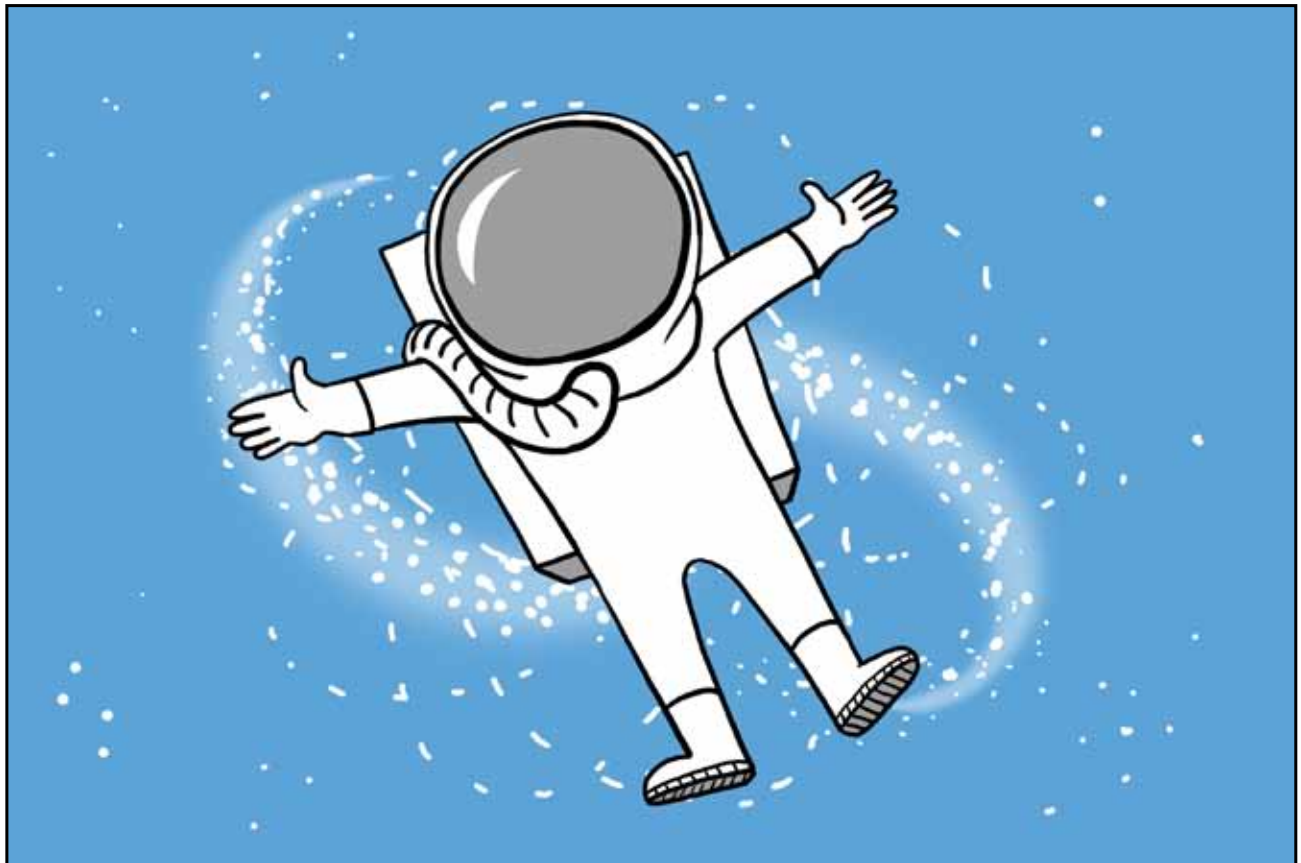


# MESURER LA DISTANCE DE LA GALAXIE M100

L'ENQUÊTE





## Astro Exos

### Responsables éditoriaux

Roland Lehoucq et Jean-Marc Bonnet-Bidaud

### Contributeurs

Jean-Marc Bonnet-Bidaud, François Saint-Jalm

### Conception graphique

Aurélie Bordenave, [aureliebordenave.fr](http://aureliebordenave.fr)

### Photo de couverture :

Image de la galaxie M100 (*European Southern Observatory* (ESO))

Cet Astro Exo est librement adapté de l'exercice « Détermination de la distance à M100 à l'aide des étoiles variables Céphéides » de l'ESA/ESO avec l'accord de l'Observatoire Européen Austral (ESO)



Introduction



Cours / rappel historique



Références



Données



À vous de le faire!



Glossaire



île de France







## Introduction

La distance des galaxies est la donnée essentielle qui a permis de démontrer que l'Univers ne se limitait pas aux étoiles qui nous entourent dans notre Voie lactée. Couplée à la détermination de la vitesse des galaxies, elle a aussi permis il y a près d'un siècle de démontrer l'expansion de l'Univers. Cet exercice montre comment la distance d'une galaxie peut être calculée à partir de l'observation de certaines étoiles variables, les Céphéides.



