à percevoir.

Les amas ouverts pourront présenter aussi ce coude pour l'estimation de leur âge. Le coude sera placé d'autant plus haut que l'amas sera jeune.

Cela nécessite que l'amas soit bien connu, en d'autre termes que les étoiles qui le compose soient représentatives de l'amas entier, avec un échantillonnage significatif.



La première image est M 55, la seconde est le diagramme HR de ce même amas. Le graphique indique comment trouver la position du coude. C'est le point de tangence vertical du coude.

## Les « traînardes bleues »

Ce doux nom est donné aux étoiles chaudes et massives des amas globulaires. Elles sont évidemment en petit nombre : elles ne devraient pas se trouver là !

En fait, plusieurs scénarios sont envisagés pour expliquer leur présence, en prenant en compte le nombre important d'étoiles binaires présents dans les amas globulaires :

- Collision entre deux étoiles du fait de leur grande proximité au voisinage du centre de l'amas. La masse de la nouvelle étoile est grossièrement la somme des masses des deux protagonistes.
- Aspiration de la matière d'une étoile devenue géante rouge par son compagnon, et augmentation de masse, de température...
- Les traînardes ont été capturées lors du passage de l'amas dans le disque de la galaxie (ne pas oublier que les amas globulaires tournent autour du noyau sur des orbites elliptiques, et rencontrent fatalement un jour ou l'autre le disque).

Cette méthode très empirique est peu précise, car l'erreur sur la masse, la durée de vie des étoiles, la position du coude, est conséquente.

## Modélisation et simulation

Les progrès des modèles d'étoiles et les simulations par ordinateur ont amélioré les techniques, et donc les précisions des évaluations des âges et distances.

Voici comment l'on procède :

La première étape consiste à modéliser le fonctionnement d'une étoile. Et pour commencer, à comprendre sa structure interne : type de réactions nucléaires, température et taille du noyau où ces réactions ont lieu, type et caractéristiques des particules émises (en majorité des photons, mais pas seulement), structure, densité et opacité de la couche radiative qui entoure le noyau, caractéristiques physiques de la couche périphérique convective (provoque un certain mélange de la matière), de la photosphère émissive et de la couronne, de la composition chimique...

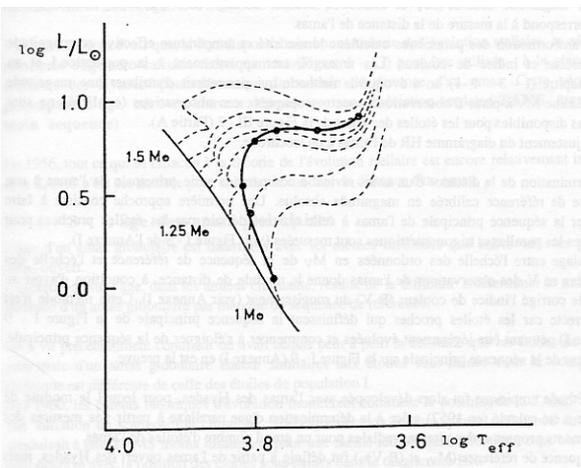
A noter que la composition chimique de l'étoile varie avec l'évolution des réactions nucléaires : transformation de l'hydrogène en hélium sur la séquence principale, puis formation d'éléments chimiques de plus en plus lourds en fin de vie, fonction de la masse initiale de l'étoile.

Le Soleil est l'étoile qui a permis de vérifier par l'observation les hypothèses des astrophysiciens.

L'énergie créée dans le noyau se propage vers la surface, par conduction, par radiation, puis par convection, et les modèles permettent de calculer la luminosité et la température effective de cette étoile théorique.

On calcule ainsi les caractéristiques (température et luminosité) d'étoiles de différentes masses, ce qui consiste à tracer sur le diagramme HR l'évolution de l'étoile avec le temps.

Reporté sur le diagramme HR, le système de référence est le suivant :



Le trait plein fin représente la séquence principale à partir de laquelle partent les traits pointillés, chacun donnant la progression avec le temps de l'étoile d'une masse d'origine donnée sortant de la séquence principale.

Le trait plein gras joint les points des courbes en pointillés de même âge.

