

LES EXOS D'ASTRO DE L'ESA/ESO

Une série d'exercices d'astronomie
à partir d'images du télescope
spatial Hubble (NASA/ESA)
et des télescopes terrestres de l'ESO



Exercice 4

Mesurer la distance et l'âge d'un Amas globulaire
à partir d'observations du VLT de l'ESO



Table des matières

Les Exos d'Astro de l'ESA/ESO — 4

Préface

- Préface page 2

Introduction

- Les étoiles page 3
- La fusion de l'hydrogène page 3
- Les amas d'étoiles page 3
- Les amas globulaires page 3
- L'amas globulaire Messier 12 page 6
- Le diagramme Hertzsprung-Russel page 6
- Evolution stellaire dans le diagramme H-R page 6
- L'indice de couleur (B-V) page 8
- Le diagramme H-R, clé de l'énigme page 8

Objectifs

- Observations, réduction de données et analyse page 9
- Conseils pour l'analyse d'images page 9
- Objectif 1 Entraînement (magnitudes B) page 9
- Objectif 2 Etalonnage (magnitudes B) page 9
- Objectif 3 Magnitudes B des zones A, B, C et D page 9
- Objectif 4 Entraînement (magnitudes V) page 9
- Objectif 5 Etalonnage (magnitudes V) page 9
- Objectif 6 Magnitudes V des zones A, B, C et D page 10
- Objectif 7 Indice de couleur page 10
- Objectif 8 Température de surface page 10
- Objectif 9 Le diagramme H-R page 10
- Objectif 10 Module de distance page 10
- Objectif 11 Distance de l'amas M12 page 10
- Objectif 12 Correction de l'extinction page 10
- Objectif 13 page 15
- L'évolution des amas globulaires page 16
- Objectif 14 page 16
- Objectif 15 page 16
- Objectif 16 page 16

Calculs supplémentaires

- Objectif 17 page 17
- Objectif 18 page 18

Lectures conseillées

- Articles scientifiques page 19

A l'attention du professeur

- A l'attention du professeur page 21



Préface

Les Exos d'Astro de l'ESA/ESO - 4

Mesurer la distance et l'âge d'un amas globulaire

L'astronomie est une science accessible et visuelle, faisant d'elle un outil pédagogique idéal pour l'enseignement. Au cours des dernières années, le télescope spatial Hubble (NASA/ESA) ainsi que les télescopes terrestres de l'ESO (situés à La Silla et à Paranal au Chili) nous ont présenté des vues nouvelles et toujours plus spectaculaires de l'Univers. Ces instruments n'ont pas simplement fourni des images étonnantes, ils sont aussi devenus d'inestimables outils pour les astronomes. Grâce à leur excellente résolution angulaire (netteté de l'image), ils permettent de voir plus loin que jamais dans l'Univers et de répondre à des questions restées jusque-là non élucidées.

Si l'analyse de ces observations est souvent très sophistiquée, il arrive que son principe soit suffisamment élémentaire pour que de jeunes étudiants de niveau secondaire puissent en faire une exploitation simple.

C'est dans cette optique que l'ESA (Agence Spatiale Européenne) qui dispose de 15% du temps d'observation sur Hubble et l'ESO (Observatoire Austral Européen) ont élaboré conjointement cette série d'exercices.



Figure 1 : Le VLT (Very Large Telescope) de l'ESO

Le VLT situé à Paranal (Atacama, Chili) est actuellement le plus grand et le plus avancé des télescopes optiques. Grâce à une résolution et une surface impressionnantes, le VLT produit des images très fines et peut capter la lumière provenant des objets les plus faibles et les plus lointains de l'Univers.



Introduction

Les étoiles

Une étoile est une boule de gaz lumineuse géante caractérisée par sa masse, sa température et son rayon. Les astronomes s'intéressent également aux distances entre les étoiles et la Terre. L'étoile la plus proche — et la plus étudiée — est bien entendu notre Soleil.

La fusion de l'hydrogène

La lumière émise par la plupart des étoiles résulte de processus de fusion thermonucléaire dans leur région centrale. Une étoile comme le Soleil est composée de 74% d'hydrogène et de 25% d'hélium. Le reste est un mélange d'éléments plus lourds. Le processus le plus courant intervenant au sein des étoiles est la fusion de l'hydrogène : quatre noyaux d'hydrogène fusionnent pour donner un noyau d'hélium (Fig. 2). Elle se déroule en plusieurs étapes. Tout d'abord, deux protons fusionnent pour donner du deutérium, une forme d'hydrogène lourd. Il s'agit d'un événement extrêmement rare, même dans le noyau très dense des étoiles où la température est de plusieurs millions de degrés. Ceci explique pourquoi les étoiles comme le Soleil n'explosent pas à la suite de réactions en chaîne une fois le processus de fusion commen-

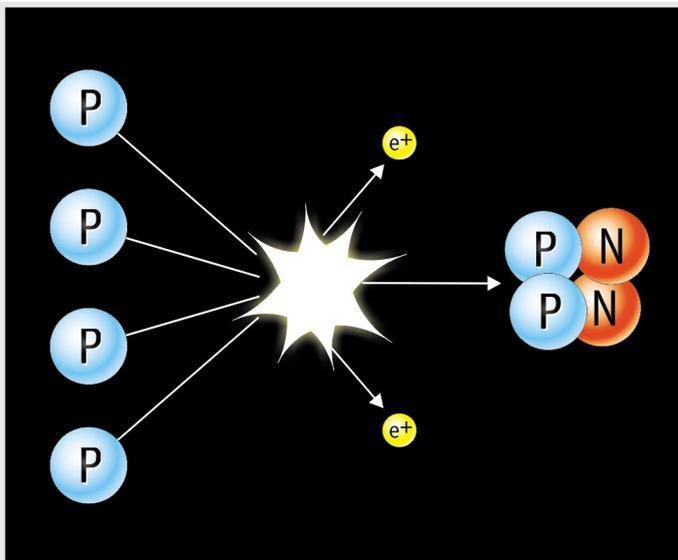


Figure 2 : Fusion de l'hydrogène
L'étoile, pour générer de l'énergie, fusionne quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium. Le processus comporte plusieurs étapes. Seul le bilan est ici schématisé.

cé, mais restent dans une phase stable pendant plusieurs milliards d'années. Pendant sa période de stabilité, la température de surface, le rayon et la luminosité de l'étoile restent quasiment constants. Les réactions nucléaires génèrent juste assez d'énergie pour assurer l'équilibre entre la pression thermique vers l'extérieur et les forces gravitationnelles qui tendent à faire s'effondrer l'étoile sur elle-même.

La masse du noyau d'hélium constitue seulement 99,3% de la masse des quatre noyaux d'hydrogène qui lui ont donné naissance. La fusion convertit les 0,7% résiduels de masse en énergie — principalement de la lumière — qui peut être calculée à partir de la fameuse équation d'Einstein, $E = Mc^2$. Comme c^2 est un nombre très grand, même une faible part de matière donne ainsi beaucoup d'énergie. Les 0,7% de masse résiduelle dans chaque réaction peuvent sembler très faibles, mais comme un grand nombre de réactions se déroulent, la masse totale impliquée (et donc l'énergie) est colossale.

Les amas d'étoiles

Le terme 'Amas d'étoiles' recouvre deux différents groupes d'étoiles : les amas ouverts et les amas globulaires.

Les amas ouverts sont des ensembles peu compacts d'étoiles, allant d'une centaine à plusieurs milliers, toutes relativement jeunes. Elles ont typiquement plusieurs centaines de millions d'années, une fraction des quelques milliards d'années de la vie d'une étoile. Ces amas se trouvent dans le disque de notre galaxie, la Voie Lactée, et renferment souvent des nuages de gaz et de poussières où de nouvelles étoiles naissent. Le diamètre typique d'un amas ouvert est d'environ 30 années-lumière (~10 parsecs).

Les amas globulaires sont les plus vieilles structures de la Voie Lactée

Plusieurs centaines d'amas compacts et sphériques appelés amas globulaires existent dans le disque et dans le halo de la Voie Lactée. Ils sont gravitationnellement liés à notre galaxie.



Introduction



Figure 3 : Les Pléiades (Messier 45) dans la constellation du Taureau

Voilà l'un des amas les plus célèbres du ciel. Les Pléiades sont visibles à l'œil-nu même dans les villes où la pollution lumineuse est très importante. C'est l'un des plus brillants et des plus proches amas ouverts. A 400 années-lumière de la Terre, les Pléiades renferment plus de trois mille étoiles, dans une zone de seulement 13 années-lumière (photo de Bruno Stampfer et Rainer Eisendle).

Chaque amas globulaire est un regroupement sphérique d'étoiles, pouvant aller jusqu'à un million d'étoiles et qui mesure en général 100 années-lumière de diamètre. La plupart des amas globulaires sont très vieux et ont très vrai-

semblablement précédé la formation de la Galaxie, il y a environ 12 milliards d'années, quand la plupart du matériau proto-galactique s'est aggloméré dans le disque.

De nombreux amas globulaires ont probablement

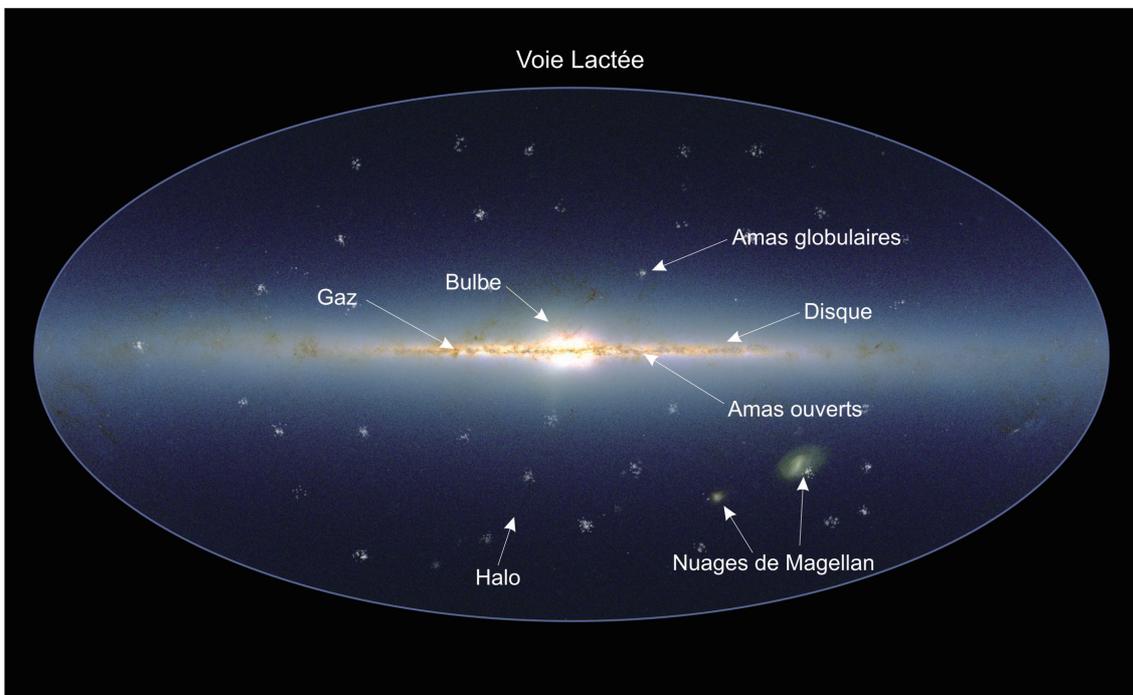


Figure 4 : La Voie Lactée

Vue d'ensemble de la Voie Lactée, avec les différentes composantes de cette structure complexe, faite d'étoiles, de gaz et de poussières. Le plan du disque s'étend le long de la ligne horizontale centrale. Les amas globulaires sont distribués au sein du halo sphérique autour du centre galactique. On pense qu'une telle distribution tient au fait que ces amas d'étoiles se sont formés très tôt dans l'histoire de la Galaxie.



