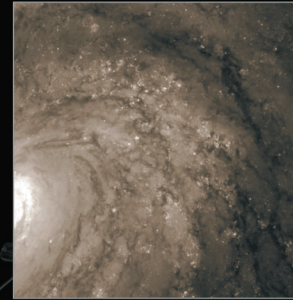


# LES EXOS D'ASTRO DE L'ESA/ESO

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



Exercice 2

Détermination de la distance à M100 à l'aide des étoiles variables Céphéides  
à partir d'observations du télescope spatial Hubble (NASA/ESA)





# Table des matières

## Les Exos d'Astro de l'ESA/ESO — 2

### Préface

- Préface ..... page 2

### Introduction

- Cosmologie et mesures de distances ..... page 3
- Utiliser les Céphéides comme indicateurs de distance..... page 5
- M100, une grande spirale ..... page 7

### Objectifs

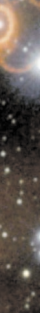
- Mesures et calculs ..... page 8
- Objectif 1 ..... page 8
- Objectif 2 ..... page 9
- Objectif 3 ..... page 10
- Objectif 4 ..... page 10
- Objectif 5 ..... page 10
- Objectif 6 ..... page 11
- Objectif 7 ..... page 11
- Objectif 8 ..... page 11

### Lectures conseillées

- Articles scientifiques ..... page 12

### A l'attention du professeur

- A l'attention du professeur ..... page 14





## Préface

Les Exos d'Astro de l'ESA/ESO - 2

### Détermination de la distance à M100 à l'aide des étoiles variables Céphéides

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 télescope spatial Hubble (NASA / ESA)**  
Depuis son orbite au-dessus de la Terre, le télescope spatial capture des vues spectaculaires de l'Univers.



## Introduction

### Cosmologie et mesures de distances

Quel est l'âge de l'Univers ? Quelle est sa vitesse d'expansion ? Va-t-il un jour se contracter ?

Ce sont là quelques unes des questions fondamentales de la cosmologie. Elles ont longtemps attendu des réponses satisfaisantes.

Le destin de l'Univers est étroitement lié à l'évolution future de son taux d'expansion. Si l'expansion se ralentit suffisamment, alors l'Univers commencera un jour à se contracter.

L'observation suggère actuellement qu'il est plus probable que l'Univers continue indéfiniment à se

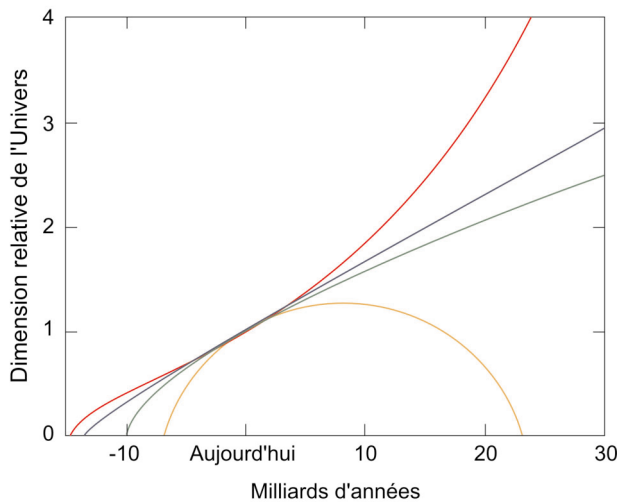
dilater.

L'expansion de l'Univers fait que toutes les galaxies s'éloignent d'un observateur donné (situé par exemple sur la Terre) et que leur vitesse de fuite est d'autant plus grande qu'elles sont plus éloignées.

L'expression connue sous le nom de Loi de Hubble (formulée par Edwin Hubble en 1929) met en relation la distance  $D$  séparant l'objet de l'observateur et sa vitesse de fuite  $v$ .

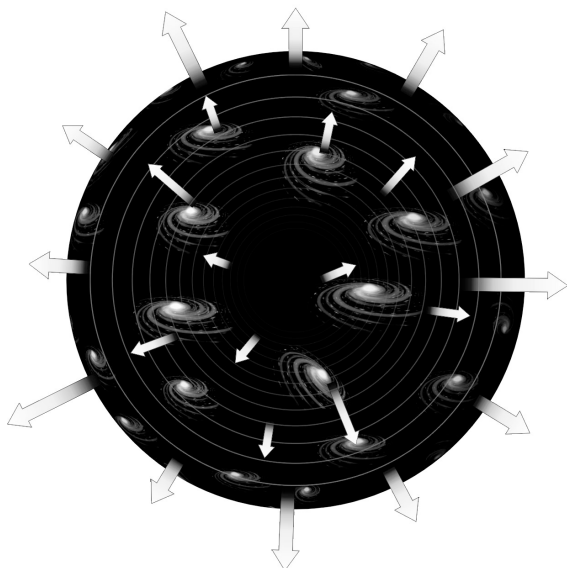
Cette loi s'écrit :

$$v = H_0 \cdot D$$



**Figure 2 : Le destin de l'Univers**

Ce graphique indique la taille de l'Univers en fonction du temps — en d'autres termes, il montre comment il se dilate et/ou se contracte au cours du temps. Les différentes lignes 'dans le futur' (dans la partie droite du diagramme) montrent le destin de l'Univers selon les différents modèles : en expansion indéfinie ou en contraction.