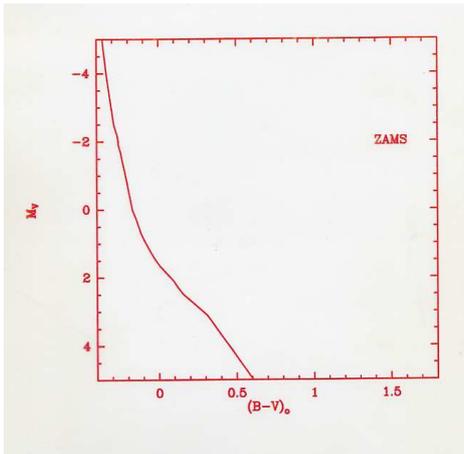
Dans un amas comprenant des étoiles de toutes masses, on retrouvera chacune d'elles sur ce trait plein gras appelé « **isochrone** » (même âge).

Comme les étoiles d'un amas naissent ensemble, à leur naissance, elles sont toutes, quelle que soit leur masse, sur la séquence principale que l'on appelle alors, pour les amas, « ZAMS » : Zero Age Main Sequence en anglais, soit, en français, séquence principale d'âge zéro.

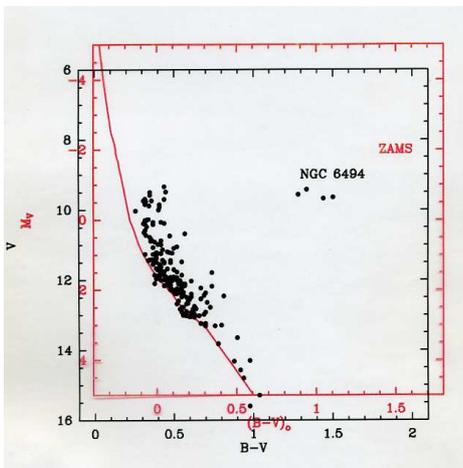
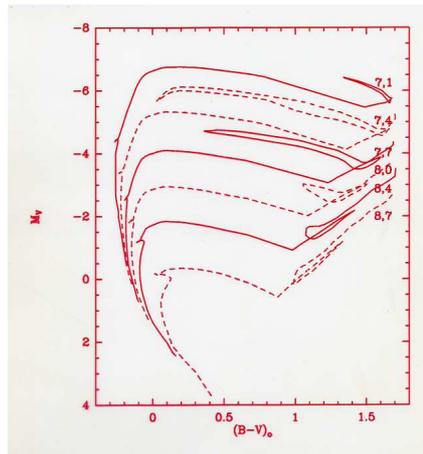
On retrouve sur l'isochrone théorique, le coude noté précédemment. Deux diagrammes théoriques seront utilisés. L'un représente la ZAMS et permettra de mesurer la distance de l'amas, l'autre, avec le réseau d'isochrones donnera son âge (l'âge est donné en valeur logarithmique).

Remarquons que ces diagrammes théoriques, obtenus par calcul, ont la magnitude absolue en ordonnée, et que la température est représentée par l'indice de couleur B-V. Cet indice de couleur ne subit aucun décalage dû à l'absorption interstellaire. Il est théorique, et noté  $(B-V)_0$ .

ZAMS



Réseau d'isochrones



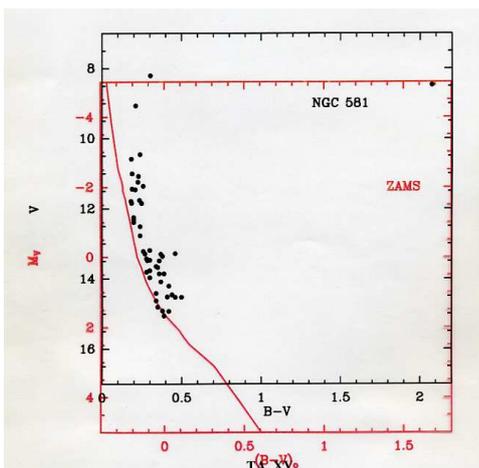
La méthode consiste à superposer le diagramme HR réel de l'amas (en noir) avec le tracé théorique (en rouge).

