

LE MENSUEL DE RÉFÉRENCE DES SCIENCES DE L'UNIVERS

L'ASTRONOMIE

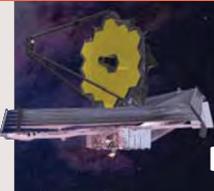
# L'ASTRONOMIE

N° 117 / JUIN 2018

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE FRANCE



**COLLISIONS!**  
ELLES ONT FAÇONNÉ  
LES PLANÈTES



**JWST**  
LA NOUVELLE  
GÉNÉRATION  
DE TÉLESCOPE



TOUT L'ÉTÉ  
LA PLANÈTE  
**JUPITER**

STRUCTURE DE L'UNIVERS

# L'ORIGINE CACHÉE DES AMAS GLOBULAIRES

BELGIQUE / LUXEMBOURG : 6,80 € - SUISSE : 10,90 CHF

M 02605 - 117 - F: 6,20 € - RD



CNL



# LES AMAS GLOBULAIRES CACHENT BIEN LEUR JEU

## L'ESSENTIEL

Les amas globulaires font partie des structures les plus anciennes de l'Univers. On en trouve dans le voisinage de bon nombre de galaxies. Pendant longtemps, on a cru qu'ils étaient issus d'un seul épisode de formation dans un nuage moléculaire de composition chimique homogène. Mais depuis une quinzaine d'années, cette vision assez simple est complètement remise en question : les amas globulaires sont formés de populations multiples qui se distinguent par des empreintes chimiques particulières. Quelle est donc l'histoire de ces amas, et pourquoi a-t-on dû attendre si longtemps avant que leur vraie nature ne se révèle ?

L'amas globulaire Messier 13  
capturé par le télescope spatial *Hubble* (Nasa).

Lorsque l'on regarde le ciel par une belle nuit d'été, on peut apercevoir la constellation d'Hercule quasiment au zénith. On y reconnaît le buste du personnage mythologique sous la forme d'un trapèze. Avec un peu d'expérience et un basique atlas du ciel, on peut repérer une légère tache diffuse sur le côté droit du trapèze, à peu près aux deux tiers de sa longueur en partant de l'étoile du bas. Cette tache, bien visible avec des jumelles ou un petit télescope, c'est l'amas globulaire M13, soit le 13<sup>e</sup> objet du catalogue de Charles Messier.

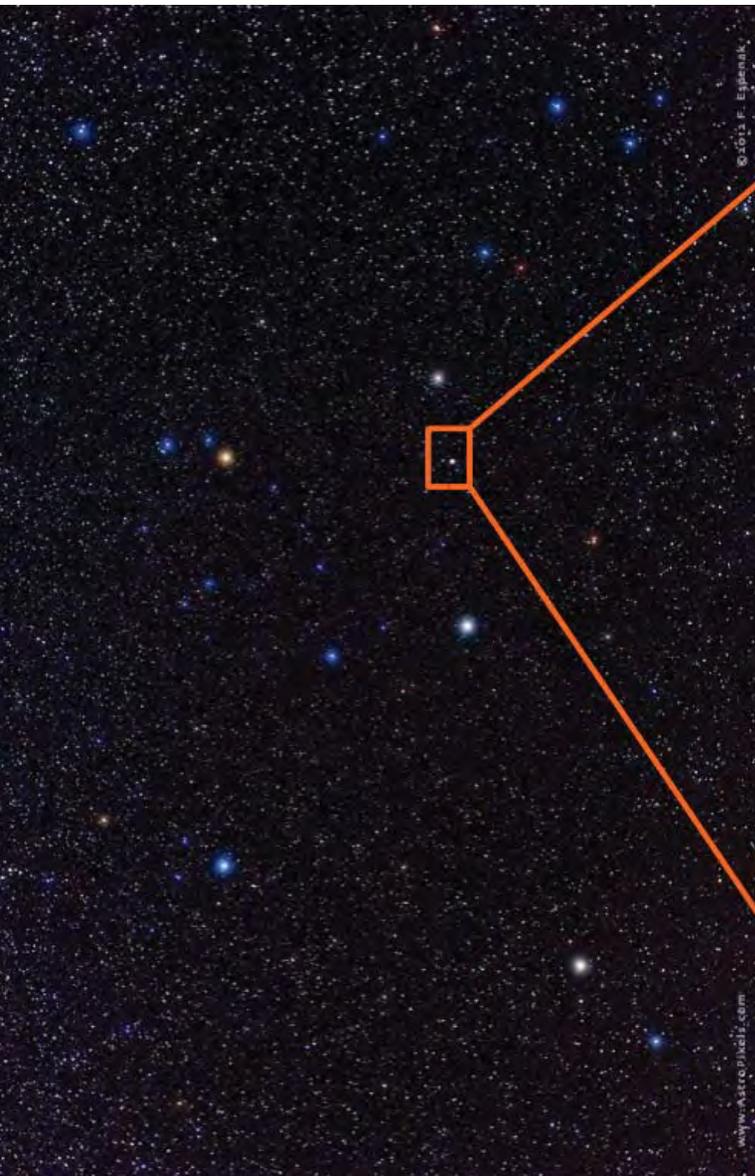
**A**vec de simples observations, on constate que M13 a une forme globalement arrondie, avec un maximum de lumière au centre puis une distribution qui diminue lorsque l'on s'en éloigne. Les télescopes révèlent qu'il ne s'agit pas d'une distribution continue de lumière, mais bien d'une multitude de points brillants : un amas globulaire, c'est avant tout un amas d'étoiles. La partie droite de la figure 1 donne un bon aperçu de ce que l'on peut observer à l'œil, au moyen de petits instruments, pour peu que la nuit soit bien noire et l'atmosphère calme.