## Sortir de la sphère des fixes

Suivant les astronomes de la Grèce antique, on a longtemps pensé en Europe que les étoiles se trouvaient toutes à la même distance sur une sphère appelée « sphère des fixes ».

La première mesure moderne de la distance des étoiles a été tentée par l'astronome hollandais Christiaan Huygens dans son livre *Cosmotheoros* publié en 1698. Il s'efforça de comparer l'éclat apparent de l'étoile Sirius avec celui du Soleil et en conclut qu'elle se situait à une distance 100 000 fois égale à celle du Soleil, ce qui fait à peu près 1,5 années-lumière (*Pensées meslées* – 1686). La distance réelle étant de 8,6 années-lumière, son résultat n'était pas si mauvais et présentait l'intérêt d'agrandir considérablement l'espace dans lequel les astronomes de l'époque s'imaginaient exister.



FIG. 1. – La sphère des fixes telles que se la représentaient les astronomes de l'Antiquité. Gravure sur bois de C. Flammarion <sup>1</sup>

1. Voir [http://fr.wikipedia.org/wiki/Gravure\\_sur\\_bois\\_de\\_Flammarion](http://fr.wikipedia.org/wiki/Gravure_sur_bois_de_Flammarion)



FIG. 2. – Christiaan Huygens (1629 - 1695) peint en 1671 par Gaspard Netscher

L'amélioration des instruments d'observation au XIX<sup>e</sup> siècle permit de développer la méthode dite des **parallaxes annuelles**. Elle consiste à observer le mouvement apparent des étoiles proches sur le fond du ciel contenant des objets bien plus lointains. Ce mouvement apparent est dû au fait que le lieu d'observation (la Terre) se déplace autour du Soleil. Il s'agit donc d'utiliser le diamètre de l'orbite terrestre comme étalon pour déterminer la distance des étoiles qui sont relativement proches de nous. Cette méthode n'est pas obsolète puisqu'elle a été récemment remise en œuvre par le satellite Hipparcos (en opération de 1989 à 1993) et sera à la base des mesures du satellite Gaia lancé en décembre 2013. Hipparcos a permis de mesurer la distance de 118 000 étoiles situées à moins de 500 années-lumière de nous avec, pour 20 000 étoiles, une précision inégalée inférieure à 10%. Gaia devrait mesurer la distance de 20 millions d'étoiles avec une précision meilleure que 1% jusqu'à 60 000 années-lumière. Mais cette méthode de la parallaxe ne permet pas de mesurer des distances au delà de notre Voie lactée.

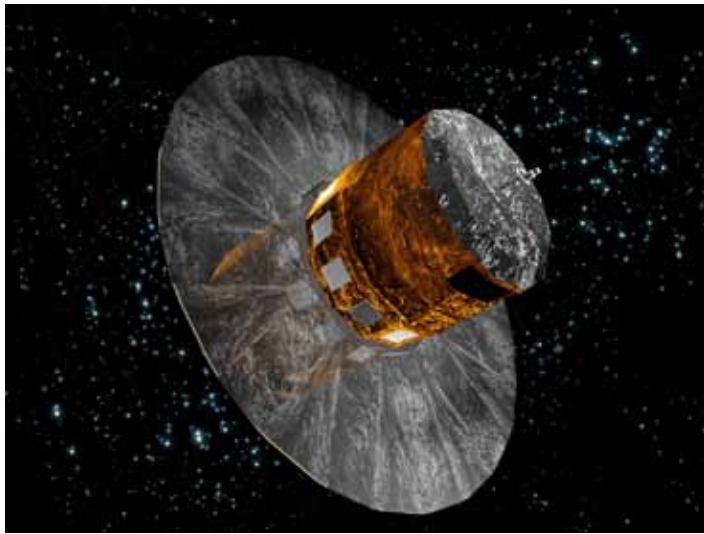


FIG. 3. – Le satellite Gaia



FIG. 4. – Le satellite Hipparcos

Au début du  $xx^e$  siècle, la mise en service des premiers grands télescopes au sol a révélé dans le ciel la présence de nébuleuses, régions lumineuses diffuses, qui se révèlent être en fait une collection d'étoiles. Ces nébuleuses provoquent en 1920 un grand débat. Font-elles partie avec notre Voie lactée d'un seul et même ensemble ou sont-elles des îlots d'étoiles totalement séparés ?

Ce sont les mesures de distance de certaines étoiles qui vont trancher et prouver que ces nébuleuses sont beaucoup plus loin que les étoiles qui nous environnent. En raison de leur d'aspect « laiteux » sur le ciel, elles seront baptisés « galaxies » (du grec *galaktikos*, laiteux).

