

# EPREUVE DE TIPE 2010 – PARTIE D

## TITRE :

*«Les oscillations des étoiles céphéides : une propriété de surface pour explorer les limites de l'Univers»*

---

Temps de préparation : 2 h 15 min.

Temps de présentation devant le jury : 10 minutes.

Entretien avec le jury : 10 minutes.

---

## GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte :

- un document principal intitulé «Les oscillations des étoiles céphéides : une propriété de surface pour explorer les limites de l'Univers» (16 pages).
- une annexe : 2 pages.

## Pistes de travail suggérées au candidat :

- Faire l'analyse du texte proposé et dégager les points essentiels.
- Critiquer la méthode et en montrer les éventuelles limitations et prolongements.
- Trouver des exemples dans le cours de physique pouvant avoir des similitudes avec ce qui est évoqué dans le texte : oscillations forcées, linéarisation.
- Replacer le propos dans un contexte beaucoup plus large de mesure des distances (du microcosme au macrocosme).

---

**Remarque :** les mots indiqués en gras sont repris dans un glossaire en fin de document.

# Les oscillations des étoiles céphéides : une propriété de surface pour explorer les limites de l'Univers

## 1 Préambule

En astronomie, on caractérise les étoiles grâce à des grandeurs appelées «magnitudes», dont les valeurs sont déterminées grâce aux télescopes. Elles permettent d'avoir une indication sur la luminosité des étoiles et, en faisant des  
5 mesures dans plusieurs domaines de longueur d'onde, d'obtenir une information sur la température en surface. Afin de faciliter la lecture du texte, on rappelle ici quelques notions simples concernant les magnitudes. Si  $\Phi$  est le flux de **photons** (exprimé en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) mesuré sur un détecteur terrestre, on peut définir la magnitude apparente  $m$  de l'étoile, dont proviennent ces photons, en s'appuyant sur la  
10 loi de Pogson qui traduit la réponse non-linéaire de l'œil. On pose alors :

$$m = m_0 - 2,5 \log \Phi$$

avec  $m_0$  une constante. Cette magnitude dépend de la distance de l'étoile (c'est pourquoi elle est qualifiée d'«apparente») et du domaine de longueur d'onde utilisé. Au cours du temps, les astronomes ont construit différents systèmes de magnitudes qu'on nomme «systèmes photométriques». On a ainsi le système de John-  
15 son, celui de Genève, etc. Dans ces systèmes, une lettre est attribuée à chaque filtre, chacun ayant une bande passante bien définie. Dans le système de Johnson, on a douze bandes auxquelles on attribue les lettres UBVR<sup>i</sup>IJKLMNQ. Ainsi,  $m_V$  est une magnitude visuelle (la bande V correspond à un domaine centré sur une longueur d'onde de  $5\,500 \text{ \AA}$ ).

20 On peut également définir des magnitudes absolues qui vont caractériser la lumière émise par l'étoile, l'effet de la distance étant retiré. Si  $m$  est une magnitude apparente, la magnitude absolue correspondante sera  $M$  donnée par :

$$m - M = 5 \log d - 5$$

avec  $d$  la distance de l'astre.

25 Le rayonnement émis par la surface d'une étoile portée à la température  $T_{eff}$  est –grossièrement– celui d'un **corps noir** à la même température. Le spectre d'un corps noir n'étant pas uniforme, en faisant deux mesures de magnitudes dans deux bandes spectrales différentes, on obtient une indication sur  $T_{eff}$ . Sur certaines figures le lecteur verra apparaître B-V, qui n'est rien d'autre qu'une  
30 différence de magnitudes de type  $m_B - m_V$ .



FIG. 1 – Vue de M31 : la Nébuleuse d’Andromède. Image : John Lanoue (bedfordnights.com et Wikipedia).

On appelle luminosité la puissance totale rayonnée par une étoile. C’est une propriété intrinsèque de l’objet qui s’exprime en watts. La luminosité apparente est une grandeur mesurée sur Terre, qui correspond en première approximation au  
35 module du vecteur de Poynting reçu au niveau de l’instrument d’observation. La différence entre la luminosité (grandeur intrinsèque) et la luminosité apparente vient du facteur  $1/d^2$ , où  $d$  est la distance observateur-étoile. On peut relier la luminosité aux magnitudes absolues, et la luminosité apparente aux magnitudes apparentes.