Un amas globulaire est donc un regroupement d'étoiles dans une structure relativement sphérique. Il y en a bon nombre dans notre ciel. Sur les 110 objets que contient le catalogue Messier, 29 sont des amas globulaires, soit plus d'un quart du catalogue. Dans notre Galaxie,

la Voie lactée, on estime leur nombre à environ 150. Dans d'autres galaxies, ce chiffre peut monter à plusieurs centaines, voire des milliers. Les amas globulaires sont donc des structures, à part entière, des galaxies qui nous entourent. Dans la Voie lactée, on les trouve principalement dans le halo, car ils orbitent autour de son centre. Statistiquement, ils ont donc plus de chance d'être vus hors du disque galactique (dans le halo) que dans le disque. Leur taille typique est d'une dizaine d'années-lumière (si l'on considère le rayon de demi-lumière, c'est-à-dire le rayon auquel l'intensité lumineuse est la moitié de celle au centre de l'amas, là où elle est maximale). Par rapport à un amas ouvert, un amas globulaire est plus dense : il contient à peu près dix étoiles par année-lumière au cube en son centre, contre une étoile pour un amas ouvert. Un amas globulaire est aussi plus vieux : la plupart ont

des âges dépassant les dix milliards d'années. Ce sont donc des structures qui se sont formées au tout début de l'Univers et qui ont été témoins de sa prime jeunesse.

Un amas globulaire contient ainsi un grand nombre d'étoiles âgées de plusieurs milliards d'années. Ces étoiles sont observables individuellement si on utilise de puissants télescopes tels que le télescope spatial *Hubble* (*HST*) ou le Very Large Telescope (*VLT*) de l'observatoire européen austral. La figure 2 montre l'amas M15 comme le voit le *HST*. On y distingue des étoiles brillantes de couleur rouge orangé qui se superposent à une multitude d'étoiles moins brillantes et plutôt blanchâtres. D'autres étoiles encore apparaissent bleues. Un amas globulaire contient donc des étoiles de natures variées et est ainsi un laboratoire idéal pour étudier leurs propriétés et leur évolution. C'est comme tels qu'ils ont été



1. La constellation d'Hercule et l'amas globulaire M13.  
(Frank Espenak, Michael Richmann)

considérés pendant longtemps. On pensait en effet qu'ils avaient été formés en un temps court, de sorte que toutes leurs étoiles avaient le même âge et la même composition chimique (notamment la célèbre métallicité, c'est-à-dire le contenu en éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium). Ces deux grandeurs affectant les propriétés et l'apparence des étoiles, les réduire à une seule valeur pour toutes les étoiles d'un amas donné facilitait grandement l'étude de ces dernières. On pouvait ainsi se concentrer

sur d'autres processus physiques affectant l'évolution stellaire (par exemple la rotation, le champ magnétique, la diffusion atomique...). Mais voilà, ce cadre quasi idéal pour la compréhension des étoiles s'est écroulé au début des années 2000. La faute, entre autres, à ces fameuses *HST* et *VLT*.

