

Le(s) diagramme(s) Hertzsprung-Russell

Éric Josselin, LUPM, Université de Montpellier.

Le diagramme HR, introduit au début du XX^e siècle, est un outil puissant en astrophysique, permettant de suivre l'évolution des étoiles, mais aussi de mesurer la distance et l'âge des amas stellaires. Mais sa construction est moins aisée qu'il n'y paraît...

Un peu d'histoire...

En 1911, Ejnar Hertzsprung, un astronome danois, construit un diagramme dans lequel il reporte un indice de couleur (indicateur de température) en fonction de la magnitude photographique apparente (mesure de l'éclat apparent, cf. ci-dessous) pour les étoiles de l'amas des Hyades, dont l'extension est suffisamment petite par rapport à la distance pour qu'on puisse considérer que les différences d'éclat apparent entre les étoiles membres reflètent des différences de luminosité intrinsèques. Deux ans plus tard, Henry Russell construit un diagramme similaire. Il considère cette fois 220 étoiles pour lesquelles la distance est connue (via la mesure de leur parallaxe), et reporte donc le type spectral en fonction de la magnitude absolue. Dans les deux cas, ils constatent que les étoiles se retrouvent très majoritairement le long d'une bande allant des étoiles froides et peu lumineuses aux étoiles chaudes et lumineuses. Hertzsprung baptise cette bande la séquence principale, et Russell, la séquence des naines. Les étoiles en dehors de cette bande sont essentiellement des étoiles froides et lumineuses, des étoiles géantes (le terme est aussi introduit par Russell) rouges. Le diagramme Hertzsprung-Russell, ou diagramme HR, était né. L'histoire retient la dénomination d'Hertzsprung. À noter que le diagramme de Russell comporte également une étoile chaude très peu lumineuse, omicron Eridani B, qui s'avérera être une naine blanche.

L'idée que ce diagramme représente un outil pour suivre l'évolution des étoiles émerge rapidement, mais il faudra attendre les années 1950 pour qu'une théorie cohérente de l'évolution stellaire émerge. Entre temps, différentes théories circulent. L'une des premières suggère que les étoiles évoluent le long de la séquence principale, des types spectraux chauds vers les types froids. De cette époque datent les appellations erronées, mais toujours employées, de type « précoce » et de type « tardif ».

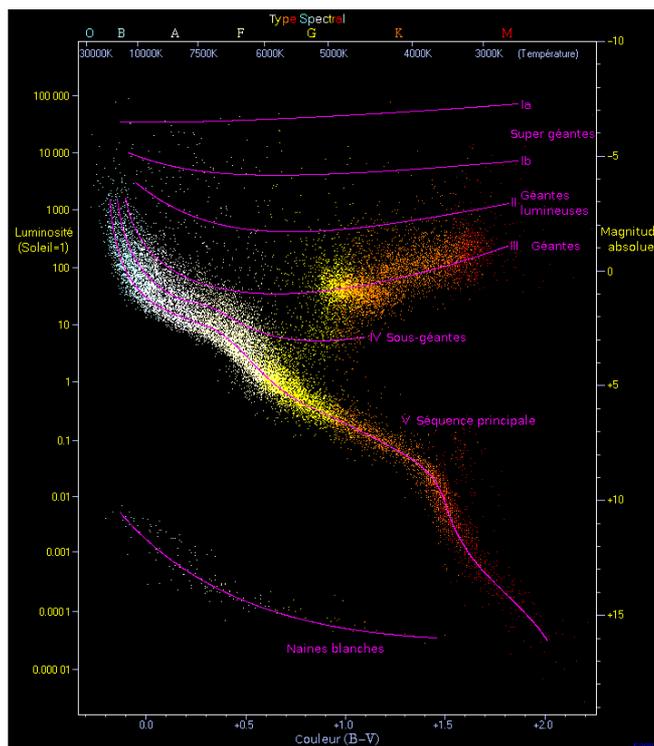


Fig.1. Exemple de diagramme HR. En abscisse, on place la température de surface de l'étoile (décroissante de gauche à droite), qui correspond à sa couleur ou à son type spectral ; en ordonnée, sa luminosité ou sa magnitude absolue. Chaque point représente une étoile.