40

En général, on accède seulement aux luminosités apparentes, les distances des étoiles restant souvent indéterminées. Le grand intérêt des étoiles «céphéides» est de permettre une évaluation de  $d$ .

## 2 Introduction historique

45 Fin 1784, deux jeunes astronomes anglais Edward Piggot et John Goodricke – passionnés par les étoiles dont la luminosité varie au cours du temps– découvrent la variabilité régulière de  $\delta$  cephei (« $\delta$ » : la quatrième étoile la plus brillante, *Cephei* : située dans la constellation de Céphée). Goodricke estime la période des variations de luminosité de  $\delta$  cephei à 128 heures et 45 min (soit 5,365 jours),  
50 valeur très proche de celle déterminée actuellement : 5,366270 jours.

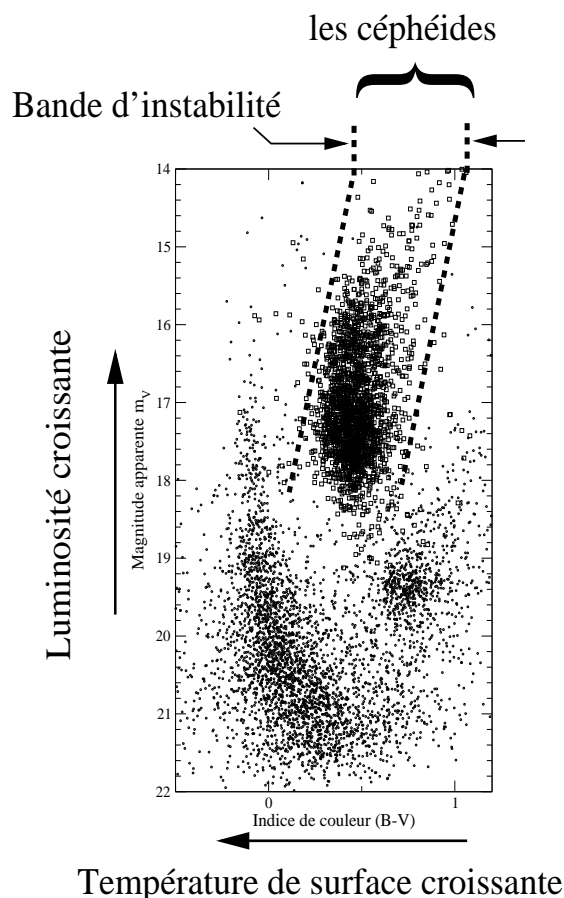


FIG. 2 – Diagramme de Hertzsprung-Russell pour une population d'étoiles du Petit Nuage de Magellan. Les points représentent des étoiles non-oscillantes, les céphéides –représentées par de petits carrés– sont localisées dans une zone bien précise du diagramme : la *bande d'instabilité*. Toutes ces étoiles sont à une même distance de la Terre.

Au 18<sup>ème</sup> siècle, il y avait seulement une douzaine d'étoiles variables connues. Si l'origine physique des variations de certains objets était correctement interprétée : c'était le cas des étoiles doubles non-résolues<sup>1</sup> comme *Algol* ; il était impos-  
 55 sible de le faire pour  $\delta$  *cephei* avec les connaissances scientifiques de l'époque. Au cours du temps, de très nombreuses étoiles variables ont été découvertes et, parmi elles, des étoiles présentant des propriétés similaires à celles de  $\delta$  *cephei* ; on a alors adopté le terme générique de «céphéides» pour cette classe d'objets.

---

<sup>1</sup>On appelle «étoile double» un couple d'étoiles, liées par la gravité, en rotation l'une et l'autre autour du centre de masse du système. Un tel système est dit *non-résolu* lorsqu'on ne parvient pas à séparer les images de l'une et l'autre. On parle aussi de «système binaire». On notera que ce genre de système est très commun dans la Galaxie.