**UNE IDENTITÉ BIEN CACHÉE :**  
les populations multiples

Un des outils les plus anciens mais aussi les plus performants pour étudier des en-

sembles stellaires (amas, associations, galaxies) est le diagramme couleur-magnitude (voir encadré 1). Il a un sens car toutes les étoiles de l'amas sont approximativement à la même distance de l'observateur. C'est le pendant observationnel du célèbre diagramme de Hertzsprung-Russell, qui relie la luminosité à la température de surface des étoiles. Dans ces deux diagrammes, les étoiles se répartissent dans des zones bien précises selon leur masse et leur âge (et au deuxième ordre selon tout un tas d'autres paramè-



2. L'amas globulaire M15 observé par le télescope spatial *Hubble*. (NASA/ESA/Hubble)

tres physiques). Les étoiles évoluant d'autant plus vite que leur masse initiale est élevée, si l'on observe un amas composé d'étoiles ayant une large distribution de masses, le diagramme couleur-magnitude n'est pas peuplé aléatoirement : les étoiles les plus massives (et qui n'ont pas encore disparu) vont se trouver sur la branche horizontale, la branche des géantes ou la branche asymptotique des géantes, branches qui correspondent à des stades avancés de l'évolution des étoiles. Les étoiles les moins massives, en revanche,

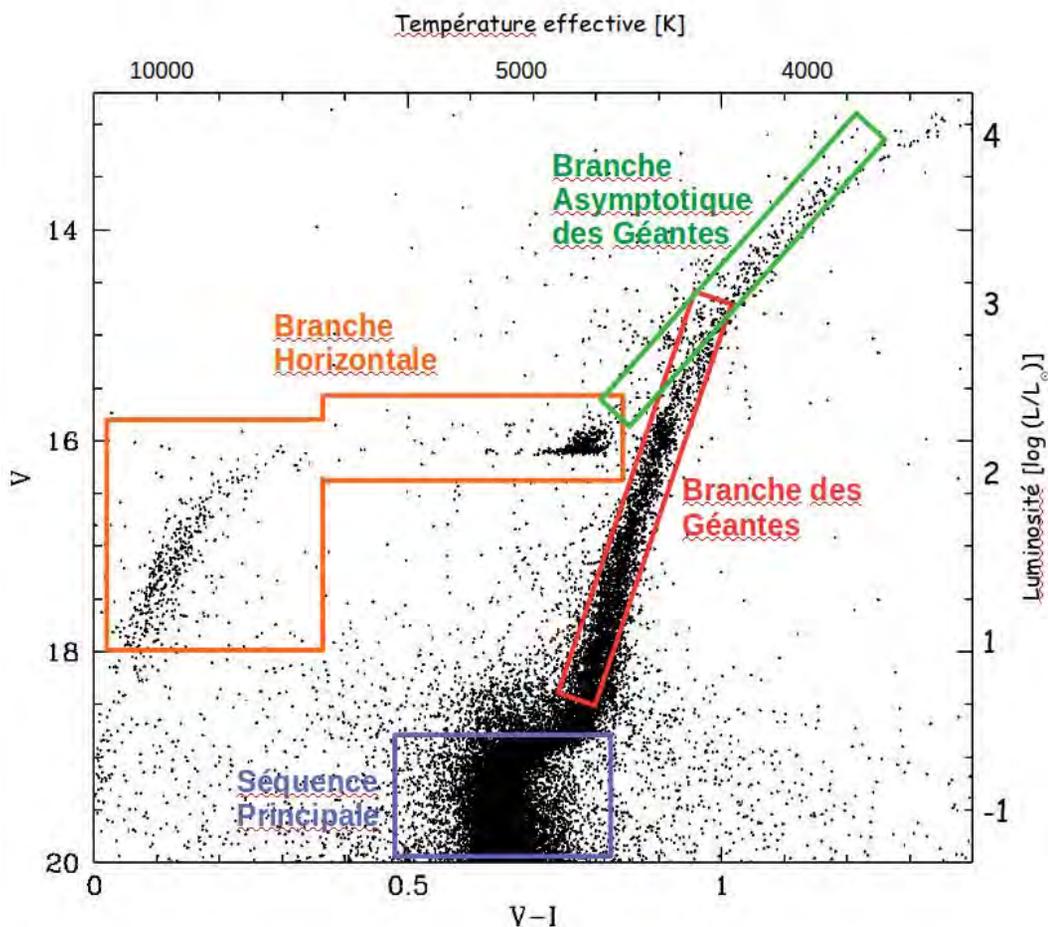
seront sur la séquence principale, zone du diagramme couleur-magnitude où les étoiles passent 90 % de leur vie à transformer l'hydrogène de leur cœur en hélium. Dans la figure de l'encadré 1, on distingue ces diverses séquences et branches. Si les étoiles d'un amas s'étaient toutes formées en même temps et avec la même composition chimique, on devrait observer des séquences et branches bien définies, comme cela semble être le cas sur la partie gauche de la figure 3 qui correspond au cas de l'amas globulaire NGC 2808 (la dis-