Propriétés de base

Le diagramme HR moderne consiste à représenter la luminosité (ou un indicateur de luminosité) en fonction de la température effective (ou d'un indicateur). La température effective, c'est à dire la température du corps noir rayonnant le même flux que l'étoile, correspond approximativement à la température de la photosphère (mais cette dernière définition devient ambiguë pour les étoiles de faible gravité de surface, les géantes, qui ont une atmosphère très étendue) ; elle croît de droite à gauche.

Ces deux paramètres, température effective T_{eff} et luminosité L , sont reliés par la relation :

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$$

où σ désigne la constante de Stefan-Boltzmann et R le rayon de l'étoile. Dans le diagramme HR, les axes étant en échelle log - log, les lignes d'iso-rayon sont donc des droites¹, comme indiqué sur la figure 2. Les appellations des différentes classes d'étoiles se justifient alors clairement. Les étoiles naines de la séquence principale ont un rayon proche du rayon solaire. Les géantes et supergéantes ont des rayons de quelques dizaines à quelques centaines de rayons solaires (les plus grosses étoiles, des supergéantes rouges tel que VY Canis Majoris, ont des rayons allant jusqu'à 1500 rayons solaires !). Les naines blanches ont des rayons comparables à ceux des planètes. Dans cette figure est aussi indiquée la correspondance entre température et type spectral (établi par Cecilia Payne dans les années 1920).

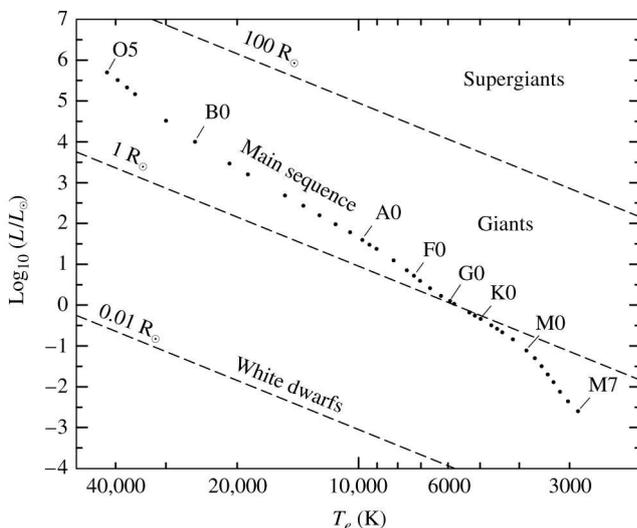


Fig.2. Diagramme HR théorique, où apparaissent les droites d'iso-rayon en pointillés. Les types spectraux sont notés sur la séquence principale.

La séquence principale correspond en fait à une séquence de masse. Les étoiles chaudes sont des étoiles massives, jusqu'à 100 masses solaires environ. Les étoiles froides sont des étoiles de (très) faible masse, les moins massives ayant une masse d'environ un dixième de masse solaire. Ces étoiles sont toutes dans le même stade évolutif : elles sont dans la phase de combustion de l'hydrogène en hélium au cœur, la réaction de fusion ayant le plus grand rendement énergétique. C'est donc la phase évolutive la plus longue (jusqu'à 90 % de la vie

¹ En passant aux logarithmes, la formule $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ devient $\log L = \log(4\pi R^2 \sigma) + 4 \log T$. Si $\log T$ est en abscisse (x) et $\log L$ en ordonnée (y), on obtient une équation de droite ($y = 4x + b$) où b dépend du rayon R .

d'une étoile) : c'est pour cette raison que la majorité des étoiles s'y trouvent. Les géantes rouges sont des étoiles de faible masse (moins de 10 masses solaires, les plus nombreuses à la naissance) dans un stade évolué (fusion de l'hydrogène en couche, puis fusion de l'hélium au cœur ou en couche autour du cœur qui finit par devenir inerte d'un point de vue nucléaire).

Construction d'un diagramme HR

La luminosité et la température effective ne sont pas mesurables directement. Un diagramme HR observationnel est donc basé sur des indicateurs de ces deux grandeurs.

Petit rappel : les magnitudes

L'éclat apparent (ou flux reçu sur Terre) E d'une étoile est généralement exprimé en magnitude :

$$m = -2,5 \log (E/E_0) \text{ (voir note } ^2)$$

où E_0 est un éclat de référence, choisi en fonction l'échelle de magnitude choisie. La plus courante est basée en prenant l'étoile Vega (α Lyrae) comme référence. Le choix d'une échelle logarithmique est basé sur la perception visuelle (échelle de Pogson, 1859). Le facteur $-2,5$ permet de se raccorder à l'échelle établie par Hipparque au II^e siècle av. J.-C.