**Figure 3 : Des galaxies qui s'enfuient**

Ce diagramme illustre la façon dont les galaxies s'éloignent les unes des autres en raison de l'expansion de l'Univers.



## Introduction



**Figure 4 : Des galaxies lointaines à haut 'redshift'**

Cette image, prise avec la Caméra Planétaire à Grand Champ (WFPC2) du télescope spatial HUBBLE, montre de nombreuses galaxies, situées à plusieurs milliards d'années-lumière. La plupart des taches floues sont des galaxies, contenant chacune des milliards d'étoiles. Ces galaxies s'éloignent de nous à de grandes vitesses.

Elle établit que les galaxies de notre Univers s'éloignent toutes les unes des autres avec une vitesse,  $v$ , proportionnelle à la distance  $D$  qui les sépare.  $H_0$  est une caractéristique de notre Univers, appelée constante de Hubble, très importante dans de nombreuses questions cosmologiques ; c'est un indicateur de l'actuelle vitesse d'expansion de l'Univers.

L'âge de l'Univers,  $t$ , peut en effet s'exprimer approximativement par l'inverse de la constante de Hubble  $H_0$  :

$$t = 1/H_0$$

La connaissance de la valeur de  $H_0$  est donc fondamentale pour l'estimation de l'âge de l'Univers. Mais comment la mesurer ? Il 'suffit' de mesurer la vitesse de fuite  $v$  et la distance  $D$  d'un objet, en général une galaxie, ou mieux encore, d'un ensemble de galaxies, pour trouver une valeur moyenne.

La *vitesse de fuite* est relativement facile à déterminer : nous savons en effet mesurer ce que l'on appelle le décalage vers le rouge de la lumière d'une galaxie, ou 'redshift'. C'est une conséquence directe du déplacement d'un objet qui





## Introduction



**Figure 5 : Henrietta Leavitt**

Les travaux d'Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) ont révolutionné la compréhension des problèmes posés par l'éclat et la variabilité des étoiles. A l'Observatoire du Harvard College, Leavitt a mesuré précisément les magnitudes photographiques de 47 étoiles, destinées à

servir de « bougies standards » pour la détermination des magnitudes de toutes les autres étoiles. Leavitt découvrit et répertoria plus de 1500 variables dans les Nuages de Magellan. C'est à partir de ce catalogue qu'elle découvrit que les Céphéides les plus brillantes avaient des variations de plus longue période, propriété utilisée aujourd'hui pour calibrer l'échelle des distances dans notre Univers. (Courtoisie de AAVSO).

s'éloigne de nous. C'est un décalage Doppler de la lumière émise par chaque galaxie, et il résulte une modification des longueurs d'onde de la lumière qu'elles émettent vers l'extrémité rouge du spectre.

Puisque la longueur d'onde de la lumière rouge est supérieure à celle de la lumière bleue, c'est que la longueur d'onde a augmenté pendant son voyage vers la Terre.

La variation relative de la longueur d'onde due à ce décalage Doppler est appelée redshift : les galaxies à haut redshift ont donc des vitesses de fuite élevées.

### Utiliser les Céphéides comme indicateurs de distance

La mesure de la distance d'un objet astronomique est très difficile et constitue l'un des plus grands défis lancés aux astronomes.

Au cours des siècles, on a utilisé divers indicateurs de distance. L'un d'eux est une famille d'étoiles variables connues sous le nom de Céphéides.

Les Céphéides sont des étoiles rares et très lumineuses dont l'éclat varie périodiquement. Leur nom provient de  $\delta$ -Céphée, étoile de la constellation de Céphée, premier exemple connu de ce type particulier d'étoiles variables et particulièrement facile à observer à l'œil nu.

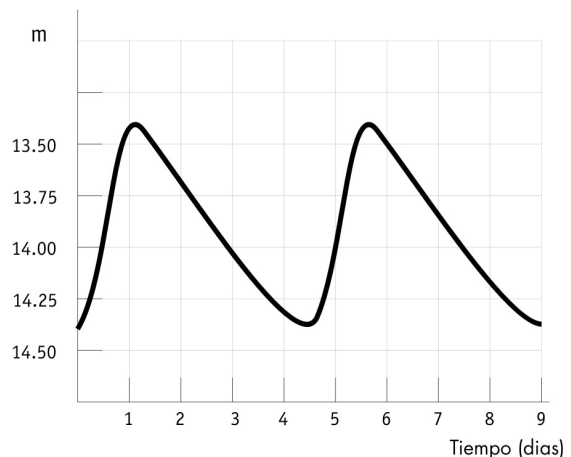
En 1912, l'astronome Henrietta Leavitt (voir Fig.