## Une révolution : utiliser les céphéides comme indicateurs de distance



Les Céphéides sont une catégorie d'étoiles variables qui doit son nom à l'étoile  $\delta$ -Cephei (Al Radif). Ces étoiles sont des géantes assez massives qui sont arrivées à un stade de leur évolution où, dans des couches de profondeur intermédiaire, leur hélium se transforme en carbone. Il s'installe alors un régime d'oscillations de relaxation dont la période dépend essentiellement de la masse de l'étoile. Ce cycle correspond à une phase d'emballlement des réactions nucléaires qui surchauffe la zone interne et dilate les couches externes (augmentation de leur luminosité). Puis ces couches dilatées se refroidissent et cela ralentit les réactions ayant lieu en profondeur (l'étoile perd en luminosité). Les couches externes se recompriment alors et leur compression réchauffe la zone interne où les réactions nucléaires recommencent à s'emballer. Et le cycle reprend. La durée du cycle dépend directement de la masse de l'étoile, elle-même proportionnelle à la luminosité de l'étoile. La mesure du cycle est donc une mesure de la luminosité absolue et les Céphéides servent ainsi de **chandelles standards**

La période de la céphéides  $\delta$ -Cephei est de 5 j 8 h 47 min et 32 s.

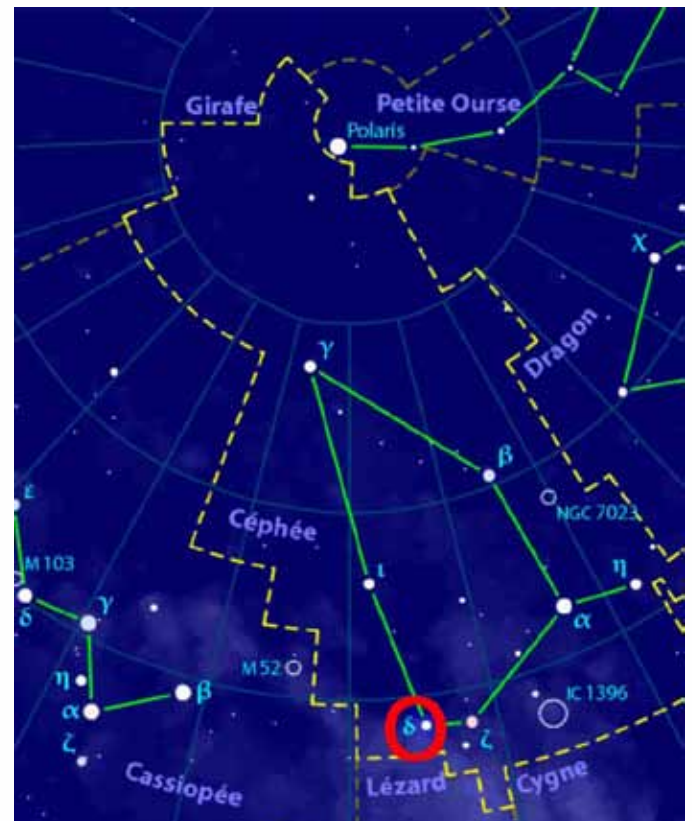


FIG. 5. – L'étoile  $\delta$ -Cephei



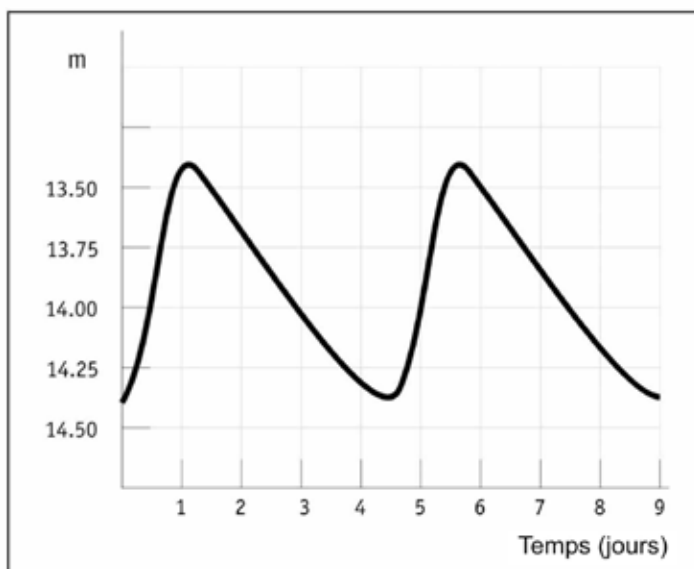


FIG. 6. – Variation de luminosité d'une Céphéide avec le temps

La petite taille du Petit Nuage de Magellan, comparée à la distance qui le sépare de nous, fait qu'il est raisonnable de penser que les étoiles qui le constituent se trouvent toutes à peu près à la même distance de l'observateur. Ainsi, la comparaison de leurs magnitudes apparentes nous informe sur leur luminosité intrinsèque. Henrietta Leavitt découvrit la relation existante entre cette luminosité intrinsèque et la période de leur pulsation. Il suffisait, après cela, de disposer de Céphéides proches (comme  $\delta$  Cephei, située à 982 années-lumière de la Terre dans notre galaxie) pour connaître la relation entre magnitude absolue et période de variation.