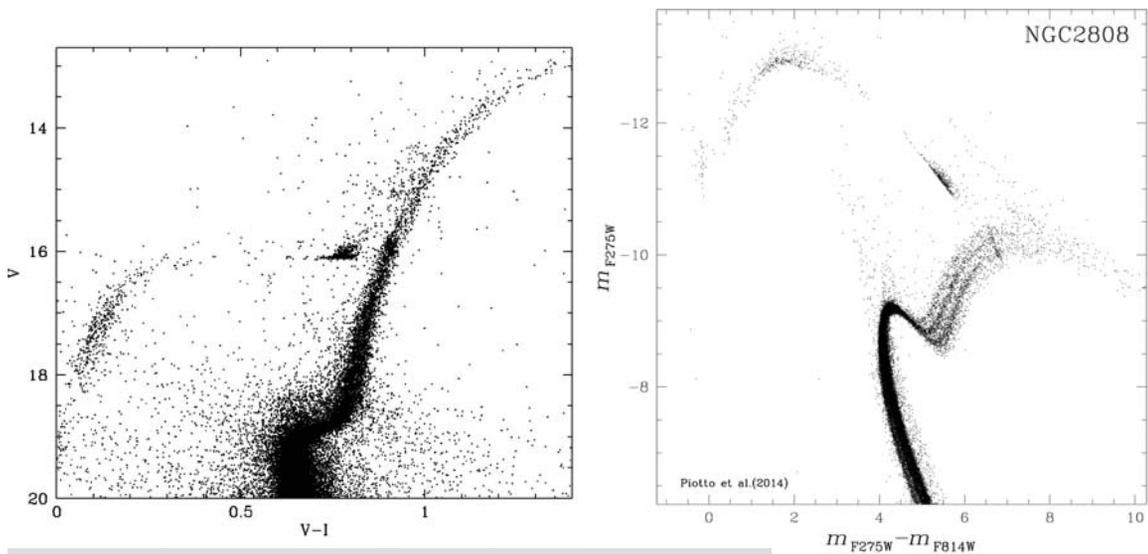
persion, plus forte vers le bas de la figure, pouvant être attribuée aux erreurs de mesures notamment). Sauf que si l'on regarde la partie droite de la figure qui représente un autre diagramme couleur-magnitude du même amas construit avec d'autres observations, on n'est plus du tout dans ce cas simple : les branches des géantes rouges et asymptotiques des géantes montrent des séquences parallèles (au moins trois sur la figure 3 et en réalité cinq comme montré par Milone *et al.* [1]) et non plus une seule et fine séquence. Si

# 1. LE DIAGRAMME DE HERTZSPRUNG-RUSSELL

Le **diagramme de Hertzsprung-Russell** (noté HR) relie la luminosité à la température effective d'une étoile. La luminosité est la quantité d'énergie émise par unité de temps par l'étoile, sous forme de lumière. On l'exprime généralement relativement à la luminosité du Soleil (notée  $L_{\odot}$ ). La température effective est une grandeur physique reliée à la luminosité et au rayon de l'étoile. Elle est souvent assez proche de la température à la surface de l'étoile. Le diagramme HR nécessite de déterminer à la fois la luminosité et la température par des mesures et des calculs, voire des modèles. Ce n'est pas un diagramme que l'on peut construire directement à partir d'observations. Au contraire, le **diagramme couleur-magnitude** provient directement de ces dernières. Il relie la magnitude (c.-à-d. égale à  $-2,5$  logarithme du flux de lumière dans un domaine de longueur d'onde restreint et