Introduction

été détruits au cours des milliards d'années de collisions et d'interactions répétées, entre eux ou avec la Voie Lactée. Les survivants sont plus vieux que bien d'autres objets de la Voie Lactée. L'astrophysique des amas globulaires est une part importante de la recherche en astronomie. Les amas d'étoiles sont en effet fondamentaux non seulement pour tester les théories de structure et d'évolution stellaires, mais aussi parce qu'ils font partie des rares objets de la Galaxie à pouvoir être datés précisément. Grâce à leur ex-

trême longévité, ils fournissent une donnée fondamentale en astronomie : la limite inférieure de l'âge de l'Univers. La distribution de leurs âges et leur corrélation âge/composition chimique en font des atouts inestimables pour étudier la formation des galaxies.

Au sein d'un même amas, toutes les étoiles partagent une histoire commune et ne diffèrent que par leur masse. Les amas globulaires sont donc également précieux pour l'étude de l'évolution des étoiles. Au cours de cet exercice, vous déterminerez certaines propriétés d'un amas glo-

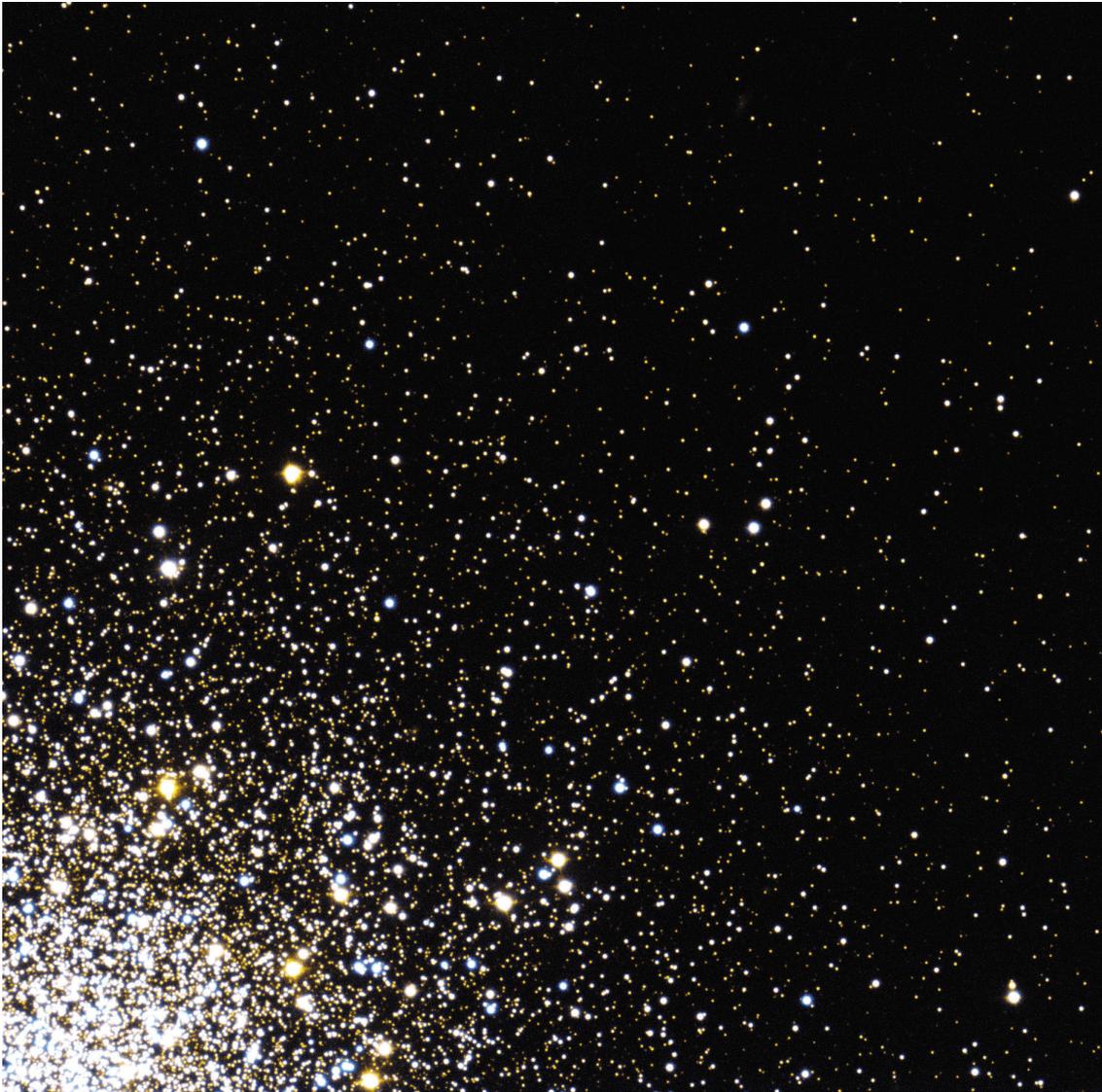


Figure 5 : La périphérie de l'amas globulaire M12

Cette image en deux-couleurs a été construite à partir d'observations au travers de filtres bleu (B) et vert (V) sur le VLT. L'image B est montrée en bleu et l'image V correspond au rouge sur l'image composite. Certaines étoiles sont plus brillantes en B (étoiles à dominante bleue) alors que d'autres le sont en V (étoiles jaunes).



Introduction

bulaire, M12.

L'amas globulaire Messier 12

L'amas globulaire Messier 12 (ou M12), aussi appelé NGC 6218, fut découvert en 1764 par Charles Messier et devint ainsi le 12^{ème} objet du catalogue de Messier. Comme beaucoup d'amas globulaires, Messier le décrit comme une "nébuleuse sans étoile", interprétation due à la modeste résolution de son télescope. William Herschel fut le premier à résoudre l'amas en étoiles individuelles, en 1783.

M12 est situé dans la constellation d'Ophiuchus

et peut être observé avec des jumelles si la pollution lumineuse est faible. La magnitude visible de l'amas entier est de 6,7 (à propos des magnitudes, relire la page 2 des "Outils astronomiques") et quant à l'étoile la plus lumineuse de l'amas, elle a une magnitude visible de 12.

Le NGC (New General Catalogue) fut publié en 1888. Il s'agit d'un recensement d'amas ouverts et globulaires, de nébuleuses planétaires et diffuses, de restes de supernovae, de galaxies de tous types et même d'entrées erronées ne correspondant à aucun objet.

Le diagramme Hertzsprung-Russell

Le graphe donnant la luminosité L (ou encore la magnitude absolue M) en fonction de la température de surface T est appelé diagramme de Hertzsprung-Russell (diagramme H-R). La Fig. 6 montre un exemple général construit à partir d'étoiles situées dans des amas proches, aux distances bien connues (grâce aux mesures du satellite HIPPARCOS). La température de surface T d'une étoile peut être déduite de sa couleur $m_B - m_V$ (cf. le livret Outils).

On s'aperçoit vite en regardant le diagramme H-R de différentes étoiles que les mesures (L , T) forment un curieux nuage de points. Les étoiles sont concentrées dans des aires spécifiques, identifiées sur la figure. Le diagramme H-R détient la clé de l'évolution des étoiles en fonction du temps. Chaque étoile — en fonction de sa masse — suit une route spécifique sur le diagramme.

Evolution stellaire dans le diagramme H-R

Les étoiles passent la plus grande partie de leur vie sur la séquence principale, en état d'équilibre, consommant l'hydrogène progressivement. C'est pourquoi la plupart des étoiles apparaissent au sein de la séquence principale, en gros une ligne droite démarrant en haut à gauche pour finir en bas à droite du diagramme. Quand l'hydrogène vient à manquer dans le cœur de l'étoile, la fusion de l'hydrogène s'arrête et clos ainsi la phase de l'étoile sur la séquence principale. L'équilibre entre la force gravitationnelle et la pression de radiation n'est plus assuré. La fusion de l'hydrogène se déroule encore dans les

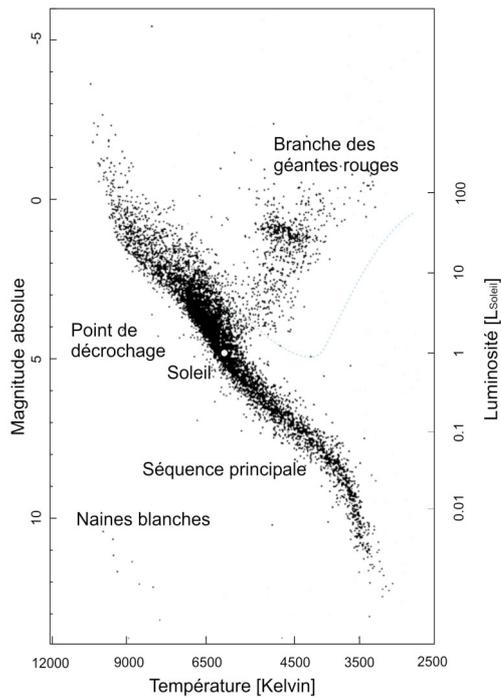


Figure 6 : Le diagramme Hertzsprung-Russell d'étoiles proches

Le diagramme Hertzsprung-Russell montre la relation entre la température de surface et la luminosité des étoiles. Notez la prédominante séquence principale et les différentes régions où les géantes rouges et les naines blanches dominent. La position du Soleil est précisée ($T = 5800$ K et $M = +4,8$) ainsi que la "route" qu'une étoile de une masse solaire suivrait au cours des différentes phases de sa vie.