Désormais, la mesure de la période d'une Céphéide détectée dans une galaxie, dont on a réussi à former une image assez nette pour pouvoir distinguer cette étoile parmi les milliards qui l'entourent, permet de connaître sa magnitude absolue. La détermination photométrique de sa magnitude apparente et l'utilisation du **module de distance** (voir glossaire) autorise le calcul de la distance de l'étoile et, par extension de la galaxie qui l'abrite.

## La découverte de Henrietta Lewitt

L'astronome américaine Henrietta Swan Leavitt (1868 – 1921) a été la première à démontrer l'existence d'une relation période-luminosité pour les Céphéides en 1912. Elle a mesuré à l'Observatoire du *Harvard College* les magnitudes photographiques de 1777 étoiles variables dans les Nuages de Magellan (deux petites galaxies satellites de la Voie lactée), dont une vingtaine de Céphéides situées dans le Petit Nuage de Magellan (SMC). Elle découvre que les Céphéides les plus brillantes (donc les plus massives) avaient des variations de plus longue période (due à leur plus grande inertie), propriété utilisée aujourd'hui pour calibrer l'échelle des distances dans notre galaxie.



FIG. 7. – Henrietta Swan Leavitt

En 1925, le mathématicien suédois Gösta Mittag-Leffler lui écrivit pour lui annoncer qu'elle était nommée pour le prix Nobel 1926. Il apprit alors qu'elle était décédée quatre ans auparavant dans l'indifférence générale.

## Mesurer la distance de la galaxie M 100 avec le télescope Hubble

En 1774, Charles Messier (1730 - 1817) publie un catalogue faisant la liste de 110 objets diffus, alors appelés **nébuleuses**. Messier 100 ou M100 est une galaxie spirale, que l'on voit de face, découverte par Pierre Méchain en 1781 et rajoutée ensuite au catalogue. On la trouve dans la constellation de la **Chevelure de Bérénice** que l'on peut observer toute l'année dans le ciel de France, en dessous de la Grande Ourse.



FIG. 8. – Le télescope spatial Hubble en orbite à 600 kilomètres d'altitude autour de la Terre

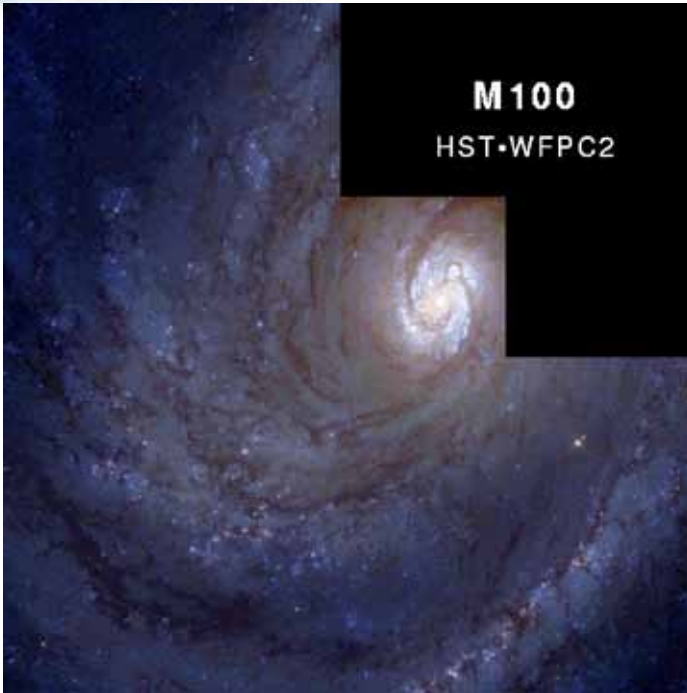


FIG. 9. – La galaxie spirale M100 vue par le télescope spatial Hubble en 1993

Si nous pouvions observer notre galaxie, la Voie lactée, de face, depuis un vaisseau spatial extragalactique, sa forme ressemblerait beaucoup à la galaxie spirale M100. Les galaxies spirales sont riches en poussières et en gaz. La poussière apparaît dans cette image comme des lignes sombres, entre les majestueux bras spiraux. Les couleurs bleues correspondent aux régions riches en étoiles jeunes et chaudes.

## Le télescope spatial Hubble

Lancé en 1990, ce télescope, dont le miroir principal a un diamètre de 2,4 mètres, est en orbite autour de la Terre à une altitude moyenne de 600 kilomètres. Affranchi des turbulences et des bandes d'absorption de l'atmosphère, sa résolution angulaire est meilleure que 0,1 seconde d'arc. Il produit des images dans l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge.

En 1993, le télescope spatial Hubble a réussi, grâce à sa qualité d'images, à isoler et mesurer 20 Céphéides parmi les milliards d'étoiles de la galaxie M100.