5), observa 20 Céphéides dans le Petit Nuage de Magellan (SMC). Les faibles écarts de distance entre elles à l'intérieur du Nuage sont négligeables vis-à-vis de la distance beaucoup plus grande à laquelle se trouve le Nuage lui-même par rapport à nous.

Les étoiles les plus brillantes de ce groupe sont vraiment intrinsèquement plus brillantes. Ce n'est pas parce qu'elles sont plus proches de nous.

Henrietta Leavitt découvrit une relation entre l'éclat intrinsèque des Céphéides et la période de leurs pulsations et montra que les Céphéides intrinsèquement les plus brillantes avaient les plus longues périodes.

L'observation et la mesure de la période d'une



**Figure 6 : La courbe de lumière caractéristique d'une Céphéide**

La courbe de lumière d'une variable Céphéide a une forme caractéristique, avec une croissance rapide de l'éclat, suivie d'une décroissance beaucoup plus douce. L'amplitude des variations est typiquement 1-2 magnitudes.

Céphéide quelconque permet ainsi de déduire sa luminosité intrinsèque et par comparaison avec la luminosité apparente, de calculer sa distance. C'est ainsi que les variables Céphéides servent de 'bougies standard' dans l'Univers et peuvent servir elles-mêmes d'étalon de distance pour calibrer (placer le point zéro) d'autres indicateurs de distance. La distinction entre les Céphéides et d'autres variables se fait grâce à leur courbe de lumière, dont la forme est caractéristique (Fig. 6).

On obtient naturellement les mesures les plus précises de vitesse et de distance pour des objets relativement proches de notre Voie Lactée.



## Introduction

Avant de disposer du télescope Hubble, des observations terrestres avaient détecté des Céphéïdes dans les galaxies jusqu'à 3,5 Mégaparsecs de notre Soleil (voir la définition du parsec dans les Outils mathématiques).

Hélas, jusqu'à ces distances, un autre effet entre aussi en jeu. Les galaxies exercent une attraction gravitationnelle les unes sur les autres et ce phénomène introduit une composante non uniforme dans leur déplacement : cela affecte nos mesures de la composante uniforme de la vitesse due à l'expansion de l'Univers. Le mouvement dynamique particulier de ces galaxies (vitesse propre) se produit en effet avec une vitesse comparable à la vitesse d'expansion de notre

région de l'Univers.

Pour étudier correctement l'expansion d'ensemble de l'Univers, il faut fiabiliser les mesures de distances pour des galaxies plus éloignées, situées là où la vitesse d'expansion est très supérieure à leur vitesse propre.

Hubble a mesuré des Céphéïdes situées dans des galaxies à des distances allant jusqu'à 20 Mégaparsecs.

Avant que le télescope Hubble ait effectué ces mesures, l'estimation de l'âge de l'Univers allait, selon les astronomes, de 10 à 20 milliards d'années. Aujourd'hui, l'accord est bien meilleur et l'on pense qu'il se situe entre 12 et 14 milliards d'années.



**Figure 7 : La galaxie spirale M100**

*Si nous pouvions observer notre galaxie, la Voie Lactée, de face, depuis un vaisseau spatial extragalactique, sa forme ressemblerait à la galaxie spirale M100.*

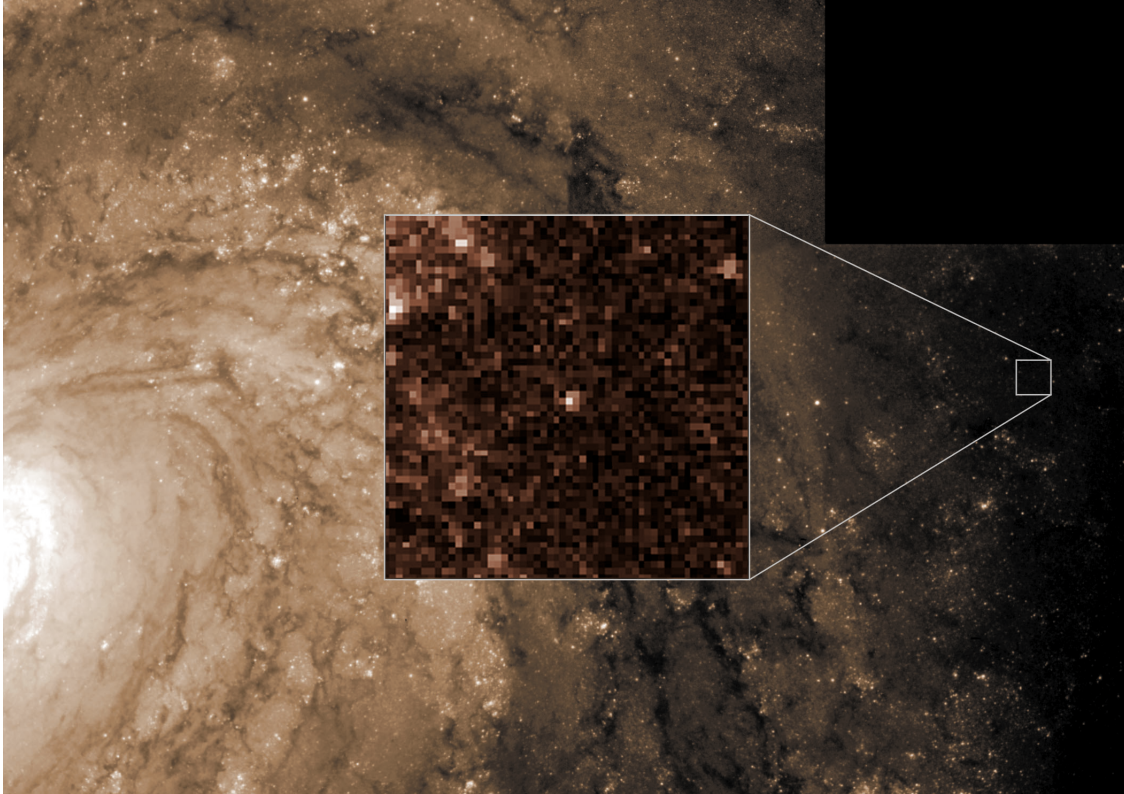
*Les galaxies spirales sont riches en poussière et gaz. La poussière apparaît dans cette image comme des lignes sombres, entre les majestueux bras spiraux.*