60 Au début du 20ème siècle, Henrietta Swan Leavitt –bien qu’handicapée par sa surdité– mena à bien des études supérieures, pour rentrer en 1893 comme «ordinateur humain» au *Harvard College Observatory*. Son travail consistant –entre autre– à faire un relevé de magnitude des étoiles à partir de plaques photographiques. Cette tâche, longue et minutieuse, la mènera à découvrir une relation  
65 entre la magnitude des étoiles céphéides et la période de leurs variations : plus l’étoile est brillante, plus sa période est longue ; les objets les plus faibles étant ceux aux variations les plus rapides. Cette relation pouvant se mettre sous une forme du type :

$$m = a \log P + b$$

avec  $P$  la période,  $a$  et  $b$  deux constantes. Le domaine de période des céphéides  
70 s’étend entre environ un jour et une centaine de jours.

La découverte d’Henrietta Leavitt a été faite à partir des magnitudes apparentes d’un ensemble d’objets supposés être tous situés à la même distance de l’observateur (les Nuages de Magellan qui sont de petites galaxies satellites de  
75 la nôtre, la Voie Lactée). Un an après la publication de ce travail l’astronome danois Ejnar Hertzsprung étalonne la relation période-magnitude apparente, en la transformant en relation période-magnitude absolue.

Au début des années 20, une grande controverse –qui sera nommée par la suite le «Grand débat»– a eu cours entre les astronomes Heber Curtis et Harlow  
80 Shapley, cette controverse concernait la nature de M31 qu’on nommait alors la Grande Nébuleuse d’Andromède (voir figure 1) et plus généralement la structure de l’Univers.

Curtis soutenait que M31 était un objet externe à notre propre galaxie, Shapley pensait le contraire. Pour Curtis les «nébuleuses spirales» comme M31  
85 étaient des «Univers Iles» dont l’Univers entier était composé ; notre Voie Lactée étant un de ces «Univers Iles» parmi d’autres. Shapley soutenait l’idée d’un Univers composé par notre seule galaxie. Ce «Grand débat» a été un grand moment de l’Histoire des Sciences, chacun des principaux protagonistes avançant des arguments ou contre-arguments très pertinents au regard des connaissances  
90 de l’époque. Ceci illustre aussi toute la difficulté de la démarche scientifique lorsqu’elle se situe aux frontières de la connaissance.

Un élément décisif fut apporté en 1925 par Edwin Hubble lorsqu’il identifia pour la première fois des céphéides dans M31, ce qui lui permit –en évaluant les  
95 distances de ces céphéides– de montrer la nature extragalactique de M31 ; qui est depuis lors la «galaxie d’Andromède». La relation période-luminosité des céphéides est encore utilisée aujourd’hui pour mesurer des distances astrophysiques. On notera que les céphéides sont à l’origine de la découverte par Hubble du phénomène d’expansion de l’Univers : plus une galaxie est lointaine plus elle s’éloigne

100 de nous à vitesse élevée. Les céphéides donnant la distance des galaxies, la vitesse étant déterminée par effet Doppler-Fizeau. La figure 3 est tirée de l'article historique de Hubble (1929), elle montre la corrélation entre distance et vitesse. Cette découverte est un des arguments forts en faveur de la théorie du «Big Bang».