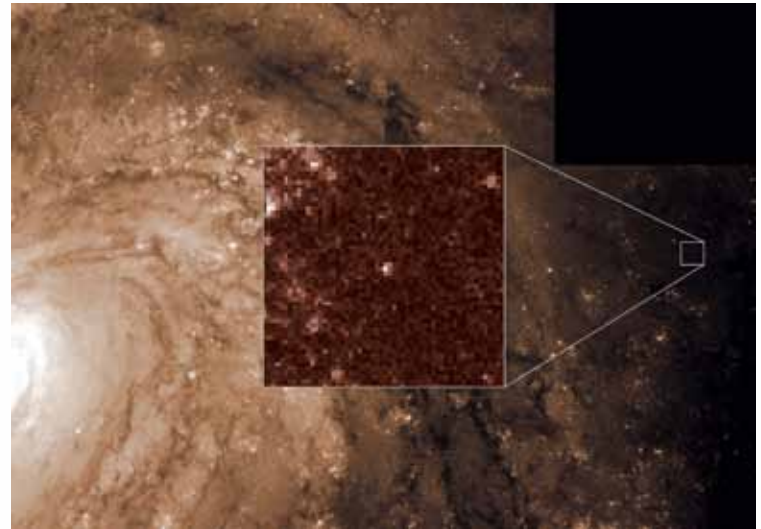


FIG. 10. – La caméra à haute résolution de Hubble a détecté et extrait l'une des Céphéides utilisées dans cet exercice. L'étoile est située dans une région d'étoiles en formation, dans un des bras spiraux au bord externe de la galaxie.

Le zoom de cette région montre l'étoile au centre du cadre.

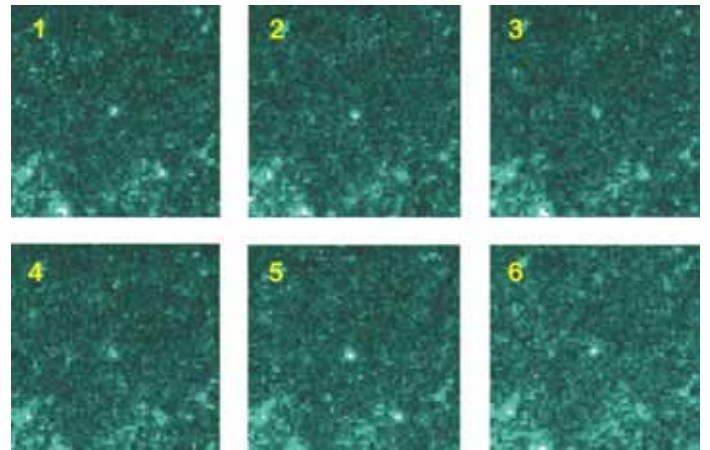


FIG. 11. – Une variable céphéide dans M100. Voici six images de l'une des Céphéides de la galaxie M100, prises à des dates différentes. La Céphéide est au centre de chaque cadre. Il apparaît clairement que la luminosité de l'étoile varie au cours du temps.

## Magnitudes

Si le détecteur utilisé donne un signal  $E$  proportionnel à l'éclat d'une étoile donnée (dont on veut déterminer la magnitude apparente  $\langle m \rangle$ ) et si sa réponse est  $E_0$  pour une étoile standard de magnitude apparente  $m_0$  alors la magnitude de l'étoile étudiée est :

$$m = m_0 - 2,5 \log_{10} [E/E_0] \quad (1)$$



La **magnitude apparente (m)** d'une étoile est d'autant plus petite que celle-ci est brillante. Les étoiles visibles à l'œil nu ont une magnitude apparente inférieure ou égale à 6.

L'éclat apparent d'une étoile dépend de sa luminosité propre et de la distance D à laquelle elle se trouve de l'observateur.

On a défini la **magnitude absolue (M)** des étoiles comme étant la magnitude apparente qu'elles auraient si elles étaient toutes situées à  $D_0 = 10 \text{ pc}$  de l'observateur.

**Unités:** 1 pc = 1 parsec est la distance d'où l'on peut voir la distance moyenne Terre-Soleil (1 Unité Astronomique UA = 150 millions de kilomètres) sous un angle de 1 seconde d'arc (1").

1 pc =  $3.0857 \times 10^{16} \text{ m} = 206\,265 \text{ UA}$   
= 3,26 années-lumière (a.l.)

On calcule la **magnitude absolue** à partir de la conservation du flux lumineux à travers les sphères de rayon D et  $D_0$  en l'absence d'absorption par la formule:

$$M = m - 5 \cdot \log_{10} \left[ \frac{D}{D_0} \right] = m - 5 \cdot \log_{10} \left[ \frac{D}{10 \text{ pc}} \right]$$

(2)

La différence (m-M) est parfois appelée « **module de distance** » de l'étoile.

### Magnitude absolue d'une Céphéide

La relation période-luminosité des Céphéides a été revue maintes fois depuis les premières mesures d'Henrietta Leavitt. La meilleure estimation actuelle donne pour la magnitude absolue moyenne (M) en fonction de la période P exprimée en jours:

$$M = -2,78 \cdot \log_{10} [P] - 1,35$$

(3)

## Procédure

La variation de luminosité mesurée par le télescope Hubble est fournie pour 12 étoiles Céphéides appartenant à la galaxie M100, extraites d'un article scientifique [1].

Pour chaque étoile est donnée la variation de la magnitude apparente (m) pendant deux cycles de l'étoile.