Introduction

couches externes pendant que le noyau commence à se contracter. La pression et la température du noyau augmentent, rendant possible la fusion de l'hélium et la formation d'éléments plus lourds. Ce cycle peut se répéter avec des éléments de plus en plus lourds, au fur et à mesure que les éléments légers ne sont plus disponibles au cœur de l'étoile. Au cours de cette phase, l'étoile apparaît comme une géante rouge. Dans le diagramme H-R, elle sort de la séquence principale pour se diriger vers le coin supérieur droit. La température centrale plus importante provoque l'expansion et donc le refroidissement de ses couches externes : la température de surface chute. L'étoile dans son ensemble devient très grande et à cause d'une température de surface plus faible, émet son rayonnement vers les longueurs d'onde plus grandes : elle devient rouge.

Malgré sa faible température de surface T , toute géante rouge possède une luminosité L très importante grâce à un rayon R énorme. Ceci résulte de la loi de radiation du corps noir de Stefan-Boltzmann :

$$L = \sigma 4\pi R^2 T^4$$

où σ est la constante de Boltzmann. Les valeurs

typiques d'une géante rouge sont $R \sim 10^2 R_{\text{Soleil}}$, $T \sim (3..4) \cdot 10^3 \text{ K}$, donc $L \sim 10^3 L_{\text{Soleil}}$.

Quand le processus de fusion dans le noyau de l'étoile ne plus se dérouler, le noyau s'effondre. La température du noyau augmente à nouveau et les couches externes sont maintenant expulsées. Une nébuleuse planétaire se forme (cf. Exercice 3). Le noyau effondré est très chaud (blanc) et l'étoile très petite. Un tel astre est nommé naine blanche et constitue la fin annoncée d'étoiles comme le Soleil.

A partir du diagramme H-R, on peut estimer la relation entre la luminosité L et la surface de température T pour les étoiles de la séquence principale (Fig. 6). La ligne droite correspondant approximativement à la séquence principale s'étale sur une puissance de 10 en température ($3 \times 10^3 \dots 3 \times 10^4 \text{ K}$) quand la luminosité augmente de 10^6 ($10^{-2} \dots 10^4 L_{\text{Soleil}}$). Nous pouvons donc estimer que $L \propto T^6$ pour les étoiles de la séquence principale.

Quelques applications numériques :

- Une étoile très massive de la séquence principale avec une température de surface $T_{\text{Etoile}} =$

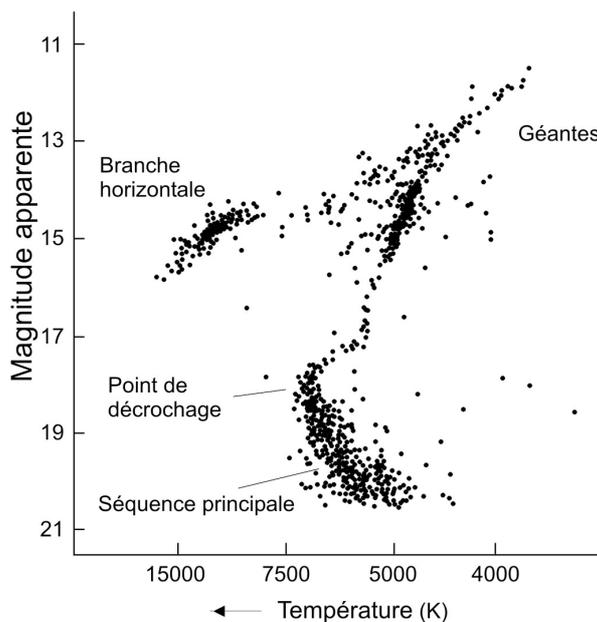


Figure 7 : Diagramme Hertzsprung-Russell typique d'un amas globulaire

Après des milliards d'années d'évolution, un amas globulaire montre un diagramme H-R à la séquence principale courte dans sa partie inférieure. Une autre zone appelée branche des géantes rouges quitte la séquence principale pour aller vers le coin supérieur droit du diagramme. Le point de jonction entre ces deux zones est nommé point de décrochage.



Introduction

$1,0 \times 10^4$ K a une luminosité d'environ $L_{\text{Étoile}} = (10/5,8)^6 \times L_{\text{Soleil}}$, soit approximativement 26 fois la luminosité du Soleil (celle-ci a par convention la valeur 1 sur l'échelle des luminosités).

- Une étoile de faible masse avec $T_{\text{Étoile}} = 3,5 \times 10^3$ K a une luminosité de seulement 5% celle du Soleil.

L'indice de couleur (B-V) et la température de surface

Toute l'information que nous pouvons extraire des étoiles est contenue dans la lumière que nous recevons d'elles. Comme expliqué dans la partie "Outils astronomiques", différents filtres et systèmes de couleurs sont utilisés pour mesurer la brillance d'une étoile. Nous utiliserons ici une image (B) et une image (V). Dans votre analyse, vous déterminerez les magnitudes apparentes m_B et m_V d'un échantillon d'étoiles de l'amas. Vous calculerez ensuite les valeurs de l'indice de couleur ($m_B - m_V$). Vous pourrez alors en déduire la température de surface des étoiles.

Le diagramme H-R, clé de l'énigme

La vie d'un amas est déterminée par les différentes étoiles qui le composent.

Dans un amas globulaire, les observations ont montré que très peu de gaz et de poussières subsistent ; les étoiles y naissent donc rarement. Les étoiles que nous voyons dans un amas globulaire sont toutes 'adultes' et ont évolué différemment suivant leur masse.

La plupart des étoiles de faible masse sont situées sur la séquence principale. En effet, elles brûlent très progressivement leurs réserves en hydrogène, et ceci pendant des milliards d'années.

Quant aux étoiles les plus massives de l'amas, elles ont déjà converti leur hydrogène pour devenir des géantes rouges. Tout ceci s'est déroulé il y a longtemps, il ne reste donc aucune étoile chaude de masse importante pour remplir la partie supérieure de la séquence principale (cf. Fig. 7). Ces étoiles se situent maintenant dans une diagonale qui part de la séquence principale vers la branche des géantes rouges.

Le point où la séquence principale et la branche des géantes rouges se rencontrent — nommé point de décrochage (ou coude vers les géantes ou encore point de turn-off) — est capital pour déterminer l'âge de l'amas. Au cours des étapes suivantes, vous mesurerez ses coordonnées pour évaluer l'âge de M12.



Objectifs

Observations, réduction de données et analyse

L'amas globulaire M12 fut observé le 18 juin 1999 par l'instrument FORS1 de ANTU, l'UT1 du VLT au Chili. Pour mener à bien cet exercice, nous avons choisi des images excentrées de l'amas où les étoiles sont moins nombreuses. Les expositions furent prises à travers un filtre bleu (B) et un filtre vert (V pour Visible). Observer et réduire les données, c'est-à-dire éliminer les artéfacts dus par exemple aux instruments, requiert de grands télescopes et des programmes informatiques sophistiqués. La part la plus intéressante du travail pour les astronomes, l'analyse de données, débute après ce traitement préalable.

Dans l'exercice, les données ont déjà été collectées et réduites. Nous avons un peu simplifié l'analyse en sélectionnant un ensemble d'étoiles considérées comme les plus représentatives de la population de l'amas.

Conseils pour l'analyse d'images

Pour faire une analyse correcte, les magnitudes B et V de chaque étoile doivent être mesurées avec soin. Une erreur à ce stade affecterait beaucoup le résultat.

Les 45 étoiles sont réparties suivant 6 sections :

1 5 étoiles (n°1 à 5) : 'Entraînement'

2 4 étoiles (n°6 à 9) : 'Étalonnage'

3-6 Les autres étoiles sont à leur tour divisées en 4 groupes (A, B, C et D) pour partager le travail et faire des mesures soignées.

Pour des mesures aussi précises que possible, nous suggérons la méthode suivante :

- Mettez la jauge (voir plus loin les Fig. 8 et 9) sur l'étoile et déplacez-la. Trouvez les valeurs extrêmes et positionnez la jauge à la moitié de ces deux valeurs. Répétez la procédure plusieurs fois et prenez la moyenne,
- Laissez différents élèves de chaque groupe faire leurs relevés sur chaque étoile (au moins deux fois) et prenez-en la moyenne,

- Entre chaque mesure, répétez la procédure concernant la jauge pour vous assurer que même en changeant d'étoile, vous travaillez toujours de la bonne façon.

Objectif 1 : Entraînement (magnitudes B)

Pour les étoiles d'entraînement (n°1 à 5), les magnitudes sont données dans le tableau Fig. 10.

- ?
- Entraînez-vous à manipuler la jauge sur la Fig. 8 et assurez-vous que vous obtenez les mêmes valeurs.

Objectif 2 : Etalonnage (magnitudes B)

Chaque groupe devrait faire des mesures sur les étoiles d'étalonnage indépendamment (n°6 à 9).

- ?
- Mesurez les étoiles d'étalonnage dans l'image-B (Fig. 8), ajoutez ces valeurs dans le tableau et comparez vos résultats avec les autres groupes. Si les valeurs diffèrent, recommencez avec ces étoiles ainsi que les étoiles d'entraînement.

Objectif 3 : Magnitudes B des zones A, B, C et D

- ?
- Mesurez la magnitude bleue m_B de chaque étoile étiquetée dans la zone (A, B, C ou D Fig. 8) dont vous avez la charge et reportez vos valeurs dans le tableau.

Objectif 4 : Entraînement (magnitudes V)

- ?
- Entraînez-vous sur la Fig. 9 et comparez vos résultats avec ceux du tableau. Vous devez obtenir les mêmes valeurs.

Objectif 5 : Etalonnage (magnitudes V)

- ?
- Mesurez les étoiles d'étalonnage dans l'image V (Fig. 9), ajoutez ces valeurs dans le tableau et comparez vos résultats avec les autres groupes. Si les valeurs diffèrent, recommencez avec ces étoiles ainsi qu'avec les étoiles d'entraînement.





Objectifs

Objectif 6 : Magnitudes V des zones A, B, C et D

- ? Utilisez Fig. 9 pour déterminer la magnitude verte m_V de chaque étoile étiquetée dans la zone dont vous avez la charge et reportez vos valeurs dans le tableau.

Objectif 7 : Indice de couleur

- ? Calculez $(m_B - m_V)$ pour chaque étoile. Complétez le tableau, par exemple à l'aide d'un tableau.

Objectif 8 : Température de surface

- ? Utilisez le diagramme Fig. 3 du livret 'Outils astronomiques' pour convertir les valeurs $(m_B - m_V)$ en températures de surface T. Complétez le tableau.

Objectif 9 : Le diagramme H-R

La séquence principale de l'amas des Hyades a été reproduite Fig. 11. Notez que c'est la magnitude absolue M_V qui a été mesurée.