On peut définir la magnitude bolométrique, basée sur le flux intégré sur l'ensemble du spectre électromagnétique. En pratique, on ne peut mesurer la magnitude que dans un domaine limité, défini par un filtre. Historiquement, on mesurait les magnitudes photographiques, correspondant approximativement au filtre bleu (B) moderne. Le filtre V, autour de 550 nm, est le plus courant. Pour remonter à la magnitude bolométrique à partir de celle mesurée dans un filtre donné, il faut appliquer une correction bolométrique, qui dépend du type spectral de l'étoile. On peut également calculer un indice de couleur qui est simplement la différence de magnitudes dans deux filtres. Une couleur peut être un indicateur de température, mais là aussi la conversion n'est pas universelle.

Enfin, on peut calculer la magnitude absolue M si on connaît la distance (par la méthode des parallaxes, par exemple). Cette magnitude absolue correspond à la magnitude qu'aurait l'étoile à une distance de référence, choisie à 10 pc. On définit alors le module de distance :

$$m - M = 5 \log (\text{distance en parsec}) - 5$$

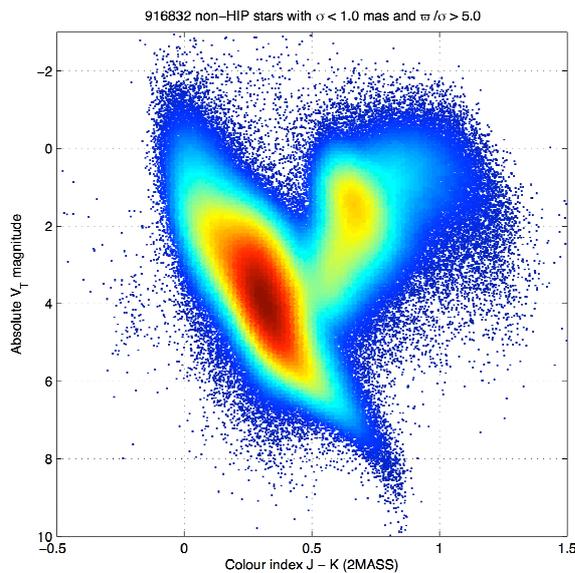
² Il s'agit bien ici, comme dans la suite, du logarithme décimal.

Enfin, il ne faut pas oublier de corriger les magnitudes de l'extinction interstellaire, pour avoir des mesures qui reflètent bien les propriétés intrinsèques de l'étoile observée.

Diagramme photométrique

À partir de mesures de magnitudes, on peut construire un diagramme HR photométrique. Le plus classique est la magnitude absolue en bande V en fonction de l'indice de couleur B-V.

Un exemple récent de diagramme photométrique est donné figure 4. En ordonnée, on a la magnitude V absolue, obtenue grâce aux premières mesures de parallaxes provenant de la mission spatiale Gaia, lancée en décembre 2012 (la photométrie en bande V avait été obtenue avec HIPPARCOS, le prédécesseur de Gaia, lancé en 1989). La couleur en abscisse est une couleur infrarouge (les filtres J et K correspondent à des longueurs d'onde de 1,25 et 2,2 μm approximativement), issues du relevé complet du ciel 2MASS (2 Micron All Sky Survey) réalisé dans les années 1990 (cette couleur infrarouge est sensible à la température, et l'infrarouge est peu affecté par l'extinction interstellaire). Plus de 900 000 étoiles y sont reportées. On reconnaît bien la séquence principale et la région des géantes rouges. La forme de ces régions diffère cependant de celles qu'on verrait dans un diagramme température – luminosité, puisque la conversion n'est pas constante. Étant donné le nombre d'étoiles, on a choisi de représenter plutôt la densité d'étoiles par une couleur, du bleu (peu d'étoiles) au rouge sombre (le plus dense).



© ESA

Fig.3. Premier diagramme HR issu des données obtenues avec le satellite GAIA, mission astrométrique de l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

Ce diagramme est essentiellement limité en magnitude : les étoiles naines rouges sont très nombreuses, mais peu lumineuses, et donc observables uniquement dans le voisinage solaire. Au contraire, les étoiles bleues, massives, sont très rares mais détectables à beaucoup plus grande distance. La densité de points dans ce diagramme ne reflète donc pas l'importance relative de chacune des populations stellaires dans la Galaxie ! Les étoiles de type solaire se situent dans la zone la plus dense, représentée en rouge foncé.