défini – une bande spectrale) à la couleur (la différence des magnitudes prises dans deux bandes spectrales distinctes). La magnitude est liée à la luminosité, la couleur à la température. Ainsi, le diagramme de Hertzsprung-Russell est-il en quelque sorte le pendant « théorique » ou « fondamental » du diagramme couleur-magnitude. La figure ci-dessus montre de **manière schématique** les relations entre ces deux diagrammes : le diagramme HR est identifié par la luminosité sur l'axe vertical de droite et la température effective sur l'axe horizontal du haut ; le diagramme couleur-magnitude est repéré par la couleur V-I sur l'axe horizontal du bas et la magnitude V sur l'axe vertical de gauche. Y sont indiquées également les différentes séquences et branches distinctes de l'évolution des étoiles. La figure est construite à partir des données de Soto *et al.* et Piotto *et al.*



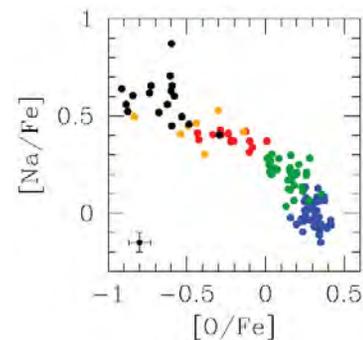


↑3. Diagrammes couleur-magnitude de l'amas NGC 2808. À gauche, diagramme basé sur les magnitudes V et I, construit à partir des données de Soto *et al.* [2] et Piotto *et al.* [3]. À droite, diagramme basé sur les magnitudes HST/WFC3 prises dans les filtres F275W et F814W. Tiré de Piotto *et al.* – (FIGURE EN BAS ET À DROITE) → 4. Relation entre les abondances de sodium, d'oxygène et de fer dans les étoiles de l'amas NGC 2808, d'après le travail de Carretta *et al.* [4]. Les couleurs correspondent à différentes populations de l'amas, comme expliqué dans le texte.

l'on regarde bien, même la séquence principale est décomposée en plusieurs morceaux parallèles. Cette particularité – la présence de diverses séquences parallèles dans les diagrammes couleur-magnitude – est, on le sait aujourd'hui, partagée par quasiment tous les amas globulaires. Elle en est presque devenue un critère de définition d'un amas globulaire. Pour décrire ces séquences, on parle de « populations multiples », car il s'avère que les étoiles qui constituent ces séquences ont des propriétés propres et différentes d'une séquence à l'autre. C'est d'ailleurs ces propriétés qui expliquent que les amas globulaires apparaissent si différents d'un diagramme couleur-magnitude à l'autre. De quoi s'agit-il exactement ?

Pour le comprendre, on peut inspecter la figure 4. Elle nous montre, toujours pour l'exemple des étoiles de l'amas NGC 2808, le rapport du contenu en sodium sur le contenu en fer (en relatif par rapport à la valeur de ce rapport dans le Soleil) en fonction du rapport du contenu en oxygène sur le contenu en fer. On constate que les étoiles de l'amas pour lesquelles on a pu mesurer ces rapports se placent sur une diagonale. L'abondance de fer étant la

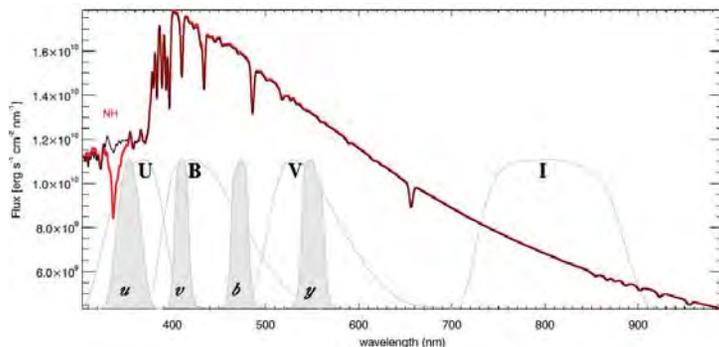
même dans toutes les étoiles (c'est le cas de la plupart des amas globulaires), on en conclut que les étoiles ayant le plus de sodium à leur surface ont aussi le moins d'oxygène, et vice versa. On parle d'anticorrélation sodium-oxygène. L'analyse d'autres éléments chimiques révèle d'autres anticorrélations : entre l'azote et le carbone, entre le magnésium et l'aluminium. Un point important de la représentation sur la figure 4 est le code de couleur : chaque couleur correspond à des étoiles tirées de l'une des séquences observées sur la partie droite de la figure 3. Autrement dit, chaque population d'étoiles a des abondances de surface particulières. Concrètement, les étoiles en bleu sur la figure 4 sont celles qui sont sur la séquence de la branche des géantes la plus à droite dans la figure 3 ; de même, les étoiles en noir sur la figure 4 sont celles de la séquence la plus à gauche sur la figure 3. Il y a également un lien avec le contenu en hélium : plus une étoile est riche en hélium, plus elle se place dans une séquence vers la gauche dans la figure 3. Il y a donc une relation univoque entre la composition chimique des étoiles et l'existence de séquences dans les diagrammes couleur-magnitude.