Il est à noter que les tracés théoriques sont construits pour une composition chimique des étoiles déterminée. Il est important d'ajuster le diagramme HR de l'amas avec les étoiles ayant la même composition. Dans un même amas, certaines variations sont possibles.

Le diagramme théorique donne la magnitude absolue ( $M_v$ ). Le diagramme de l'amas donne la magnitude apparente ( $V$ ). La différence entre les deux est le module de distance (équation (1) de la page 7).

Ici,  $m-M$  est égal à 10,2.

Le décalage des abscisses donne directement l'absorption interstellaire. Dans le cas ci-dessus, ce décalage est de 0,4 et est appelé rougissement (l'absorption interstellaire absorbe préférentiellement le bleu plutôt que le rouge).

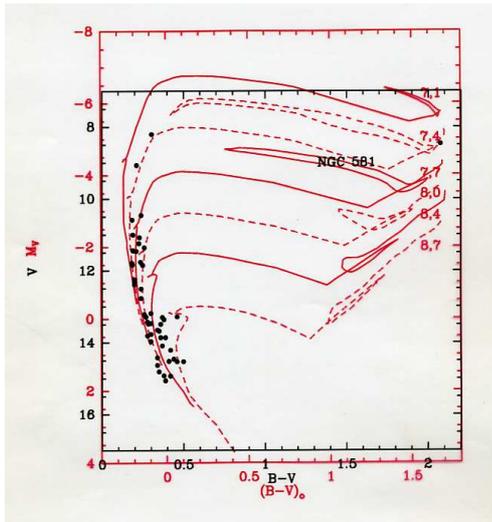


Cela veut dire que toute mesure de l'indice de couleur d'une étoile de l'amas devra être corrigée de cette valeur.

La difficulté est évidemment de trouver la bonne superposition. Une autre source d'erreur est le modèle utilisé pour construire le diagramme théorique.

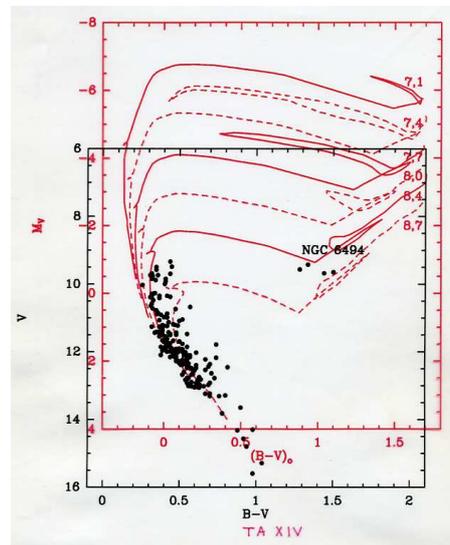
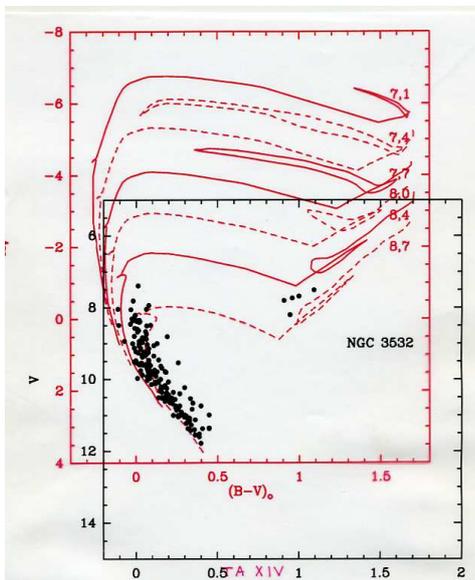
Autre exemple, celui de l'amas NGC 581. Le rougissement est encore de 0,4. Le module de distance fait 13,4.

Tout calcul fait, la distance est estimée à 15 600 al.



En superposant au diagramme HR de l'amas le réseau d'isochrones théorique, en l'ajustant au mieux avec les valeurs trouvées en utilisant la ZAMS, nous trouvons une étoile sur l'isochrone 7,4.