- ? Sur le même diagramme, reportez les coordonnées (m_V, T) correspondant aux étoiles de l'amas M12.

Objectif 10 : Ajustement de la séquence principale et module de distance

Pour les étoiles de M12, nous connaissons (m_V, T) et en prenant pour référence les mesures des Hyades, nous avons (M_V, T) pour une séquence principale standard. Le module de distance (cf. le livret Outils) de M12 est le décalage sur l'axe vertical entre les deux séquences principales.

- ? Calculez le module de distance $(m_V - M_V)$ pour M12.

Objectif 11 : Distance de l'amas M12

- ? Utilisez le module de distance et l'équation de la distance (cf. la partie 'Outils astronomiques' si nécessaire) pour déterminer la distance D à laquelle se trouve M12.

Objectif 12 : Correction de l'extinction

La distance que vous venez de déterminer n'est pas tout à fait juste car notre Galaxie contient beaucoup de gaz et de poussières qui affaiblissent la lumière en provenance des étoiles. Gaz et poussières provoquent également un rougissement de la couleur des étoiles, connu sous le nom de diffusion Rayleigh. Ce processus est d'autant plus efficace que les longueurs d'ondes sont courtes (lumière bleue). L'affaiblissement de la lumière, combiné à la diffusion, traduit le phénomène 'd'extinction interstellaire'.

Vous allez maintenant corriger la distance D de cette extinction. On considérera uniquement la partie due à l'affaiblissement de la lumière, qui rend les magnitudes des étoiles observées trop élevées, et donc leurs distances trop grandes.¹ Le module de distance m-M corrigé s'écrit maintenant :

$$m-M-A,$$

où A est le facteur correctif d'extinction. L'équation de la distance devient :

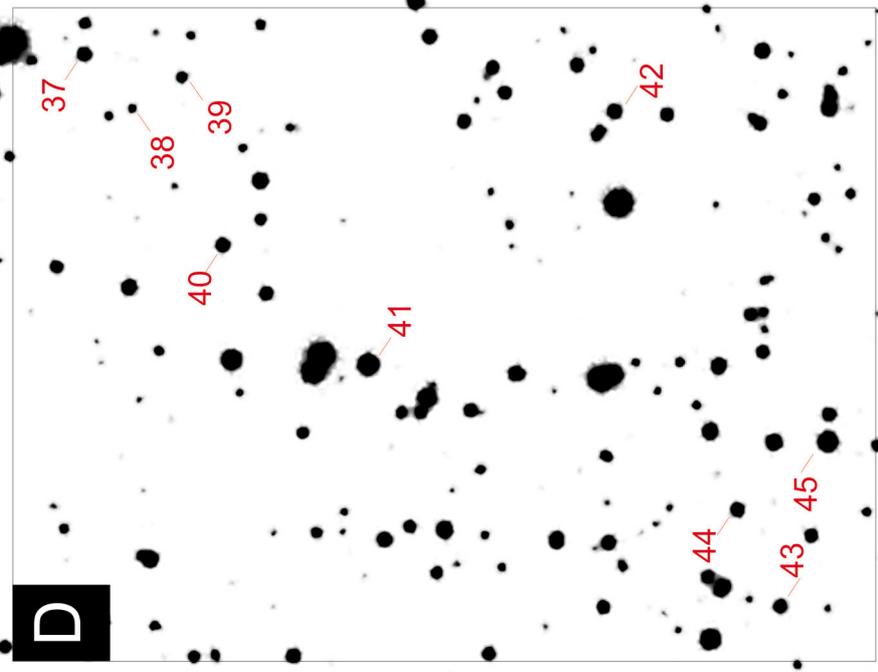
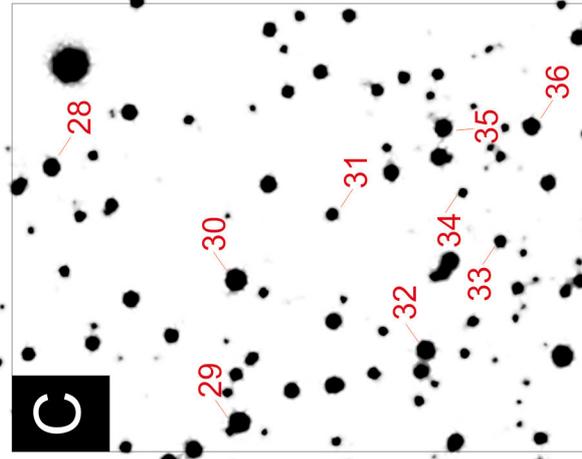
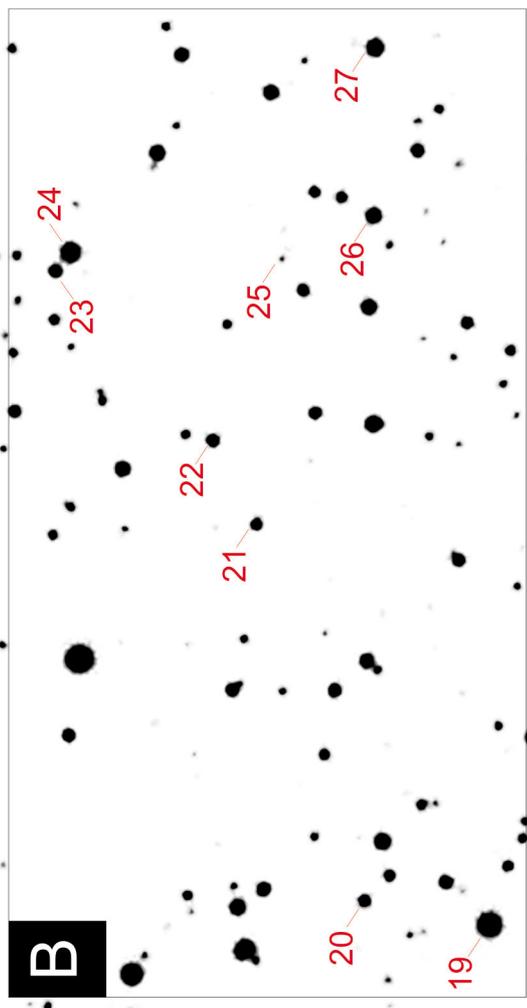
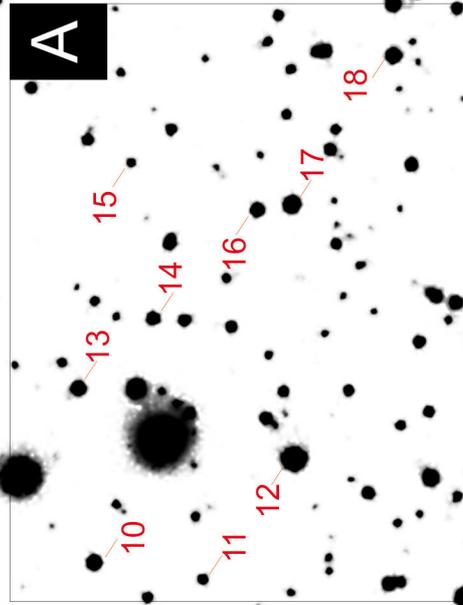
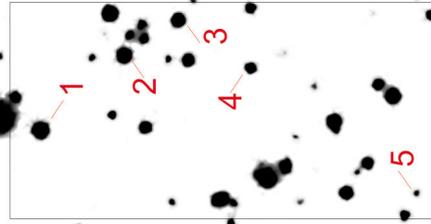
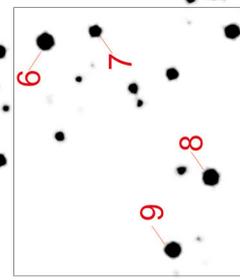
$$D=10^{(m-M-A+5)/5}$$

Pour M12, Harris et al. donnent $A = 0,57$ magnitudes (dans la bande V, qui est bien celle que l'on utilise pour calculer m-M).

- ? Calculez la nouvelle distance corrigée de l'extinction interstellaire.
- ? Comparez cette nouvelle valeur de D à celle trouvée à l'Objectif 11. Est-elle très différente ?
- ? Discutez ces résultats et l'implication de ce facteur correctif, largement utilisé par les astronomes, sur notre compréhension de la taille de l'Univers.

¹Comme dit plus haut, ceci est une simplification puisqu'il y a aussi une petite influence de l'extinction sur le terme B-V (ou la température).

B



- 1-5 Entraînement
- 6-9 Etalonnage
- 10-18 Partie A
- 19-27 Partie B
- 28-36 Partie C
- 37-45 Partie D