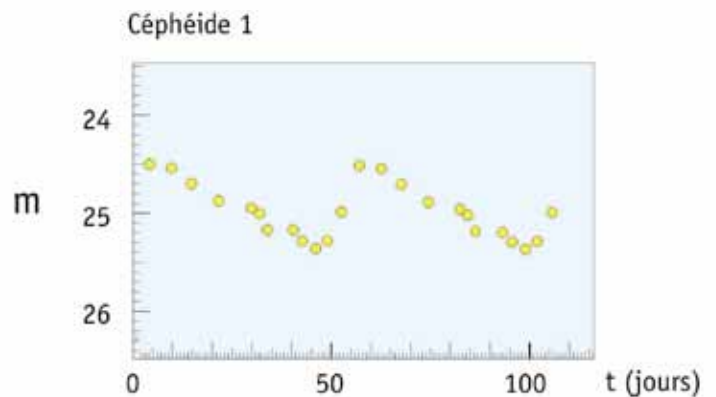


Fig. 12. – Variation de la magnitude apparente de la Céphéide n°1  
> Les courbes de lumière sont données en annexe I

### Distance des Céphéides

**Question 1** – Indiquer une méthode pour mesurer la période P de l'étoile et déterminer cette période pour chacune des Céphéides.

**Question 2** – Quelle grandeur peut-on déduire de la relation période-luminosité des Céphéides?

Utiliser ce résultat et la relation période-luminosité pour en déduire la magnitude absolue moyenne  $\langle M \rangle$  de chacune de ces étoiles.

**Question 3** – Proposer une méthode pour estimer la magnitude apparente moyenne  $\langle m \rangle$  de chaque étoile à partir des courbes en annexe I.

> annexe I

Au début du xx<sup>e</sup> siècle, les astronomes mesuraient la magnitude apparente minimum et la magnitude apparente maximum et en calculaient la moyenne. Avec cette méthode, ou toute autre de votre choix, calculez la magnitude apparente moyenne de chacune de ces Céphéides.



**Question 4** – Comment peut-on déduire la distance de chaque étoile ?

En utilisant les valeurs trouvées pour  $\langle m \rangle$  et  $\langle M \rangle$ , calculez la distance D de chacune de ces Céphéides. Exprimez le résultat en Mégaparsecs (Mpc).

**Question 5** – Comparer les valeurs obtenues pour les différentes Céphéides. Les Céphéides sont-elles à la même distance ? Si non, pourquoi selon vous ?



## Distance de la galaxie M100

On donne les informations complémentaires suivantes :

- Diamètre de la Voie lactée : 70 000 à 100 000 a.l.
- Épaisseur de la Voie lactée au niveau de son bulbe central : 1 000 a.l.

**Question 6** – En considérant que M100 a la même taille que la Voie lactée (on vérifiera cela dans l'activité suivante) et en sachant que 1 pc (parsec) = 3,26 a.l. (année-lumière), pouvez-vous expliquer les écarts entre les différentes distances calculées par le fait que les Céphéides étudiées ne sont pas au même endroit dans M100 ?

**Question 7** – Calculez la valeur moyenne des distances des 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 ± 1,8) Mpc**. Cette étude tenait compte de la présence de poussières interstellaires. Comparez votre résultat avec cette valeur. Qu'en concluez-vous ?



## Taille de la galaxie M100

**Question 8** – La galaxie M100 est vue sous un angle compris entre 6 et 7 minutes d'arc. Calculez son diamètre en considérant que cette galaxie se trouve à 17,1 Mpc de nous. Exprimez ce résultat en années-lumière. Comparez ce diamètre avec celui de la Voie lactée.



## L'âge de l'Univers

> Voir l'Astro Exo n°1 « L'âge de l'Univers »

La galaxie M100 fait partie d'un amas de galaxies local appelé **Amas de la Vierge**.

On a mesuré le décalage vers le rouge de la lumière qui nous provient de cet amas et par l'application de l'effet Doppler on en a déduit une **vitesse de fuite**.

Cette vitesse est pour M100 de  $V = 1400 \text{ km/s}$ .

Selon la loi de Hubble, la vitesse d'une galaxie est reliée à sa distance par la relation :

$$V \text{ (km/s)} = H_0 \cdot D \text{ (Mpc)}$$

où la distance D est donnée en Mégaparsec (Mpc) avec  $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc} = 3,09 \times 10^{19} \text{ km}$

$H_0$ , la constante de proportionnalité, est la constante de Hubble, exprimée en (km/s)/Mpc (kilomètre par seconde par Megaparsec).

**Question 9** – À l'aide de la vitesse et de la distance D de M100 que vous avez calculée, calculez la valeur de la constante de Hubble  $H_0$ . Exprimez le résultat en (km/s)/Mpc.

Si on fait l'hypothèse que la valeur de  $H_0$  est constante depuis le début de l'expansion, alors la durée de l'expansion peut être calculée en divisant la distance D par la vitesse v :

$$\frac{d(\text{Mpc})}{v(\text{km/s})} = \frac{1}{H_0}$$

Cette durée est une approximation de l'âge de l'Univers.