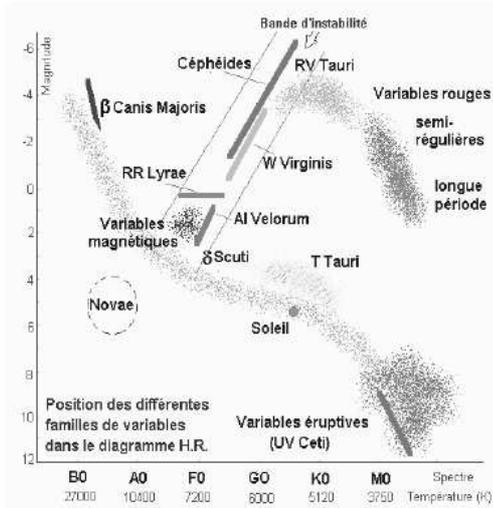
En clair, cela veut dire que le logarithme de l'âge de l'amas a toutes les chances d'être 7,4, soit un âge d'environ 25 millions d'années.



Dans ces deux derniers exemples, nous trouvons les valeurs suivantes :

	NGC 3532	NGC 6494
Rougisement	0	0,4
Module de distance	8,3	10,2
Distance (parsecs)	457	1 096
Distance (al)	1 490	3 574
Log(âge)	8,5	8,6
Age (millions d'années)	316	398

## Les étoiles variables



Les variables stables, celles par lesquelles la mesure de leur distance est possible, se situent dans une bande du diagramme HR représenté ci-contre.

Ces étoiles ne comportent pas que les Céphéides, mais également d'autres types qui donnent une relation Période-Luminosité différente chaque fois.

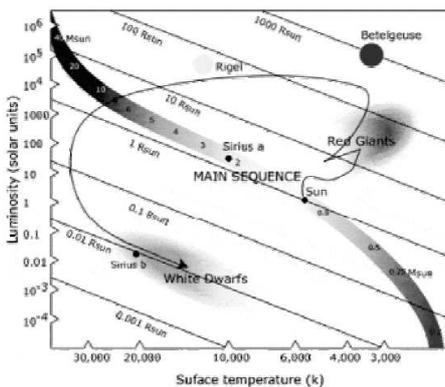
Elles sont des géantes qui viennent de sortir de la séquence principale. Elles brûlent leur Hélium.

D'autres variables moins stables sont représentées, comme les novas, les éruptives ou les semi régulières.

## Et l'avenir du Soleil ?

On le sait, le Soleil a une durée de vie d'environ 10 milliards d'années sur la séquence principale. Quel sera son devenir, en regard du diagramme HR ?

Il est donné par le graphique suivant :



Dans sa montée vers les géantes rouges, il subira un crochet rapide (flash de l'hélium).

Puis, après épuisement des dernières réactions nucléaires possibles avec sa masse, il deviendra une nébuleuse planétaire.

C'est la partie horizontale qui durera environ 30 000 ans, avant de devenir une naine blanche et rejoindre la partie basse du diagramme.

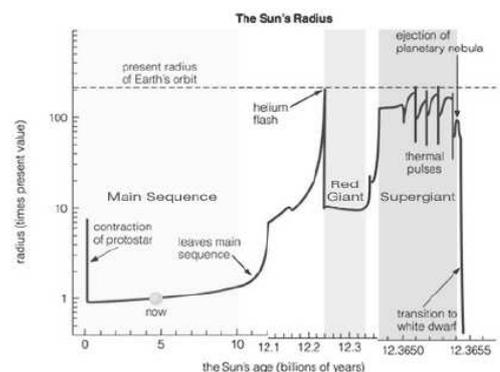
Son rayon, quant à lui, est relativement stable pendant son passage sur la séquence principale.

La phase de géante rouge le verra multiplié par 100 ou 200. Sa photosphère dépassera l'orbite de la Terre.

Après une phase de variations de rayon irrégulière, il diminuera jusqu'au rayon de la Terre (naine blanche) après la phase nébuleuse planétaire.

Les durées de ces différentes phases sont les suivantes :

- Séquence principale : 10 milliards d'années
- Flash de l'hélium : Quelques jours
- Géante rouge : 2 milliards d'années
- Nébuleuse planétaire : 30 000 ans



Quelques étoiles sur le diagramme