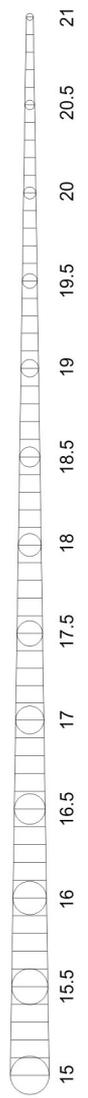
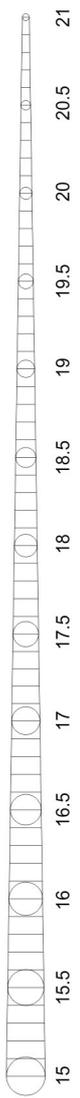
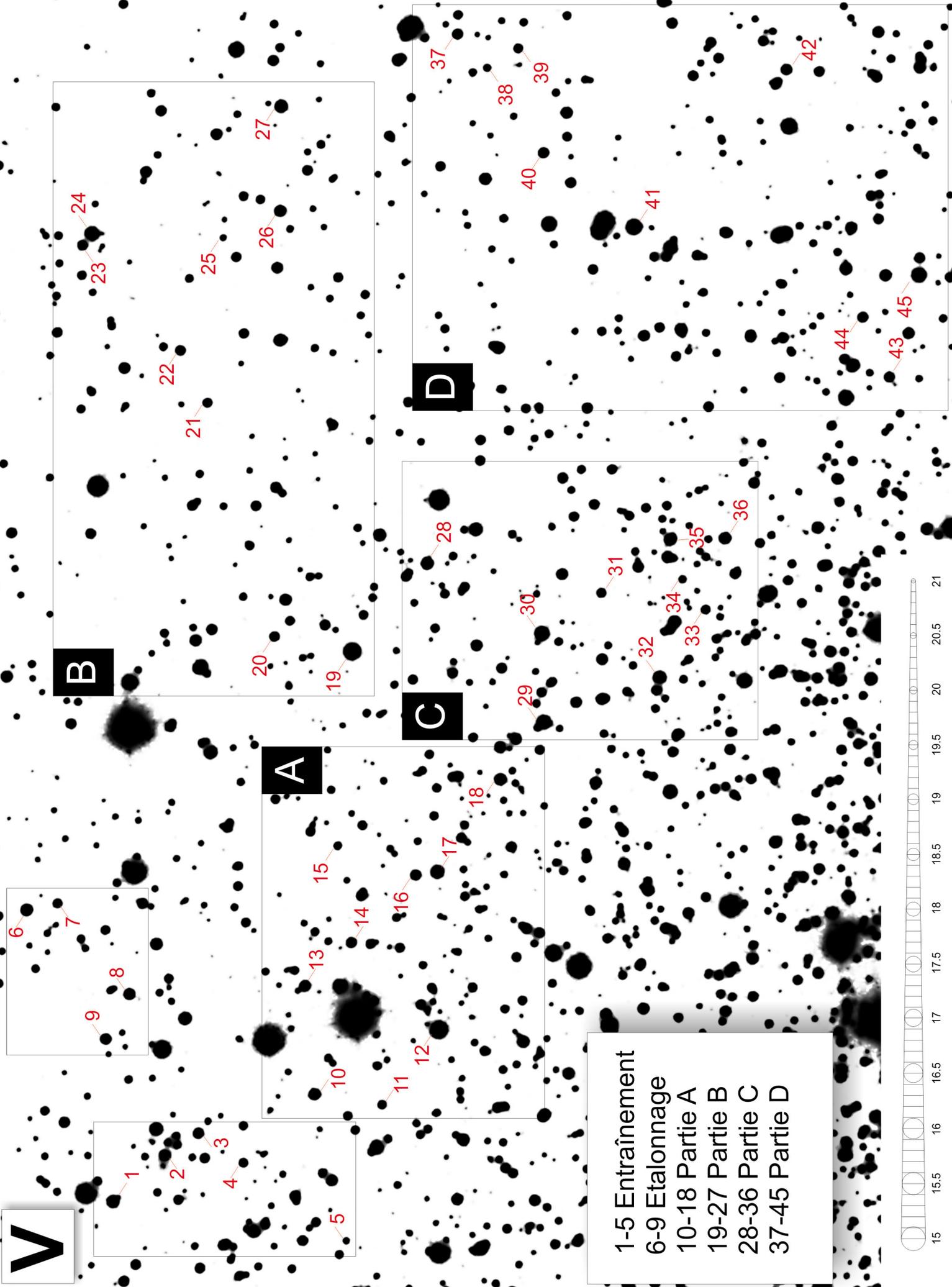


Figure 8 : Photo à travers le filtre B

V

Figure 9 : Photo à travers le filtre V





Objectifs

Figure 10 : Tableau de valeurs

Star	Résultats scientifiques				Mesures / Calculs ESA/ESO			
	B	V	B-V	T	B	V	B-V	T
1	18,82	17,98	0,84	5250	18,70	17,90	0,8	5403
2	19,02	18,31	0,71	5744	19,00	18,20	0,8	5403
3	19,32	18,65	0,67	5864	19,30	18,70	0,6	6122
4	19,96	19,25	0,71	5699	19,90	19,10	0,8	5403
5	21,05	20,21	0,84	5265	21,00	20,10	0,9	5076
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								
41								
42								
43								
44								
45								



Objectifs

Objectifs

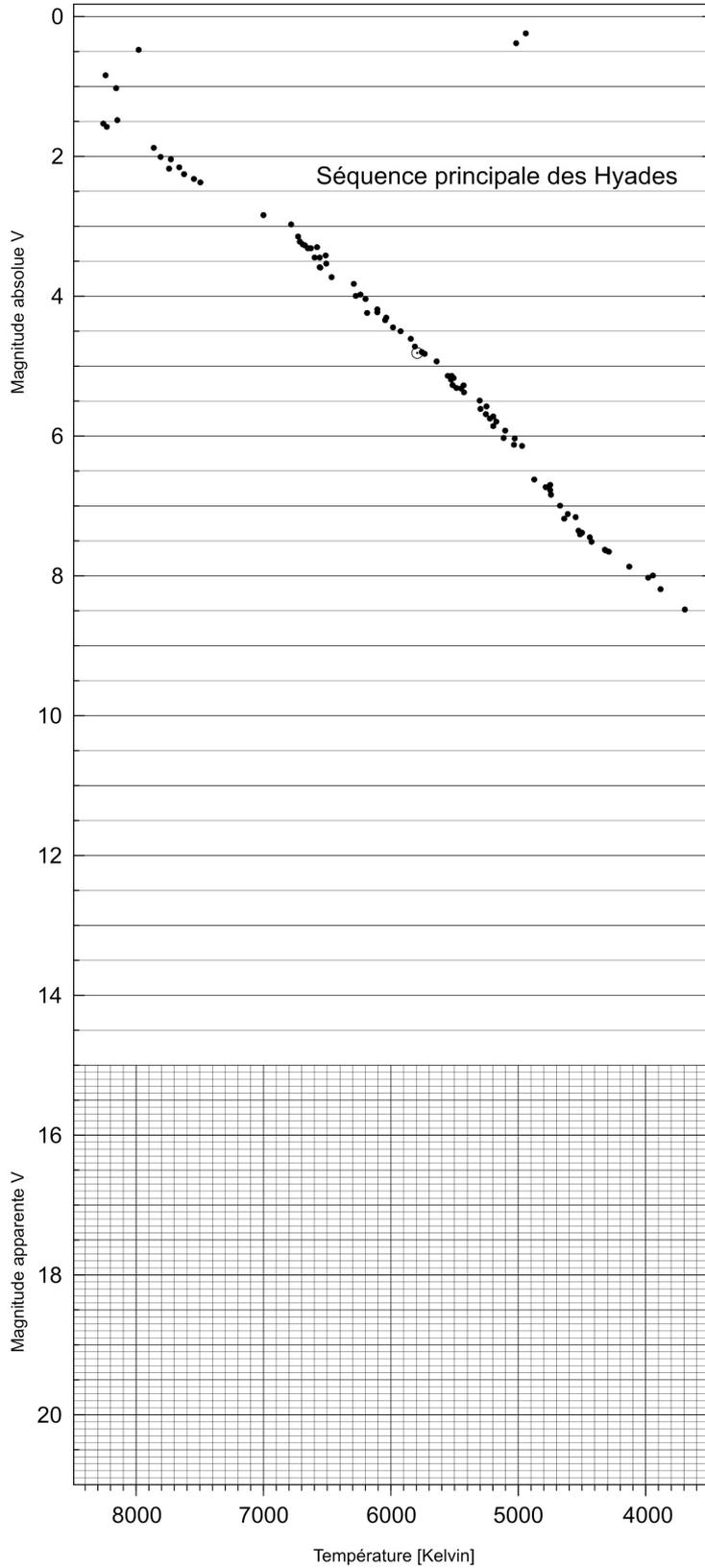


Figure 11 : Report des mesures

Les résultats des questions 1 à 9 sont à reporter sur ce diagramme.

La séquence principale étalonnée pour l'amas des Hyades est déduite des observations du satellite ESA HIPPARCOS (d'après de Bruijne et al., 2001)



Objectifs

Objectif 13

La distance D calculée par les scientifiques, à partir des données originales et d'un échantillon d'étoiles beaucoup plus grand, vaut 4900 parsecs.

Si votre valeur n'excède pas 20% d'erreur, vous pouvez être très content de votre travail : vos mesures et vos calculs ont été réalisés avec précision.

Si vos résultats sont plus éloignés, ceci peut être dû à plusieurs raisons :

- Vos mesures de magnitudes sont-elles assez précises ?
- Pouvez-vous trouver des méthodes plus sophistiquées pour réduire les données et mieux coller à la séquence principale ?
- Réfléchissez à d'autres moyens d'améliorer les

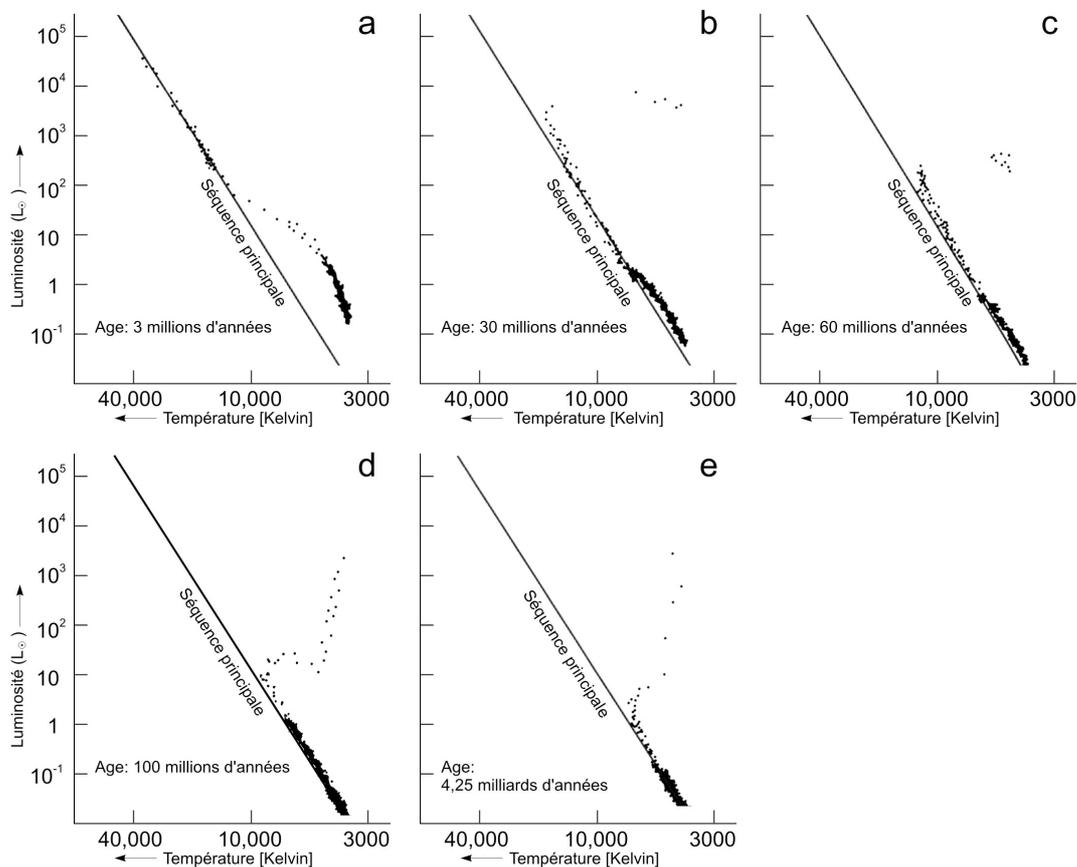


Figure 12 : Evolution théorique d'un amas globulaire

Cette série de diagrammes H-R fut créée par ordinateur à partir des équations d'évolution stellaire, pour un échantillon d'étoiles, sur un temps donné.