Diagramme spectroscopique

Les données spectroscopiques, analysées via la comparaison avec des spectres synthétiques (issus de modèles d'atmosphères stellaires), fournissent aussi des paramètres permettant de construire un diagramme HR. La température effective étant un des paramètres qui définissent les modèles d'atmosphère, l'abscisse est immédiate.

Par contre, les spectres sont très peu sensibles à la luminosité totale des étoiles. On reporte donc en ordonnée la gravité de surface ($g = GM/R^2$, où G est la constante de gravitation universelle, M la masse de l'étoile et R son rayon). Une faible gravité de surface va correspondre à une atmosphère stellaire plus diluée, et donc des collisions entre atomes plus rares. Or les collisions engendrent un élargissement spécifique des raies spectrales ; on peut donc déterminer la gravité à partir des profils de raies (ceci nécessite donc des spectres à très haute résolution spectrale, de l'ordre de quelques km/s). Comme mentionné ci-dessus, la connaissance de la température et du rayon de l'étoile permet de calculer la luminosité. Mais comme la masse des étoiles est l'un des paramètres les plus difficiles à déterminer, on se contente de la gravité...

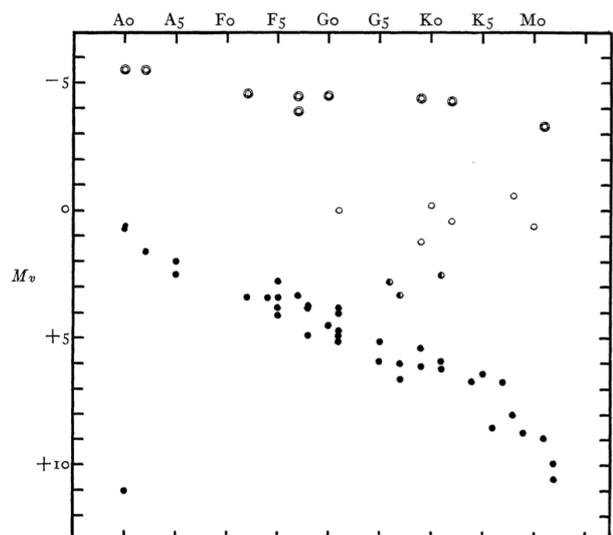


Fig.4a. Diagramme HR classique.

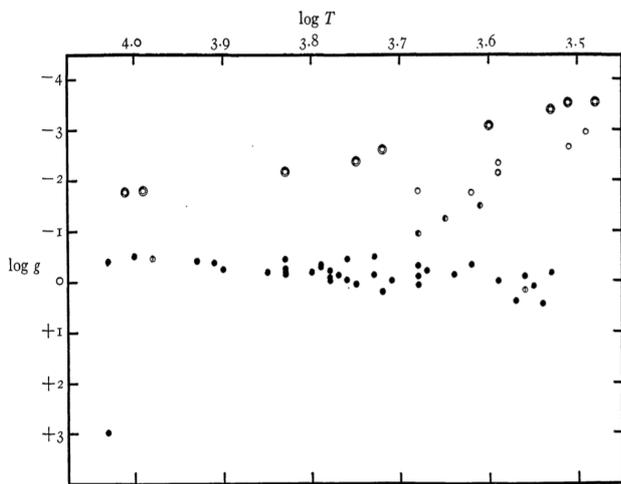


Fig.4b. Diagramme HR des mêmes étoiles mais gradué en gravité de surface (g). On voit la différence d'allure avec le précédent mais la séparation des catégories est maintenue.

Les symboles correspondent aux naines (points), sous-géantes (cercles à moitié remplis), géantes (cercles vides) et supergéantes (cercles doubles). L'étoile tout en bas est une naine blanche, la même que celle de Russell. La gravité est en unités solaires. (W. W. Keenan, 1973).

L'intérêt de ce diagramme est qu'il peut aussi être produit par les codes d'évolution stellaire, ce qui permet d'effectuer des comparaisons directes entre observations et modèles.

Utilisation d'un diagramme HR

L'intérêt immédiat du diagramme HR est de suivre l'évolution des étoiles. La figure 5 permet de suivre l'évolution d'une étoile comparable au Soleil.