*M100 est une cible favorite des astronomes amateurs, qui la cherchent au printemps dans la direction de la constellation Coma Berenices (La chevelure de Bérénice). Cette image a été prise avec la Caméra Planétaire à Grand Champ 2 de Hubble. Les couleurs bleues correspondent aux régions riches en étoiles jeunes et chaudes.*





## Introduction



**Figure 8 : Hubble chasse les étoiles variables Céphéides dans M100**

*La caméra à haute résolution de Hubble a détecté et extrait l'une des Céphéides utilisées dans cet exercice. L'étoile est située dans une région d'étoiles en formation, dans l'un des bras spiraux de la galaxie (l'étoile est au centre du cadre).*

L'un des projets clé de Hubble est (à long terme), de trouver une meilleure valeur de la constante de Hubble et de l'âge de l'Univers. Dix-huit galaxies situées à différentes distances ont été examinées pour y détecter des Céphéides. L'une d'elles s'appelle M100.

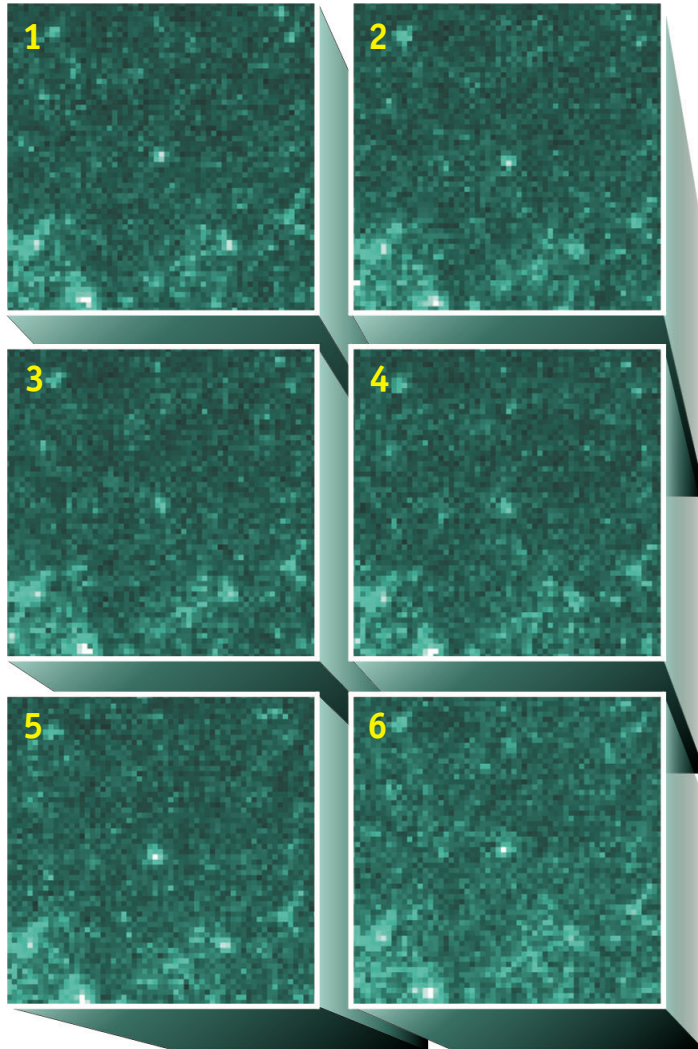
### M100, une grande spirale

La galaxie M100 est une magnifique galaxie spirale, située dans le grand amas de galaxies de la Vierge. Cet amas abrite 2500 galaxies. M100 est un système en rotation, composé de gaz, de poussières et d'étoiles, assez semblable à notre Voie Lactée, et nous la voyons de face. Son nom vient du fait qu'elle porte le numéro 100 dans le catalogue Messier des objets non stellaires.