12 a : Les étoiles les plus grosses et les plus lumineuses sont sur la séquence principale ($T > 10\,000$ K) et les étoiles les plus petites entament leur phase de fusion de l'hydrogène (faible température, faible luminosité).

12 b : Les étoiles les plus grosses ont consommé la plupart de leur hydrogène au sein du noyau et sont en train de brûler les réserves des couches externes. Leur luminosité a baissé et elles deviennent rouges ; elles sont sorties de la séquence principale, la branche des géantes rouges commence à apparaître et le point de décrochage vers les géantes est visible. Aucune étoile chaude et lumineuse ne reste dans la partie supérieure de la séquence principale.

12 c-e : La partie supérieure de la séquence principale est pratiquement déserte, alors que la branche des géantes rouges se remplit. La partie inférieure de la séquence principale indique une population importante d'étoiles similaires au Soleil, avec une température de surface comprise entre 4000 et 8000 K. Elles resteront dans cet état pendant encore des milliards d'années (d'après R. Kippenhahn).





Objectifs

résultats.

L'évolution des amas globulaires

La forme de la séquence principale d'un amas globulaire est pratiquement indépendante de son âge. Les méthodes ci-dessus pourraient très bien être utilisées pour d'autres amas d'âges différents afin de calculer leurs distances. Cependant, les diagrammes H-R de différents amas montrent que la partie supérieure de la séquence principale est fonction de l'âge de l'amas (cf. Fig. 12). Au sein des amas les plus vieux, les étoiles les plus lumineuses ont évolué et se sont déplacées vers la branche des géantes rouges. Ainsi, la partie supérieure de la séquence principale est raccourcie et la connection entre la branche de la séquence principale et celle des géantes rouges est déplacée vers le bas, un peu comme une bougie s'amenuise avec le temps. Nous pouvons en conclure que le point de décrochage vers les géantes est une donnée importante si on veut déterminer l'âge de l'amas.

Objectif 14 : Le point de décrochage : des magnitudes à la luminosité

- ?
- Déterminez la magnitude apparente d'une étoile de M12 positionnée au point de décrochage. Calculez sa luminosité relativement à celle du Soleil en utilisant la formule du livret 'Outils'.

Le point de décrochage : de la luminosité à la masse

Une fois la luminosité connue, nous pouvons déterminer la masse de l'étoile à l'aide de la relation 'masse-luminosité'. Pour des étoiles de la séquence principale, la corrélation entre ces deux grandeurs est :

$$L = M^{3.8}$$

où L et M sont exprimées relativement aux valeurs du Soleil ($L_{\text{Soleil}} = 4 \times 10^{26}$ W, $M_{\text{Soleil}} = 2 \times 10^{30}$ kg).

Objectif 15

- ?
- Convertissez la luminosité précédente en une masse relative à celle du Soleil.

Le point de décrochage : de la masse à l'âge de l'étoile

La durée de vie t de l'étoile sur la séquence principale dépend de sa luminosité et de sa masse.

- Une étoile très lumineuse brûle chaque seconde plus d'hydrogène qu'une étoile moins lumineuse. La masse d'une étoile lumineuse décroît ainsi plus vite : moins l'étoile est lumineuse, plus elle peut briller longtemps.
- Pour deux étoiles de masses différentes, la plus massive a plus de matériau à brûler. Nous voyons donc que la durée de vie d'une étoile est directement proportionnelle à sa masse et inversement proportionnelle à sa luminosité.

Grâce à la relation masse-luminosité, on trouve que la durée de vie est fonction de la masse :

$$t \propto M^{-2.8}$$

Objectif 16

- ?
- A partir de la masse trouvée à l'Objectif 15, estimez l'âge de l'amas globulaire par rapport à celui du Soleil quand il quittera la séquence principale : $8,2 \times 10^9$ années.

En conclusion, donnez une limite inférieure à l'âge de l'Univers (l'Univers doit être bien entendu plus âgé que l'amas).



Calculs supplémentaires



Figure 13 : Image d'ensemble de l'amas globulaire M12

Le côté de l'image correspond à $0,25^\circ$ (d'après The Digitized Sky Survey de l'ESO).

Détermination du diamètre

Pour déterminer le diamètre de M12, nous avons besoin de son diamètre angulaire. Dans la Fig. 13, il y a beaucoup d'étoiles... Discuter quelles sont celles qui appartiennent vraiment à l'amas.

Objectif 17

- ? Mesurez le diamètre angulaire α de l'amas M12 en cm et convertissez-le en radians (voir les Outils mathématiques).

- ? Calculez alors le diamètre d grâce à l'approximation des petits angles.

Pour la distance, utilisez soit votre propre résultat, soit celui des astronomes : $D = 4900$ parsecs.



Calculs supplémentaires

Détermination du nombre total d'étoiles

Pour estimer le nombre total d'étoiles N qui constituent l'amas globulaire, nous devons faire quelques hypothèses :

1. L'amas est un mélange de plusieurs types d'étoiles, mais nous supposons que l'étoile moyenne est du type Soleil, c'est-à-dire que sa magnitude absolue est environ celle du Soleil.
2. Nous supposons que chaque étoile contribue à la luminosité totale de l'amas. En réalité, les poussières, ou les étoiles, pourraient occulter partiellement ou en totalité d'autres étoiles.

Objectif 18

La magnitude absolue de M12 est donnée par $M_{\text{Amas}} = -7,32$.

La luminosité totale de l'amas en termes de luminosité solaire est calculée à partir de

$$L_{\text{Amas}}/L_{\text{Soleil}} = 2,512^{(M_{\text{Soleil}} - M_{\text{Amas}})}$$

Rappel : $M_{\text{Soleil}} = 4,8$.

D'après l'hypothèse 1, $L_{\text{Amas}} \approx N \times L_{\text{Soleil}}$ soit $N \approx L_{\text{Amas}} / L_{\text{Soleil}}$.

Cependant, d'après l'hypothèse 2, la véritable valeur de N devrait être un peu plus élevée que $L_{\text{Amas}} / L_{\text{Soleil}}$.



Lectures conseillées

Articles scientifiques

- de Bruijne, J.H.J., Hoogerneerf, R., and de Zeeuw, P.T., 2001, *A&A*, 367, 111–147: *A Hipparcos study of the Hyades open cluster.*
- Cragin, M., Lucyk, J., Rappaport, B.: *The Deep Sky Field Guide to Uranometria 2000.0*, 1993-96, Willmann-Bell, Inc.
- Harris, W.E.: *Catalog of parameters for Milky Way Globular Clusters*, Revised: June 1999 (<http://physun.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>)
- Rosenberg, A., Saviane, I., Piotto, G., Aparicio, A., 1999, *AJ*, 118, 2306–2320: *Galactic Globular Cluster Relative Ages*
- Chaboyer, B., Demarque, P., Sarajedini, A., 1996, *ApJ*, 459–558: *Globular Cluster Ages and the Formation of the Galactic Halo*

Pour en savoir plus sur l'extinction interstellaire :
<http://www.astro.virginia.edu/class/hawley/astr124/ism.html>
<http://tesla.phys.unm.edu/a111labs/cepheids/mags.html#Red>

Consultez aussi les liens du site :
<http://www.astroex.org/>



Colophon



Les Exos d'Astro de l'ESA/ESO
Exercice 4 : Mesurer la distance et l'âge d'un
Amas globulaire
1^{ère} édition (traduction de 2^{ème} édition anglaise
23.05.2002)

Produit par :
the Hubble European Space Agency Information
Centre and the European Southern Observatory :
<http://www.astroex.org>
(Des versions pdf des exercices et leurs références
sont téléchargeables à cette adresse)

Adresse postale :
European Southern Observatory
Karl-Schwarzschild-Str. 2
D-85748 Garching bei München
Allemagne

Téléphone : +49 89 3200 6306 (ou 3200 60)
Fax : +49 89 3200 64 80 (ou 320 32 62)
E-mail : info@astroex.org

Texte :
Arntraud Bacher, Jean-Marc Brauer, Rainer Gaitzsch
et Lars Lindberg Christensen

Graphiques et mise en page :
Martin Kornmesser

Traduction :
Thibaut Plisson

Lecture des épreuves :
Nausicaa Delmotte

Coordination :
Lars Lindberg Christensen and Richard West

Remerciements chaleureux à Jesper Sollerman pour
la réduction des données originales, à Nina
Troelsgaard Jensen, Frederiksberg Seminarium pour
ses commentaires et à Jos de Bruijne pour nous
avoir fait partager les magnifiques données
d'Hipparcos. Pour avoir pointé les erreurs de la
première édition à : Anne Vørnholt Olesen, Ole Hjort
Rasmussen, Helle et Henrik Stub, Danemark ; Johann
Penzl, Allemagne.



A l'attention du professeur

Résumé

Grâce à des images du VLT, nous mesurons les magnitudes m_B (bleues) et m_V (visible) de certaines étoiles en périphérie d'un amas globulaire. Nous convertissons ensuite les valeurs ($m_B - m_V$) en températures de surface T . Nous reportons ces valeurs sur un diagramme H-R. Nous comparons alors la séquence principale de l'amas avec celle d'un amas proche : celui des Hyades, dont la distance est connue. La distance à l'amas est alors déduite par l'ajustement de la séquence principale et grâce au module de distance. L'âge de l'amas, qui donne une limite inférieure de l'âge de l'Univers, est estimé à partir du point de décrochage vers les géantes rouges.

Ce corrigé contient les solutions, commentaires et discussions des approximations. Il contient en outre un paragraphe sur l'évolution stellaire. Il permet d'exploiter au maximum l'exercice et d'assister le professeur dans sa préparation.

A propos de la vie des étoiles

La vie d'une étoile est le temps pendant lequel elle reste sur la séquence principale. Nous allons estimer la durée de vie du Soleil, puis celle d'une autre étoile (par rapport à celle du Soleil).

Une proto-étoile se forme à partir de matière interstellaire. Celle-ci consiste typiquement de 74% d'hydrogène, 25% d'hélium et 1% d'éléments plus lourds.

Quand la température interne de la proto-étoile atteint quelques millions de degrés Kelvin, elle commence à brûler de l'hydrogène et devient une étoile de la séquence principale.

Quatre atomes d'hydrogène fusionnent pour donner un noyau d'hélium. Comme la masse d'un noyau d'hélium n'est seulement que 99,3% de celle des quatre atomes d'hydrogène, cette masse manquante de 0,7% est convertie en énergie.

Pour chaque kilogramme de matière stellaire 0,007 kg seront ainsi convertis en énergie. D'après l'équation d'Einstein $E = Mc^2$, l'énergie ainsi dégagée est $6,3 \times 10^{14}$ J/kg. ($c = 3 \times 10^8$ m/s, la vitesse de la lumière).