**Question 10** – Calculez à l'aide de cette formule, l'âge de l'Univers (attention aux unités).

Comparez ce résultat avec l'âge officiel de l'Univers puis avec celui qui est attribué à la Terre.

## Références



Cet exercice est adapté de l'exercice « La distance à M100 déterminée à partir des étoiles variables de type Céphéide » produit conjointement par l'Observatoire Européen Austral (ESO) et l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

<http://www.astroex.org/french/exercises.php>

[1] L'article scientifique sur lequel est basé l'astro exo "Distance to the Virgo cluster galaxy M100 from Hubble Space Telescope observations of Cepheids", Freeman et al., 1994, Nature Volume 371, Issue 6500, pp. 757-762

<http://www.nature.com/nature/journal/v371/n6500/abs/371757a0.html>

Les mesures de distance de M100 obtenues par différentes méthodes :

<http://ned.ipac.caltech.edu/cgi-bin/nDistance?name=M100>

L'article de Henrietta Leavitt et la découverte de la relation Période-Luminosité des Céphéides :

<http://cwp.library.ucla.edu/articles/leavitt/leavitt.note.html>



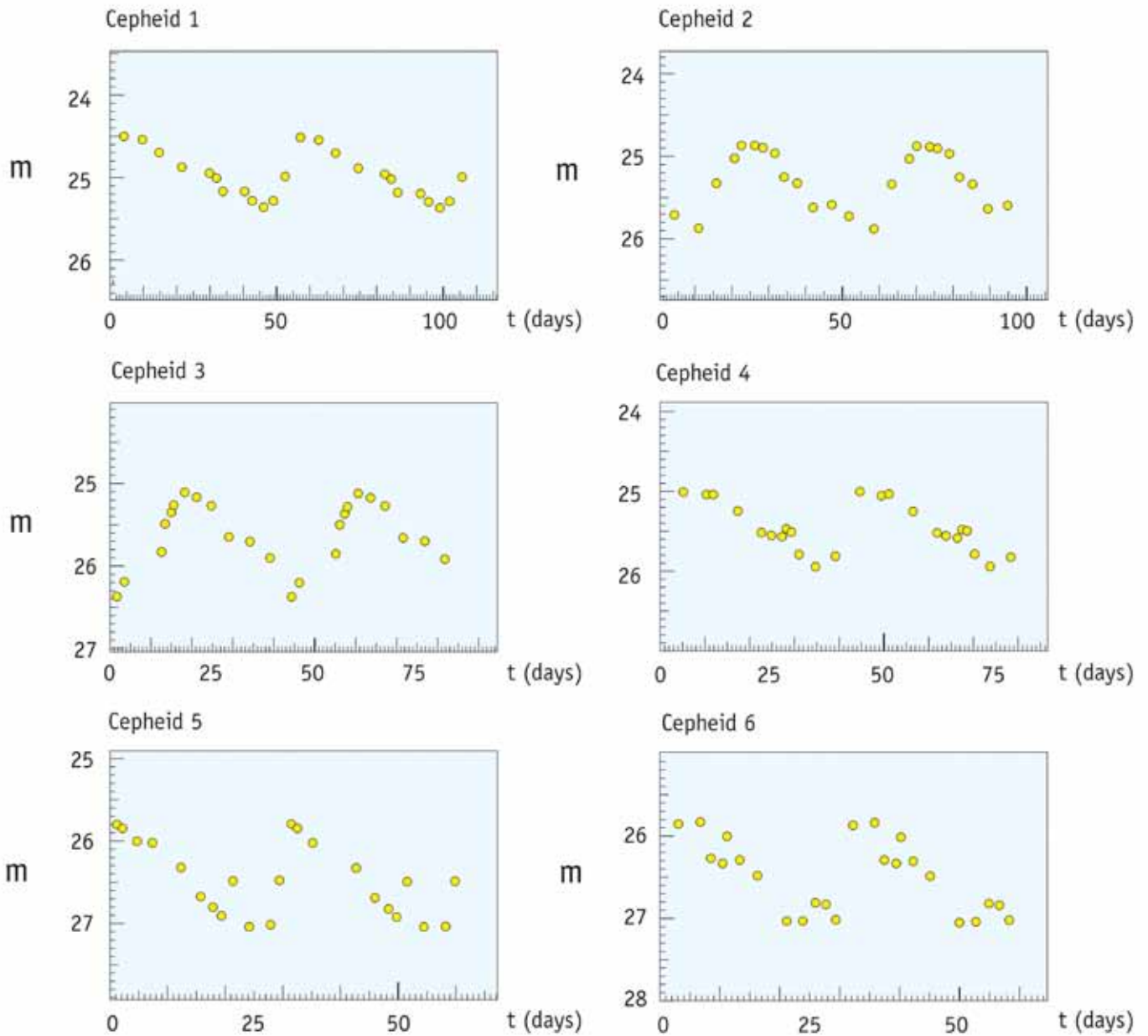




ANNEXE n°1

Courbe de lumière des Céphéides

Variation de la magnitude apparente ( $m$ ) avec le temps ( $t$ )