M100 est l'une des plus lointaines galaxies où l'on ait pu effectuer des mesures sur des Céphéides. Cet exercice est basé sur les images fournies par Hubble et sur quelques données qui la concernent.



## Objectifs



**Figure 9 : Une variable céphéide dans M100**

Voici six images de l'une des Céphéides de la galaxie M100, prises à des dates différentes. La Céphéide est au centre de chaque cadre. Il apparaît clairement que la luminosité de l'étoile varie au cours du temps.

### Mesures et calculs

La relation Période-Luminosité des Céphéides a été revue maintes fois depuis les premières mesures d'Henrietta Leavitt. La meilleure estimation actuelle donne :

$$M = -2,78 \cdot \log (P) - 1,35$$

Où M est la magnitude absolue de l'étoile et P sa période exprimée en jours. Les courbes de lumière des 12 Céphéides repérées par Hubble dans M100 se trouvent pages 9 et 10.

### Objectif 1

- ?
- En exploitant ces courbes, calculez la magnitude absolue M de chacune des 12 étoiles.

Notre objectif est de calculer la distance à M100. Souvenez-vous de l'équation de la distance : la seule magnitude absolue ne suffit pas pour le calcul de la distance ; il nous faut aussi la magnitude apparente.

Si l'on fait abstraction des problèmes posés par la mesure précise des quantités de lumière reçue



## Objectifs

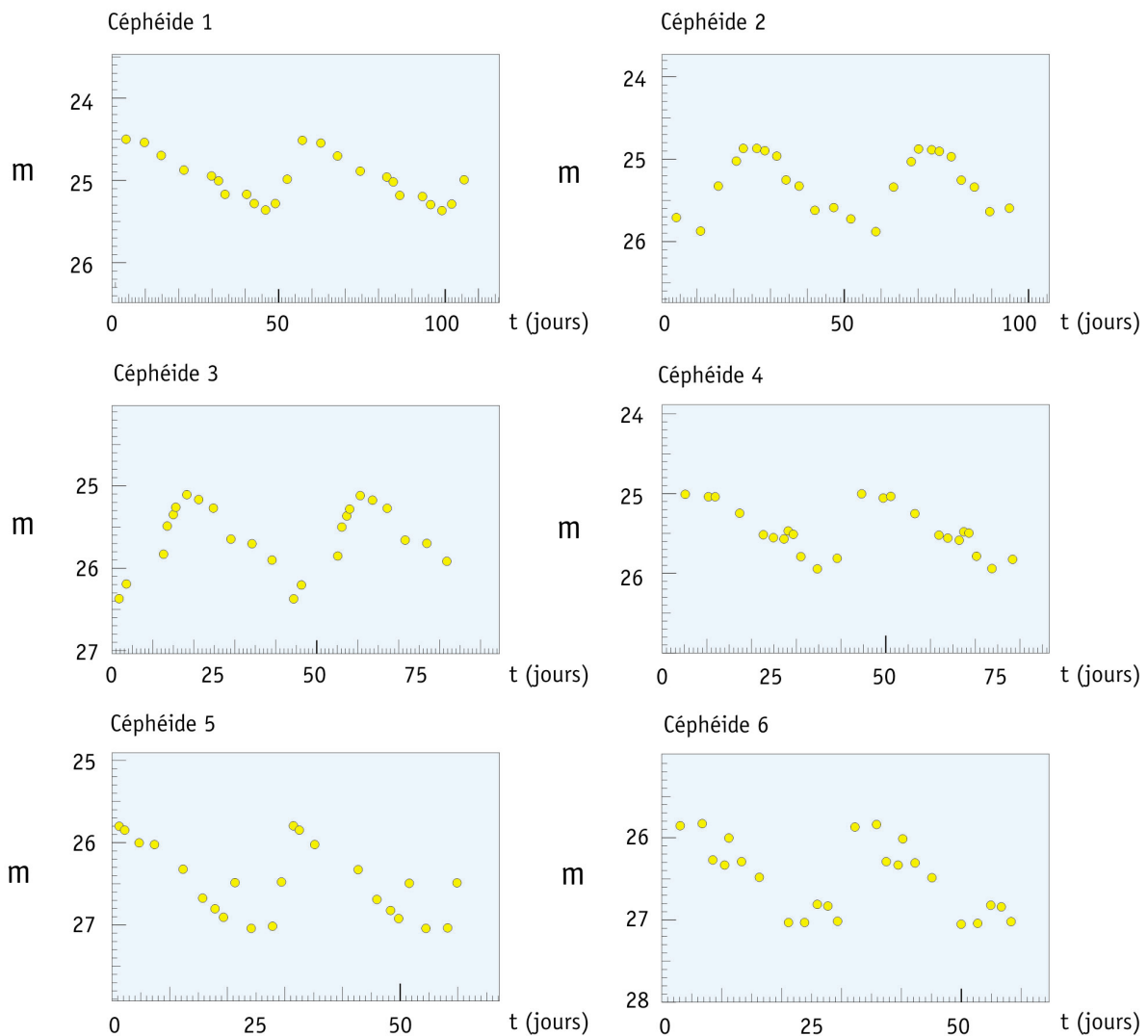
et l'étalonnage des magnitudes, les astronomes ont débattu pendant un siècle sur le choix de la valeur  $m$  qu'il fallait introduire dans l'équation de distance, puisque la luminosité d'une Céphéïde ne cesse de varier.