La luminosité du Soleil est $L_{\text{Soleil}} = 3,85 \times 10^{26}$ W ($W = \text{J/s}$). Nous pouvons en déduire la masse d'hydrogène fusionné chaque seconde :

$$\Delta M = 3,85 \times 10^{26} / 6,3 \times 10^{14} = 6,11 \times 10^{11} \text{ kg/s}$$

L'étoile quitte la séquence principale quand environ 11% de la masse d'hydrogène aura été consommée. Le noyau de l'étoile devient alors instable.

En prenant comme masse du Soleil $M_{\text{Soleil}} = 2,0 \times 10^{30}$ kg, estimons la masse d'hydrogène qui peut être fusionnée pendant la durée de vie d'une étoile :

$$0,11 \times 0,74 \times 2 \cdot 10^{30} = 1,6 \times 10^{29} \text{ kg.}$$

En divisant cette masse par la masse perdue chaque seconde, nous pouvons calculer la durée de vie du Soleil sur la séquence principale :

$$2,6 \times 10^{17} \text{ s} = 8,2 \times 10^9 \text{ ans}, \quad 1 \text{ an} = 365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ s} = 3,15 \times 10^7 \text{ s} \quad (\text{soit plus de 8 milliards d'années}).$$

Les observations du Soleil montrent qu'il existe depuis environ 4 milliards d'années, on pense donc qu'il restera encore 4 milliards d'années sur la séquence principale.

Connaissant la durée de vie du Soleil, nous pouvons exprimer les autres durées de vie des étoiles par rapport à cette dernière.

La durée de vie de toute étoile dépend de sa masse. Même en simplifiant, nous pouvons aboutir à une formule correcte :

Les ressources en hydrogène pour alimenter une étoile sont proportionnelles à sa masse et t est inversement proportionnel à la luminosité L , donc : $t \propto M/L$



A l'attention du professeur

La vitesse à laquelle une étoile disperse son énergie augmente rapidement avec sa masse. Les résultats expérimentaux montrent que pour une étoile de la séquence principale : $L = M^{3,8}$ (relation masse-luminosité). L'exposant 3,8 est une valeur moyenne, qui s'applique de façon correcte à des étoiles de masse moyenne (de 0,5 à 10 masses solaires).

En conclusion, on aboutit à la formule : $t \propto M/L = M/M^{3,8} = M^{-2,8}$; les étoiles les plus massives évoluent beaucoup plus vite que le Soleil.

Quelques applications numériques :

Une étoile de 10 masses solaires aura une durée de vie de seulement $t = 0,0016 t_{\text{Soleil}}$ soit 13 millions d'années.

Pour une étoile de 0,6 masses solaires, $t = 4,2 t_{\text{Soleil}}$ ou encore 34 milliards d'années, soit un âge bien plus élevé que celui de l'Univers. Ainsi, aucune étoile de faible masse dans l'Univers n'est encore sortie de la séquence principale.

Le choix de l'échantillon d'étoiles

L'amas globulaire M12 renferme environ 150.000 d'étoiles. L'image de l'exercice fut obtenue par l'instrument FORS1 d'ANTU (UT1 du VLT). Elle couvre seulement une petite région de la périphérie de l'amas : elle a été choisie pour éviter la zone surpeuplée de l'amas où les étoiles semblent se recouvrir. Nous avons sélectionné 45 étoiles représentatives de la population de l'amas. La taille de l'échantillon est raisonnable pour espérer retrouver les résultats "scientifiques", fondés sur un échantillon plus large. Une photo de M12, extraite du Digitized Sky Survey (DSS), permet d'effectuer des calculs supplémentaires.

Analyse de l'image

Nous conseillons pour chaque groupe l'utilisation d'une copie de la jauge sur transparent. Nous avons en outre inclus la jauge sur chaque photo afin de pouvoir vérifier que la copie n'a altéré ni l'échelle de la photo, ni la jauge elle-même.

Le travail devra être effectué en groupes. La photo est divisée en 6 zones (Entraînement, Etalonnage, A, B, C et D). Les magnitudes sont données pour les 5 étoiles d'entraînement. Elles doivent être utilisées pour pratiquer les mesures avec la jauge et faire des lectures précises et reproductibles. Les quatre étoiles d'étalonnage devront être mesurées par chaque groupe.

Afin de réduire les erreurs, chaque étoile devra être mesurée au moins deux fois par chaque groupe. Les résultats seront ensuite moyennés.

La pratique de la jauge avant les véritables mesures est très importante. Cela ne consiste pas simplement à plaquer la jauge sur l'étoile ! Par exemple, une étoile de magnitude 18,5 devra se loger complètement dans le disque correspondant, l'espace environnant devant juste toucher le cercle. Chaque étoile doit être mesurée de cette façon. Si les premières valeurs sont trop faibles ou trop hautes, on peut les corriger en ajoutant ou en retirant une constante.

La Fig. 3 des 'Outils astronomiques' permet de convertir l'indice de couleur (B-V) en température. Des copies du tableau peuvent être utilisées mais l'utilisation d'un tableur (par exemple Excel) est recommandée pour simplifier les calculs et automatiser l'indice de couleur.

Objectifs 1-8

Les valeurs trouvées par une autre équipe scientifique, ainsi que nos propres mesures, sont reportées dans le tableau Fig. 1.



A l'attention du professeur

Star	Résultats scientifiques				Mesures / Calculs ESA/ESO			
	B	V	B-V	T	B	V	B-V	T
1	18,82	17,98	0,84	5250	18,70	17,90	0,8	5403
2	19,02	18,31	0,71	5744	19,00	18,20	0,8	5403
3	19,32	18,65	0,67	5864	19,30	18,70	0,6	6122
4	19,96	19,25	0,71	5699	19,90	19,10	0,8	5403
5	21,05	20,21	0,84	5265	21,00	20,10	0,9	5076
6	18,94	18,12	0,82	5348	19,00	18,20	0,8	5403
7	19,80	19,10	0,70	5757	19,80	19,20	0,6	6122
8	19,06	18,34	0,72	5702	19,00	18,40	0,6	6122
9	19,20	18,53	0,67	5844	19,10	18,50	0,6	5122
10	18,99	18,25	0,74	5614	19,00	18,20	0,8	5403
11	20,07	19,34	0,73	5620	20,10	19,40	0,7	5751
12	17,32	16,37	0,95	4918	17,20	16,40	0,8	5403
13	19,18	18,52	0,66	5884	19,10	18,50	0,6	6122
14	19,53	18,83	0,70	5722	19,60	18,80	0,8	5403
15	20,33	19,60	0,73	5639	20,30	19,50	0,8	5403
16	19,31	18,62	0,69	5792	19,30	18,60	0,7	5751
17	18,57	17,69	0,88	5140	18,70	17,80	0,9	5076
18	18,95	18,15	0,80	5405	18,90	18,10	0,8	5403
19	17,48	16,56	0,92	5012	17,50	16,60	0,9	5076
20	19,66	18,96	0,70	5738	19,60	18,80	0,8	5403
21	19,77	19,08	0,69	5792	19,80	19,00	0,8	5403
22	19,52	18,84	0,68	5818	19,50	18,80	0,7	5751
23	19,50	18,79	0,71	5734	19,50	18,90	0,6	6122
24	18,23	17,34	0,89	5122	18,30	17,40	0,9	5076
25	21,08	20,26	0,82	5345	21,10	20,20	0,9	5076
26	19,04	18,28	0,76	5552	18,90	18,20	0,7	5751
27	18,76	17,89	0,87	5160	18,80	18,10	0,7	5751
28	18,88	18,05	0,83	5309	18,90	18,10	0,8	5403
29	18,27	17,40	0,87	5183	18,30	17,40	0,9	5076
30	18,14	17,28	0,86	5189	18,20	17,30	0,9	5076
31	19,84	19,14	0,70	5783	19,80	19,10	0,7	5751
32	18,62	17,76	0,86	5197	18,60	17,80	0,8	5403
33	19,92	19,22	0,70	5725	19,90	19,20	0,7	5751
34	20,53	19,75	0,78	5487	20,40	19,70	0,7	5751
35	18,82	17,99	0,83	5300	18,80	18,00	0,8	5403
36	18,95	18,19	0,76	5511	18,80	18,20	0,6	6122
37	19,33	18,65	0,68	5812	19,30	18,70	0,6	6122
38	20,53	19,76	0,77	5502	20,50	19,60	0,9	5076
39	19,92	19,21	0,71	5734	19,90	19,20	0,7	5751
40	19,29	18,62	0,67	5861	19,30	18,70	0,6	6122
41	17,91	17,00	0,91	5026	18,00	16,90	1,1	4479
42	19,19	18,50	0,69	5789	19,20	18,50	0,7	5751
43	19,42	18,74	0,68	5831	19,30	18,70	0,6	6122
44	19,36	18,69	0,67	5841	19,30	18,70	0,6	6122
45	18,12	17,24	0,88	5145	18,20	17,20	1,0	4768

Figure 1 : Solutions des étapes 1 à 8

Le tableau donne le numéro des étoiles, les valeurs B, V, (B-V) et T trouvées par des scientifiques et l'équipe de rédaction ESA/ESO.



A l'attention du professeur

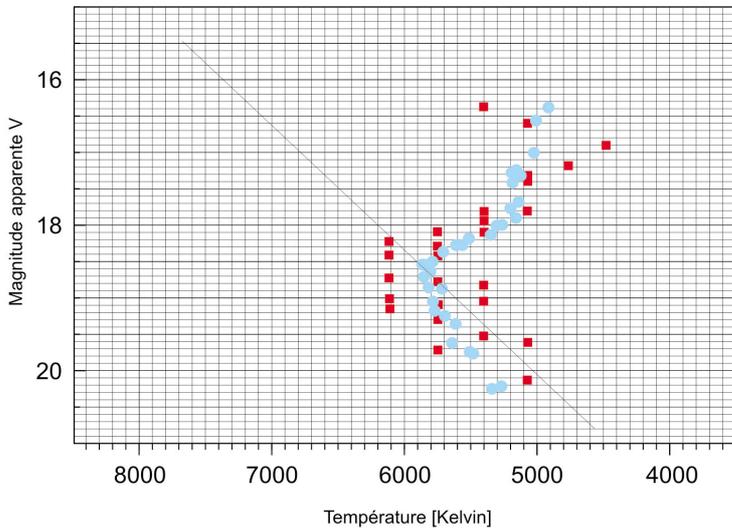


Figure 2 : Diagramme Hertzsprung-Russell de M12

Le diagramme montre nos mesures en rouge et celles obtenues par les scientifiques en bleu.