Mais pourquoi ne voit-on rien dans le diagramme V-V-I à gauche dans la figure 3 ?

La subtilité vient du fait que la composition chimique de surface impacte différemment le spectre de l'étoile en fonction de la longueur d'onde. Or, les diagrammes couleur-magnitude sont construits à partir d'observations dans des bandes bien précises de ce spectre : si l'on sélectionne une bande qui est affectée par la composition chimique, alors on voit une différence, sinon on ne voit rien.

Pour mieux comprendre cet effet, la figure 5 est instructive. On y voit deux spectres dits synthétiques, c'est-à-dire calculés numériquement. La différence entre les deux est simplement l'abondance d'azote qui a été augmentée dans le spectre rouge. On voit que l'absorption due à la molécule NH est plus forte vers 300 nm. En conséquence, une observation faite dans le filtre U donnera une



5. Spectre synthétique d'une étoile (en noir) dans lequel a été augmentée artificiellement l'abondance d'azote (spectre en rouge). Les courbes en gris donnent les bandes passantes des filtres uvby et UBV. Figure adaptée de Sbordone *et al.* [5]

magnitude plus grande pour le spectre rouge que pour le spectre noir. En revanche, dans les bandes V et I, il n'y a aucune différence entre les deux spectres, donc les magnitudes (et la couleur V-I) sont les mêmes pour les deux. C'est ainsi que dans un diagramme basé sur les magnitudes V et I (comme à gauche de la figure 3) on ne différencie pas les populations ayant des abondances différentes, alors que dans un diagramme basé sur des filtres incluant des absorbants sensibles aux abondances chimiques (par exemple le filtre U, ou bien le filtre F275W du *HST* dans la figure 3, à droite) les populations ont des magnitudes et des couleurs différentes et sont donc séparées. Cela explique que l'on n'ait pas détecté ces populations multiples dès le début de l'observation des amas globulaires : à l'époque, on ne travaillait qu'avec des filtres insensibles aux abondances. Aujourd'hui, on peut sélectionner des filtres spécifiques pour les séparer.

### L'ORIGINE DES POPULATIONS MULTIPLES

La caractéristique principale des populations multiples dans les amas globulaires est donc leur composition chimique différente, caractérisée par des anti-corrélations entre certains éléments. D'où vient cette diversité ?

La réponse s'impose naturellement dès que l'on comprend que l'on ne peut pas obtenir ces relations n'importe comment. Pour avoir à la fois un enrichissement en azote et un appauvrissement en carbone, le mécanisme le plus probable est la fu-

**Il y a donc une relation univoque entre la composition chimique des étoiles et l'existence de séquences dans les diagrammes couleur-magnitude.**

sion de l'hydrogène en hélium via le cycle CNO (voir l'encadré 2). Ce processus de nucléosynthèse (création d'éléments *via* des réactions nucléaires) permet de produire un excès d'azote au détriment du carbone et de l'oxygène : on a donc naturellement une anti-corrélation entre azote et carbone. Aux températures requises pour que ce processus se produise (plusieurs dizaines de millions de degrés), d'autres réactions nucléaires sont à l'œuvre, notamment les chaînes néon-sodium et magnésium-aluminium qui produisent du sodium et de l'aluminium et détruisent le néon et le magnésium. Ainsi sont obtenues les anti-corrélations sodium-oxygène et magnésium-aluminium observées dans les amas globulaires. Les caractéristiques chimiques des populations multiples sont ainsi le fruit de réactions nucléaires se produisant à haute température. Reste à savoir où ces réactions se produisent.