### Objectif 2

- ? Proposez une méthode pour estimer la magnitude apparente  $m$  à partir de l'étude des courbes.

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, les astronomes mesuraient la magnitude apparente minimum ( $m_{\min}$ ), la magnitude apparente maximum ( $m_{\max}$ ), et calculaient la moyenne ( $\langle m \rangle$ ) des deux.

Avec cette méthode, ou toute autre de votre choix, vous disposez maintenant des informations nécessaires pour déterminer la distance à M100.



**Figure 10 : Courbes de lumière des Céphéïdes**

Ces courbes de lumière concernent les douze Céphéïdes observées par Hubble dans M100. La magnitude absolue,  $M$ , est déterminée à partir de la période des Céphéïdes. Adapté de Freedman et al. (1994).





## Objectifs

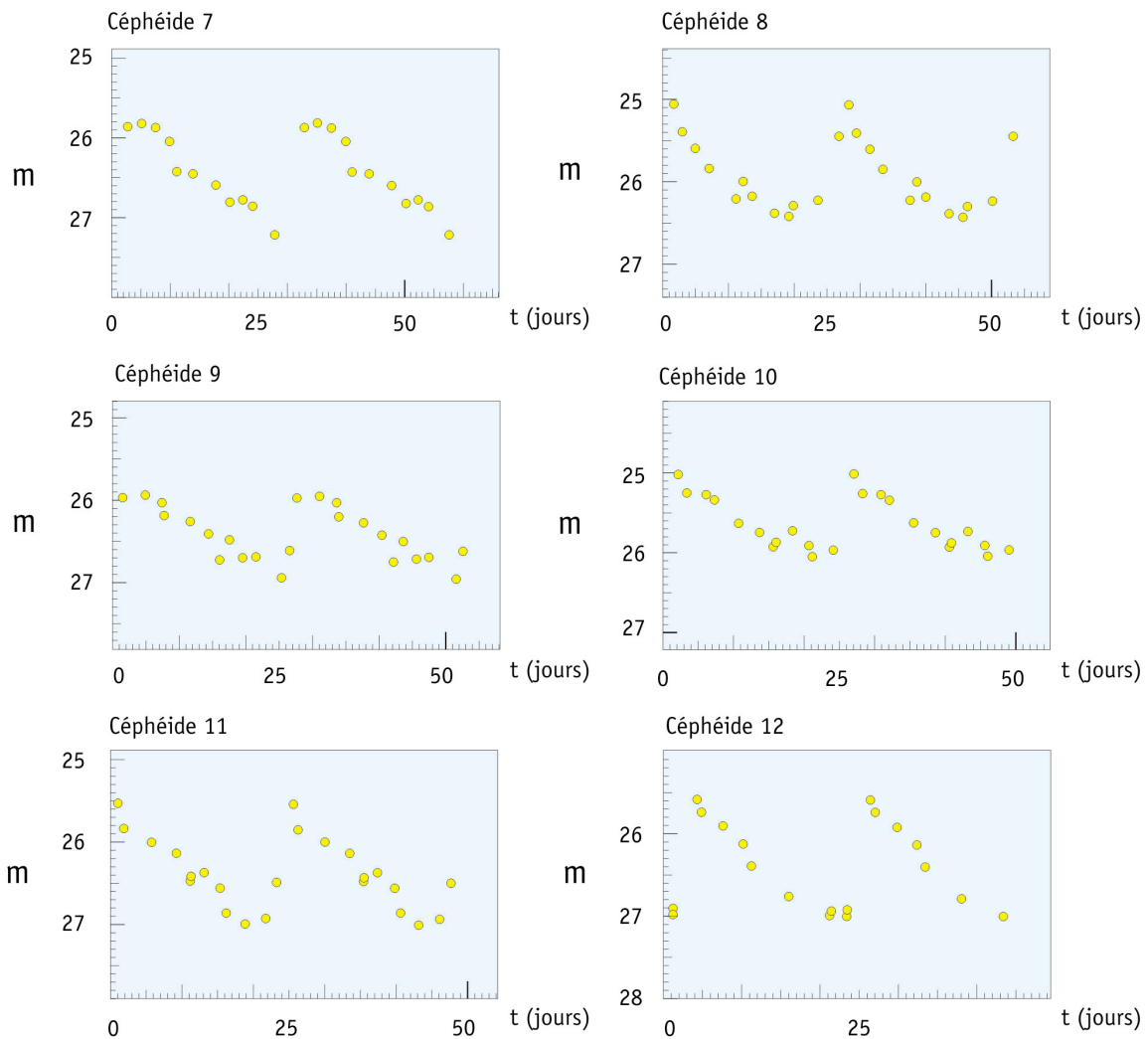


Figure 10 (suite) : Courbes de lumière des Céphéides

### Objectif 3

- ? Calculez  $\langle m \rangle$  et D (en Mégaparsecs) pour
- chacune des 12 Céphéides.