Objectifs 9-13

La partie inférieure du diagramme (Fig. 3) est très réduite et les résultats dépendent très sensiblement de la pente de la droite de régression. Pour simplifier la procédure et éviter des résultats décevants, nous avons supposé que l'allure de la séquence principale est en gros la même pour tous les amas, quelque soit leur âge, et donc que les deux droites sont parallèles. Nous pouvons alors utiliser la pente de la séquence principale de l'amas des Hyades.

La valeur de D dépend de la position de la séquence principale de l'amas.

Harris donne comme valeur $m_v - M_v = 14,02$ pour M12. Nous avons mesuré **13,9**.

Harris donne aussi $D_{\text{Amas}} = 4,9$ kpc. Valeur qui tient compte de l'extinction interstellaire entre M12 et nous (0,57 magnitudes) dans l'équation de la distance. On a donc $m - M = 5 \log D - 5 + 0,57$. On rappelle que l'extinction interstellaire est le nom donné à l'augmentation de la magnitude apparente due au milieu interstellaire.

Nous avons trouvé $D = 10^{(m-M+5)/5} = 10^{3,78} = \mathbf{6,026 \text{ kpc}}$ sans l'extinction interstellaire et $D = 10^{(m-M-0,57+5)/5} = 10^{3,666} = \mathbf{4,634 \text{ kpc}}$ avec le facteur correctif dû à l'extinction.

Dans les calculs suivants, nous utiliserons la valeur de la distance corrigée de l'extinction : 4,634 kpc.

Objectifs 14-16

D'après nos mesures, une étoile au point de décrochage a une magnitude apparente de **18,7**. Une autre équipe a mesuré pour ce point une valeur de 18,3 (Rosenberg et.al.).

Nous calculons maintenant :

$$(L_{\text{Amas}}/L_{\text{Soleil}}) = (D_{\text{Amas}}/D_{\text{Soleil}})^2 \cdot (I_{\text{Amas}}/I_{\text{Soleil}})$$

Calcul du rapport $(I_{\text{Amas}}/I_{\text{Soleil}})$:

Comme I_{Soleil} est beaucoup plus grand que I_{Amas} , le rapport sera très petit : nous suggérons donc de cal-



A l'attention du professeur

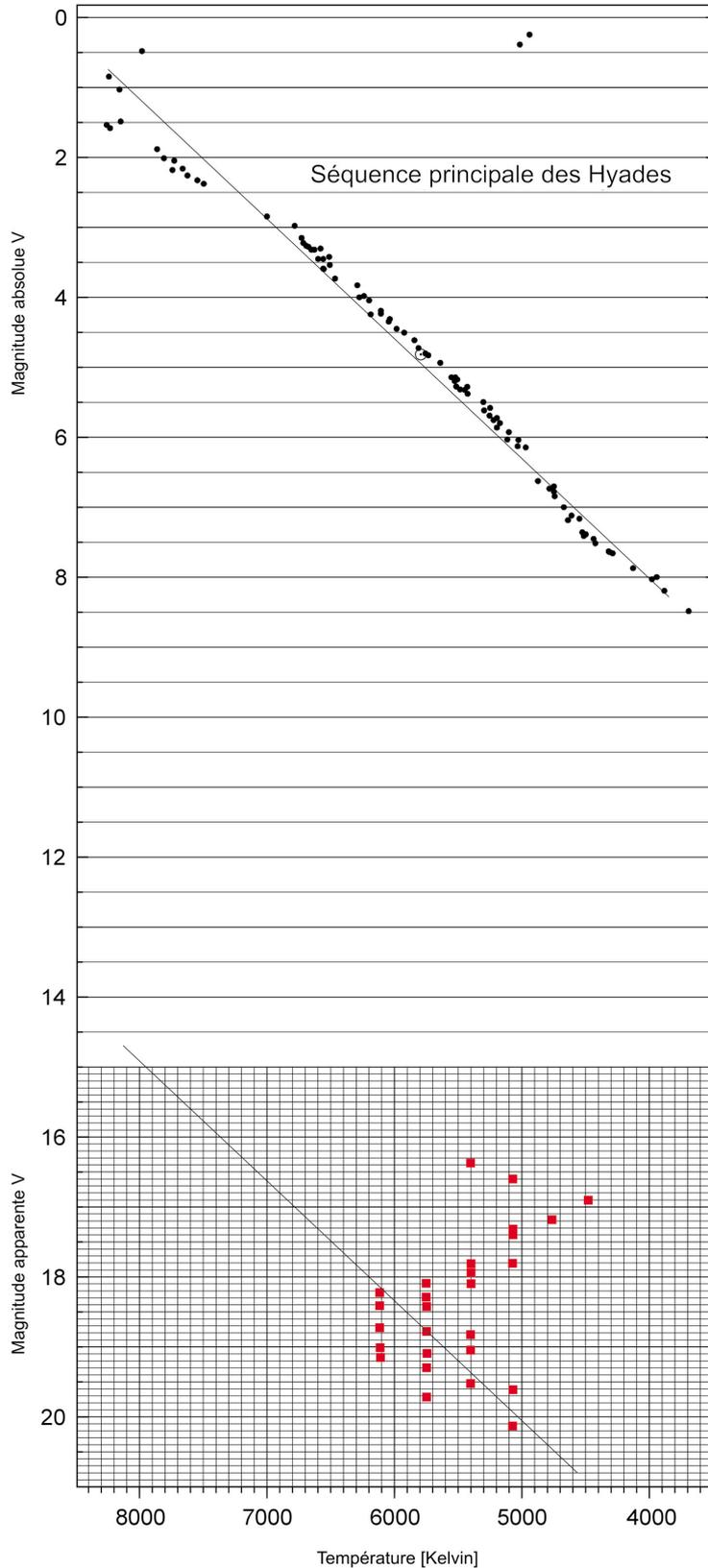


Figure 3 : Diagramme Hertzsprung-Russell de M12 et des Hyades

La partie supérieure est le diagramme H-R des Hyades. Figure aussi le diagramme de M12 à partir de valeurs trouvées par les auteurs.

Les droites représentent l'interpolation des étoiles de la séquence principale.



A l'attention du professeur

culer $I_{\text{Soleil}}/I_{\text{Amas}}$ et de prendre l'inverse pour continuer les calculs.

$$(I_{\text{Soleil}}/I_{\text{Amas}}) = 10^{(m_{\text{Amas}} - m_{\text{Soleil}})/2,5} = 10^{(18,7 - (-26,5))/2,5} = 10^{18,08} = 1,202 \times 10^{18},$$

$$\text{donc } (I_{\text{Amas}}/I_{\text{Soleil}}) = 8,318 \times 10^{-19}$$

Calculs supplémentaires :

$$(D_{\text{Amas}}/D_{\text{Soleil}}) = (4634 \times 3,086 \times 10^{13}) / 1,498 \times 10^8 = 9,559 \times 10^8$$

$$(L_{\text{Amas}}/L_{\text{Soleil}}) = (D_{\text{Amas}}/D_{\text{Soleil}})^2 \cdot (I_{\text{Amas}}/I_{\text{Soleil}}) = (9,559 \times 10^8)^2 \times 8,318 \times 10^{-19} = \mathbf{0,76}$$

$$(M_{\text{Amas}}/M_{\text{Soleil}}) = (L_{\text{Amas}}/L_{\text{Soleil}})^{1/3,8} = \mathbf{0,93}$$

$$(t_{\text{Amas}}/t_{\text{Soleil}}) = (M_{\text{Amas}}/M_{\text{Soleil}})^{-2,8} = 1,224$$

$$t_{\text{Amas}} = 1,224 \cdot t_{\text{Soleil}} = 1,224 \times 8,2 \cdot 10^9 = \mathbf{10 \times 10^9 \text{ années.}}$$

Un autre méthode, plus simple, existe. Son origine empirique (basée sur des mesures) la rend d'autant moins intuitive. Il s'agit d'appliquer la relation observationnelle suivante :

$$M_V(T0) = 2,70 \log_{10} (t) + 1,41,$$

où $M_V(T0)$ est la magnitude absolue du point de décrochage et t est l'âge de l'amas en milliards d'années. Comme

$$M_V(T0) = m_V(T0) - (m_V(T0) - M_V(T0)) = m_V(T0) - (m_V - M_V)$$

(le module de distance est le même pour tout l'amas) nous obtenons :

$$m_V(T0) - (m_V - M_V) = 2,7 \log_{10} (t) + 1,41,$$

ou encore :

$$t = 10^{[(m_V(T0) - (m_V - M_V)) - 1,41] / 2,7}$$

Âges trouvés pour diverses valeurs du point de décrochage et de la distance, à partir des 2 méthodes proposées:

Point de décrochage mesuré [mV]	Distance calculée[pc]	Age, méthode 1 [milliards d'années]	Age, méthode 2 [milliards d'années]
18,7	4634	10,0	18,0
18,85	4634	11,1	20,5
18,5	4634	8,8	15,2
18,3	4900	7,0	11,6
18,3	4634	7,7	12,8
18,3	4500	8,0	13,5
18,7	6026 (no extinc.)	6,8	18,0

Les nombres en gras indiquent les valeurs les plus précises trouvées dans la littérature scientifique.

D'autres méthodes, plus précises, pour calculer l'âge des amas globulaires sont décrites par Chaboyer et al., qui ont trouvé des valeurs comprises entre $11,5 \times 10^9$ ans et $15,9 \times 10^9$ ans pour M12.



A l'attention du professeur

Calculs supplémentaires

Objectif 17

	cm	Degrés	Radians
Image entière	14,8	0,25	
Diamètre angulaire, a	13,0	0,22	$3,833 \times 10^{-3}$

$$d = D_{\text{Amas}} \times a = 4634 \times 3,833 \times 10^{-3} = \mathbf{17,76 \text{ pc}}$$

L'amas se termine quand la densité des étoiles atteint la densité des étoiles environnantes.

Remarque : la valeur du diamètre angulaire a correspond à $0,22 \times 60 = 13,2'$. Dans l'Atlas Uranometria 2000.0, le diamètre angulaire donné est $14,5'$.

Objectif 18

$$L_{\text{Amas}}/L_{\text{Soleil}} = 2,512^{(M_{\text{Soleil}} - M_{\text{Amas}})} = 2,512^{4,8 - (-7,32)} \sim \mathbf{70500}$$

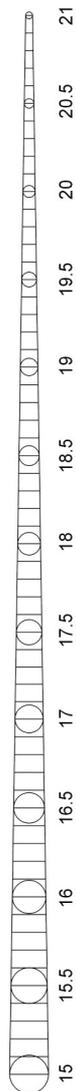
Le nombre total d'étoiles dans M12 est d'environ 150000 ± 35000 , d'après Carl Grillmair (SIRTF Science center, communication privée, 2002).



A l'attention du professeur

Figure 4 : Jauge de mesure

Cette jauge, pour les Objectifs 1 à 8, doit être reproduite sur transparent.



www.astroex.org