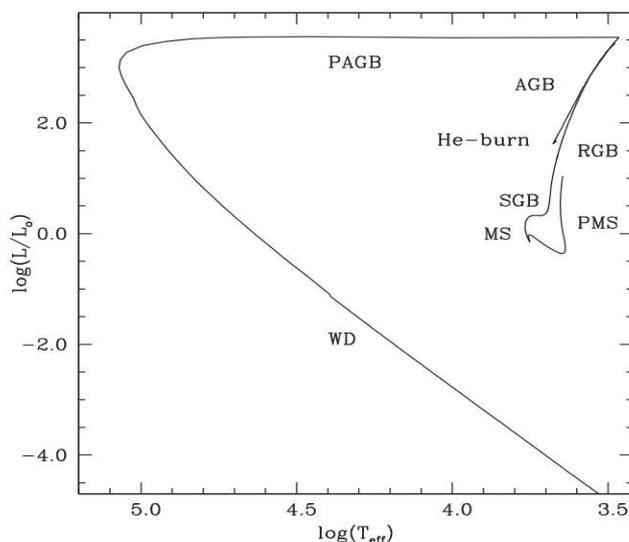


Fig.5. Tracé évolutif d'une étoile de 1 masse solaire dans le diagramme HR.

Les stades évolutifs mentionnés sur la figure sont, dans l'ordre chronologique :

- pré-séquence principale (PMS) ;
- séquence principale (MS) ;
- branche des sous-géantes (SGB) ;
- branche des géantes rouges (RGB) ;
- début de la combustion de l'hélium (He-burn) ;
- branche asymptotique des géantes (AGB) ;
- post-AGB (ou pré-nébuleuse planétaire) ;
- naine blanche (WD).

Le diagramme HR des amas stellaires permet aussi de mesurer la distance et l'âge de ces amas. En effet, si on compare le diagramme HR de deux amas, leurs séquences principales sont parallèles, avec un décalage vertical qui ne dépend que de la distance relative de ces deux amas. Si on dispose d'un diagramme calibré en distance, on peut déduire de ce décalage la distance de tout autre amas.

Concernant l'âge, on utilise le fait que la durée de vie des étoiles diminue quand leur masse augmente (approximativement, la durée de vie est inversement proportionnelle au carré de la masse). Dans un amas (ouvert ou globulaire), toutes les étoiles se sont formées à peu près à la même époque. Au cours du temps, la séquence principale va donc se dépeupler progressivement, en partant du haut, des étoiles les plus massives. Le point le plus haut de la séquence principale encore peuplée (appelé point de « turn-off ») est donc un indicateur de l'âge de l'amas.

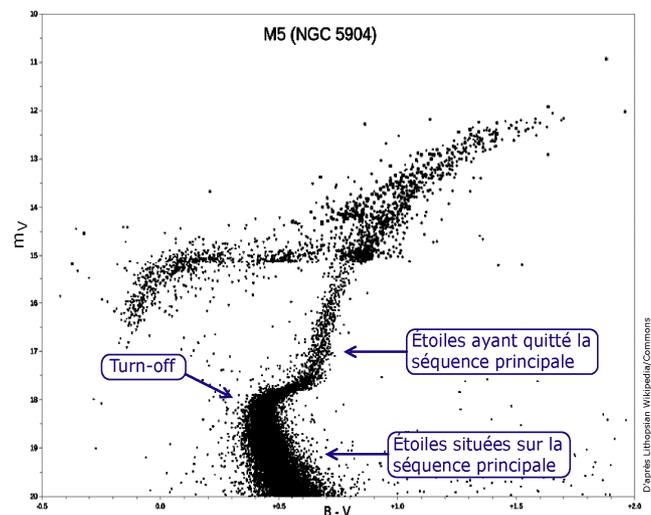


Fig.6. Diagramme HR des étoiles de l'amas globulaire M5. L'amas a un module de distance $m - M$ d'environ 14,5 (ce qui correspond à une distance d'environ 8 000 parsecs) et un âge de 11,5 milliards d'années.

Ces deux aspects sont illustrés dans l'un des exercices conçus par l'ESA et l'ESO, directement utilisables en classe (niveau lycée). Il vise à déterminer la distance et l'âge de l'amas globulaire M12, à partir d'observations obtenues au VLT (http://www.eso.org/public/products/education/edu_0042/)