Il n'est pas interdit de refaire le même calcul 12 fois. Vous pouvez cependant réduire votre travail en écrivant un court programme sur votre calculatrice ou utiliser un tableur.

### Objectif 4

- ? Vous n'avez sans doute pas trouvé exactement les mêmes distances pour les différentes Céphéides. Pour quelles raisons selon vous ?

### Objectif 5

- ? Vous avez maintenant déterminé la distance aux 12 Céphéides de M100. Cela vous donne-t-il la distance à M100 ?



## Objectifs

- ? Les écarts trouvés entre les distances de ces 12 étoiles peuvent-ils être expliqués par le fait qu'elles occupent des positions différentes dans la galaxie M100 ?
- ? Recherchez la valeur du diamètre de notre Galaxie (la Voie Lactée) dans une encyclopédie ou sur l'Internet.  
En supposant que M100 est du même ordre de grandeur, revoyez votre réponse à la question précédente.

### Objectif 6

- ? Calculez la valeur moyenne des distances aux 12 Céphéides et considérez que c'est la distance à M100.
- ? Dans la publication scientifique originale de cette étude des images de Hubble, la distance à M100 était estimée à  $17,1 \pm 1,8$  Mpc. Cette étude tenait compte de la présence de poussières interstellaires. Comparez votre propre résultat avec cette valeur.

### Objectif 7

Comme vous l'avez lu dans l'introduction (page 5), la vitesse de fuite  $v$  d'une galaxie comme M100, associée à sa distance, vous permet de calculer la vitesse d'expansion de l'Univers comme l'exprime la loi de Hubble. La constante de Hubble  $H_0$  s'exprime en km/s/Mpc. La vitesse de fuite de l'amas de la Vierge, dont M100 fait partie, a été mesurée :  $v = 1400$  km/s. (Freedman et al., 1994).

- ? Calculez la constante de Hubble à partir de cette valeur de  $v$  et de votre estimation de la distance  $D$ .

### Objectif 8

- ? En admettant que l'âge de l'Univers est donné par  $t = 1/H_0$ , calculez sa valeur, sans oublier de choisir les bonnes unités. Comparez-le avec l'âge de la Terre.



## Lectures conseillées

### Articles scientifiques

- Freedman, W.L., Madore, B.F., Mould, J.R., Ferrarese, L.; Hill, R., Kennicutt, R.C., Jr., Saha, A., Stetson, P.B., Graham, J.A., Ford, H., Hoessel, J.G., Huchra, J., Hughes, S.M., and Illingworth, G.D., 1994, *Nature*, 371, 757-762.: *Distance to the Virgo cluster galaxy M100 from Hubble Space Telescope observations of Cepheids.*

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





## Colophon



**EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY**  
Education and Public Relations Service

**Les Exos d'Astro de l'ESA/ESO**  
**Exercice 2 : Détermination de la distance à M100**  
**à l'aide des étoiles variables Céphéides**  
**1<sup>ère</sup> édition (traduction de la 2<sup>ième</sup> 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 (or 3200 60)  
Fax : +49 89 3200 64 80 (or 320 32 62)  
E-mail : [info@astroex.org](mailto:info@astroex.org)

Texte :  
Anne Værnholt Olesen, Lars Lindberg Christensen,  
Jean-Marc Brauer, and Artraud Bacher

Graphiques et mise en page :  
Martin Kornmesser

Traduction :  
Francis Berthomieu

Lecture des épreuves :  
Nausicaa Delmotte

Coordination :  
Lars Lindberg Christensen and Richard West

Merci au Planétarium Tycho Brahé, Danemark, pour  
son inspiration, à Wendy Freedman pour avoir fourni  
les données, et à Nina Troelsgaard Jensen,  
Frederiksberg Seminarium, pour ses commentaires.



## A l'attention du professeur

### Résumé

Dans cet exercice, nous mesurons la période et la magnitude apparente des étoiles Céphéides de la galaxie M100.

La magnitude absolue est tirée de la relation Période-Luminosité et la distance à M100 se déduit ainsi de l'équation de la distance. On calcule enfin la constante de Hubble (en utilisant la vitesse de fuite de M100, obtenue par d'autres scientifiques) et l'on estime l'âge de l'Univers.