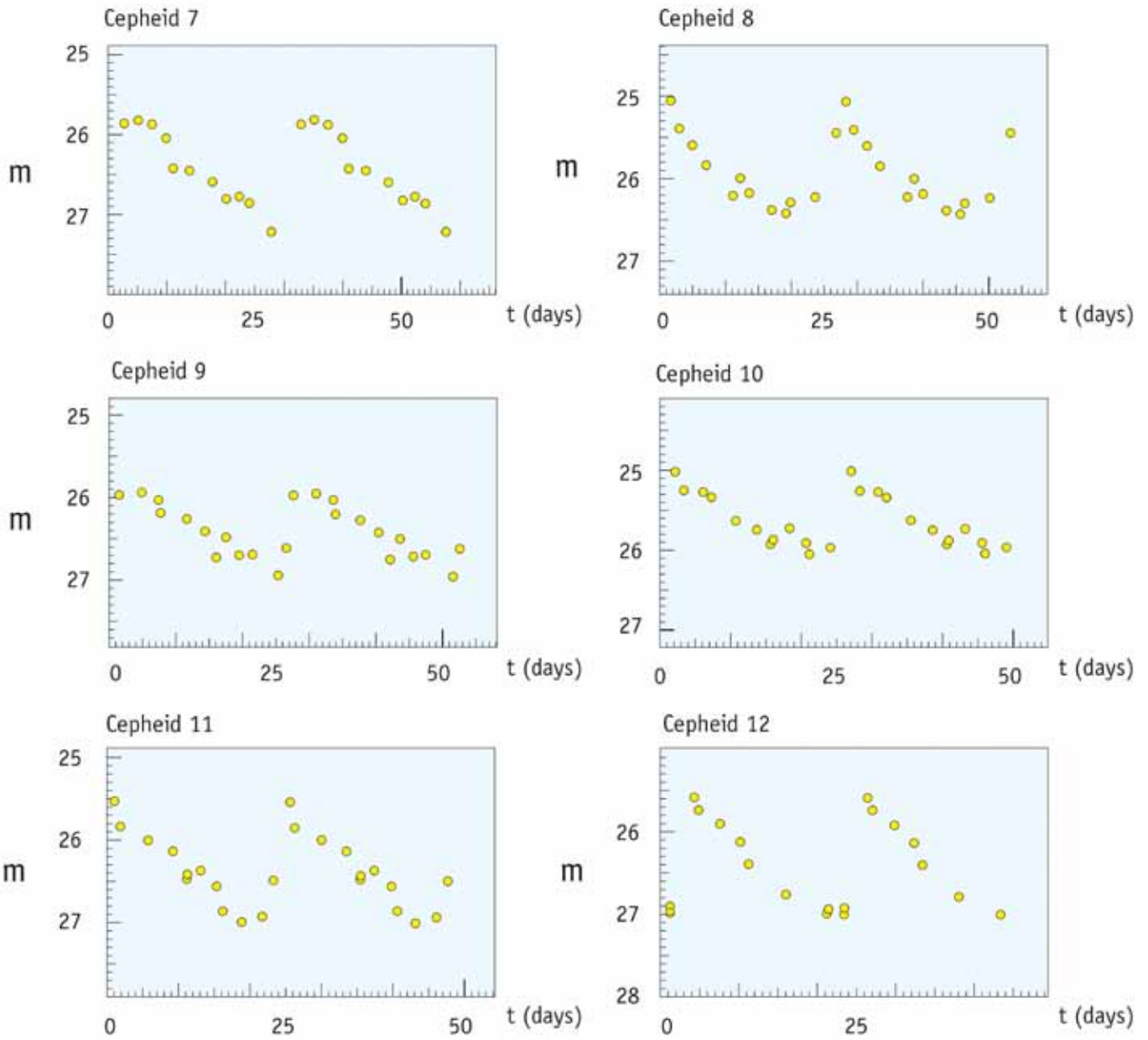




ANNEXE n°II

Courbe de lumière des Céphéides

Variation de la magnitude apparente ( $m$ ) avec le temps ( $t$ )





Le Service d'Astrophysique du CEA propose une série d'exercices d'astrophysique qui permettent de se plonger dans la recherche « en train de se faire ». Il s'agit d'analyser des documents extraits d'articles publiés dans des revues scientifiques pour en tirer des informations sur les objets qui peuplent notre Univers. Cette activité peut être menée en classe ou en petit groupe d'élèves et permet d'illustrer différents points des programmes de physique-chimie de Première et de Terminale Scientifiques.

Cet exercice propose de déterminer la distance d'une galaxie à partir de l'observation de certaines étoiles variables, les Céphéides. En utilisant les variations de luminosité de Céphéides observées par le télescope spatial Hubble, la méthode utilise la relation période-luminosité pour calculer la distance de la galaxie M100.