On peut déjà écarter les étoiles des amas globulaires elles-mêmes comme produc-

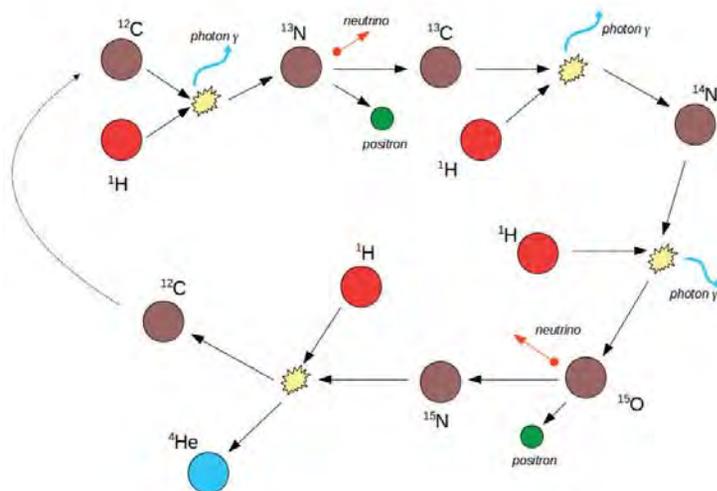
teurs potentiels. En effet, les températures atteintes en leur cœur sont bien en dessous des quelques dizaines de millions de degrés requis. En réalité, ces conditions ne sont rencontrées que dans deux types d'environnements : le cœur des étoiles massives (c.-à-d. de plus de quelques dizaines de masses solaires) ou bien une couche de combustion de l'hydrogène dans certaines étoiles de la branche asymptotique des géantes (étoiles AGB).

Un constat s'impose : puisque les étoiles actuellement présentes dans les amas globulaires ne sont pas capables de produire la diversité des compositions chimiques observées, alors il a fallu qu'elles soient polluées par les produits de la nucléosynthèse créés soit dans des étoiles massives, soit dans des étoiles AGB. La plupart des scénarios tentant d'expliquer l'origine des populations multiples dans les amas globulaires considèrent ainsi qu'une première génération d'étoiles a injecté les produits de nucléosynthèse dans le milieu environnant, milieu à partir duquel s'est formée une seconde génération d'étoiles. Les premières étoiles massives ou AGB ayant des temps de vie (très) inférieurs à dix milliards d'années, elles ont complètement disparu des amas globulaires dans lesquels ne restent plus que les étoiles les moins massives de la première génération (étoiles non polluées) et celles (toujours les moins massives) de la seconde génération, étoiles « polluées » en éléments chimiques. On observerait donc aujourd'hui dans les étoiles des amas globulaires les empreintes chimiques de la nucléosynthèse s'étant produite dans certaines étoiles de première génération. Les populations multiples seraient formées d'étoiles de masse suffisamment petite pour être encore visibles et issues pour partie de la première génération (étoiles ne montrant pas les empreintes de nucléosynthèse – les points bleus dans la figure 4) et pour partie de la seconde génération (étoiles montrant divers degrés de « pollution » – les points orange, verts, rouges et noirs de la figure 4).

L'affaire semblerait donc entendue : les amas globulaires se seraient formés en deux temps et les populations multiples résulteraient de cette histoire complexe. En réalité, cela n'est pas si simple. Plusieurs problèmes sévères contrarient ce scénario.

## 2. LE CYCLE CNO

La fusion de l'hydrogène en hélium se fait habituellement par ce que l'on appelle la chaîne proton-proton où, comme son nom l'indique, seulement des protons sont mis en jeu. Mais lorsque les températures deviennent très élevées, comme dans le cœur des étoiles massives ou les couches de certaines étoiles AGB, une autre réaction prend le dessus : c'est le cycle CNO. Le fonctionnement de sa branche principale est montré sur la figure ci-contre. En partant d'un proton, et en faisant intervenir du carbone, on produit de l'hélium de même que des produits intermédiaires tels que l'azote. Toutes les réactions du cycle ne se produisent pas à la même vitesse, de sorte que dans une situation d'équilibre, il y a accumulation de  $^{14}\text{N}$  et diminution de la quantité de  $^{12}\text{C}$ .