Ce guide à l'attention du professeur donne les réponses aux diverses questions et ouvre une discussion sur les approximations et les simplifications effectuées dans cet exercice.

L'hypothèse d'une expansion de l'Univers à un taux constant depuis le Big Bang n'est correcte, à proprement parler, que pour certains modèles cosmologiques. Une telle expansion n'est en effet possible que si l'Univers contient très peu de matière, puisque toute matière, qu'elle soit visible ou obscure, et par le biais de l'interaction gravitationnelle, doit ralentir l'expansion. Les résultats récents n'ont pas donné de conclusions fermes sur ce problème de l'expansion de l'Univers, et nous pouvons encore considérer que l'expression utilisée dans l'exercice est une approximation simple mais raisonnable.

Il faut noter que, selon certains modèles cosmologiques récents, l'Univers a subi une phase de décroissance de son expansion (due aux effets gravitationnels de la matière noire ou ordinaire) qui s'est achevée environ 5 milliards d'années après le Big Bang. Depuis lors l'Univers semble avoir suivi une phase d'expansion accélérée où une mystérieuse 'gravitation répulsive' aurait pris le dessus. Cette force est connue sous les noms d' 'énergie noire' ou de 'quintessence' (le cinquième élément).

### Objectifs 1, 2 et 3

Avec la méthode suggérée au point 2 et des mesures simples à la règle, nous avons obtenu les résultats suivants :

numéro de la Céphéide	t2	t1	période = t2-t1	M	m max	m min	m moyenne	D Mpc	D moyenne Mpc
1	100,0	46,5	53,5	-6,15	24,50	25,30	24,90	16,25	19,85
2	58,5	11,0	47,5	-6,01	24,90	25,90	25,40	19,15	
3	61,0	18,5	42,5	-5,88	25,10	26,40	25,75	21,15	
4	74,0	35,0	39,0	-5,77	25,00	25,95	25,48	17,77	
5	50,0	19,0	31,0	-5,50	25,80	27,05	26,43	24,22	
6	50,0	21,0	29,0	-5,42	25,80	27,10	26,45	23,61	
7	35,0	4,5	30,5	-5,48	25,80	27,20	26,50	24,85	
8	46,0	19,0	27,0	-5,33	25,05	26,40	25,73	16,25	
9	31,0	5,0	26,0	-5,28	25,90	27,00	26,45	22,22	
10	27,0	2,5	24,5	-5,21	25,00	26,10	25,55	14,20	
11	43,0	19,0	24,0	-5,19	25,55	27,00	26,28	19,61	
12	38,0	16,0	22,0	-5,08	25,60	27,00	26,30	18,90	

Comme M100 est très lointaine, d'autres méthodes (construire par exemple le graphe  $m(P)$ ) ne fonctionnent pas bien. Nous avons préféré fournir la relation Période-Luminosité plutôt que de demander aux étudiants de déduire eux-mêmes les deux coefficients qui apparaissent dans l'équation. L'accès à l'exercice est ainsi ouvert à un plus grand nombre d'étudiants — ce que nous considérons comme un avantage positif (avec raison bien sûr :-)).



## A l'attention du professeur

### Objectif 4

La raison qui vient naturellement à l'esprit pour toute déviation dans les résultats est l'incertitude inhérente à toute mesure. Nos mesures, effectuées à la règle, ne sont pas très précises. La précision pourrait être accrue en faisant usage de méthodes plus raffinées.

Une autre raison peut être qu'il existe deux classes de Céphéïdes et que leurs caractéristiques sont légèrement différentes.

### Objectif 5

Oui, étant donné l'échantillon (relativement) grand de Céphéïdes, nous disposons d'une estimation raisonnable de la distance à M100.

Non, la taille de la galaxie est petite en comparaison de la distance à M100.

La Voie Lactée a un diamètre d'environ 25 kpc. La réponse à la question précédente est définitivement NON.

### Objectif 6

Avec cette méthode rudimentaire, une valeur de 19,8 Mpc est assez raisonnable.

Le problème est de faire comprendre aux étudiants que les incertitudes sont constitutives de nombreuses sciences et plus particulièrement de l'astronomie.

### Objectif 7

$$H_0 = v/D = 1400/19,85 = \mathbf{70,53 \text{ km/s/Mpc}}$$

Cette valeur se situe dans la fourchette admise.

En général on considère que  $H_0$  est comprise entre 60 et 80 km/s/Mpc.

### Objectif 8

En convertissant les Mpc en km, nous obtenons  $H_0 = 2,286 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ .

$$t = 1/H_0 = 4,375 \times 10^{17} \text{ s} = \mathbf{13,87 \times 10^9 \text{ années}}$$

C'est environ le triple de l'âge de la Terre (~ 4,6 milliards d'années). Cette question a été posée pour tenter de faire établir une comparaison de l'âge de l'Univers avec quelque chose dont les étudiants peuvent avoir eu préalablement connaissance.







[www.astroex.org](http://www.astroex.org)