Tout d'abord, pour pouvoir reproduire les abondances particulières des étoiles observées aujourd'hui, il faut une quantité faramineuse de « polluants » issus de la première génération d'étoiles. Cela impose que cette première génération ait été au moins dix fois plus abondante que la génération actuelle. Or, aujourd'hui, on observe que peu d'étoiles issues de la première génération et assez peu massives pour être encore présentes (moins de 30 % du total des étoiles des amas). Il faudrait donc que l'essentiel des étoiles de cette première génération ait été éjecté de l'amas, ce qui est difficilement réalisable. Une autre solution consiste à invoquer non pas un grand nombre de « pollueurs », mais un petit nombre de « pollués » : il faudrait que la seconde génération n'ait formé que des étoiles de masse inférieure à 0,8 fois la masse du Soleil. Ce qui là encore est parfaitement inhabituel.

Un autre souci concerne le contenu en hélium des étoiles « polluées ». En effet, le cycle CNO produit de l'hélium et on devrait donc trouver des étoiles riches en cet élément parmi les populations multiples. Cela semble être effectivement le cas (voir par exemple Milone *et al.* [6]), mais les contraintes actuelles indiquent que l'enrichissement en hélium observé reste limité, en tout cas par rapport à ce que produisent des étoiles massives. Ce qui a conduit à

l'introduction d'étoiles « supermassives » de plusieurs milliers de masses solaires comme pollueurs potentiels (voir Denissenkov & Hartwick [7]), ces objets pouvant produire rapidement l'azote, le sodium et le magnésium sans trop créer d'hélium. Problème : ces étoiles restent hypothétiques – on n'en a jamais observé – et leur stabilité n'est pas assurée.

Un autre problème encore avec le scénario des générations successives : si l'on regarde la figure 3, on voit très clairement des séquences d'étoiles bien séparées dans le diagramme couleur-magnitude. Or, d'après la figure 4, la distribution des abondances ne montre pas d'interruption. Comment, si les abondances de surface sont à l'origine des populations multiples, expliquer qu'elles aient une distribution continue alors que des séquences discrètes sont observées dans les diagrammes couleur-magnitude ?

### CONCLUSION

La liste des problèmes rencontrés pour expliquer l'ensemble des propriétés des amas globulaires est longue (on peut en trouver une description exhaustive dans la revue de Bastian & Lardo, 2017, arXiv17201286B). Elle montre que la révolution observationnelle qu'ont subie les amas globulaires lors des vingt dernières années a jeté un doute profond sur leur

nature et leur origine. On est aujourd'hui bien loin du scénario de formation quasi instantané à partir d'un nuage de gaz homogène. Et aussi bien loin du statut d'objet standard pour étudier l'évolution des étoiles. Aujourd'hui, la seule chose que l'on peut affirmer clairement quant à l'origine des amas globulaires, c'est qu'elle est bien mystérieuse. De quoi alimenter bon nombre d'études futures, notamment celles basées sur des observations avec les futurs grands télescopes tels que l'E-ELT européen (Extremely Large Telescope) qui est actuellement en construction au Chili. Les amas globulaires n'ont pas fini de faire parler d'eux. ■

[1] Milone *et al.*, 2015, « The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic Globular Clusters. III. A Quintuple Stellar Population in NGC 2808 », *AJ*, 808, 51. [2] Soto *et al.* 2017, « The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic Globular Clusters. VIII. Preliminary Public Catalog Release » *AJ*, 153, 19. [3] Piotto *et al.*, 2015, « The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic Globular Clusters. I. Overview of the Project and Detection of Multiple Stellar Populations », *AJ*, 149, 91. [4] Carretta E., 2015, *AJ*, « Five Groups of Red Giants with Distinct Chemical Composition in the Globular Cluster NGC 2808 », 810, 148. [5] Sbordone *et al.*, 2011, « Photometric signatures of multiple stellar populations in Galactic globular clusters », *A&A*, 534, A9. [6] Milone *et al.*, 2013, « A WFC3/HST View of the Three Stellar Populations in the Globular Cluster NGC 6752 », *AJ*, 767, 120. [7] Denissenkov & Hartwick, 2014, « Supermassive stars as a source of abundance anomalies of proton-capture elements in globular clusters », *MNRAS*, 437, L2.