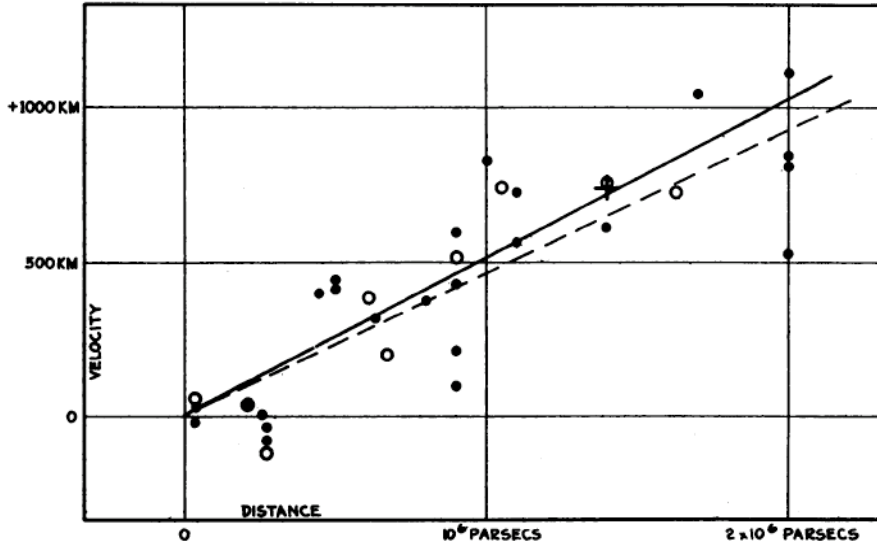


FIG. 3 – Reproduction de la figure 1 de l'article de Hubble (1929). On y voit la proportionnalité entre la vitesse d'éloignement des galaxies (en ordonnée, exprimée en  $\text{km.s}^{-1}$ ) et la distance en parsec (en abscisse, unité de distance astronomique qui vaut environ 3,26 années-lumière) déterminée grâce aux céphéides. Les disques noirs et la droite en trait plein correspondent à des galaxies prises individuellement, le trait en tirets et les cercles sont relatifs à des valeurs moyennes de groupes de galaxies.

## 105 3 Les données observationnelles concernant les céphéides

### 3.1 Position dans le diagramme Hertzsprung-Russell

Vers 1910, l'astronome américain Henry Norris Russell et son confrère danois Hertzsprung –déjà mentionné dans cet article– découvrent que les étoiles ne se répartissent pas au hasard quand on trace leur magnitude en fonction d'un indice de couleur (différence de magnitudes). Ce type de diagramme porte le nom de diagramme de Hertzsprung-Russell ou «diagramme HR» ; des exemples en sont donnés par les figures 2 et 7.

Comme on peut le constater, les céphéides sont localisées dans une région particulière du diagramme de Hertzsprung-Russell . Cette zone, appelée *bande d'instabilité*, correspond à une phase de la vie des étoiles de masse intermédiaire (entre  $\sim 3$  et  $\sim 12$  masses solaires) où elles se comportent comme des oscillateurs auto-excités, telles des cordes de violon qui joueraient seules !

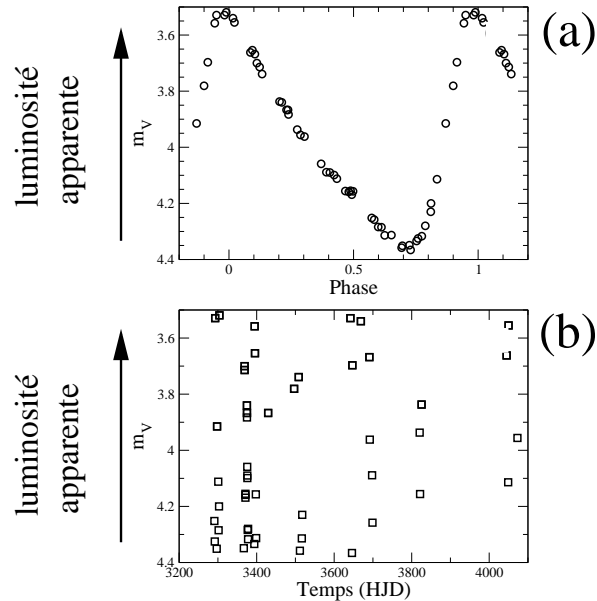


FIG. 4 – (a) Un exemple de courbe de lumière pour l'étoile  $\delta$  cephei, en abscisse figure la *phase* (une période correspondant à l'intervalle  $[0, 1]$ ), en ordonnée on trouve la luminosité apparente. (b) Les données à partir desquelles a été établie la courbe de lumière (a), en abscisse se trouve le temps exprimé en «*Heliocentric Julian Day*» (HJD). La date julienne est la durée en jours décimaux séparant un instant donné du 1er janvier 4713 avant J.-C. Le HJD est la même chose ajustée dans le référentiel du Soleil. Sur cette figure, l'origine de HJD a été changée pour raison de commodité. Les événements ayant lieu en dehors du système solaire sont datés en HJD, ceci pour éviter que la date dépende de la position de l'observateur dans le Système Solaire.

## 120 3.2 Les courbes de lumière

Une *courbe de lumière* est un relevé de la luminosité au cours du temps. La figure 4(a) montre une courbe de lumière de  $\delta$  cephei. L'alternance jour/nuit, de mauvaises conditions météorologiques ou des problèmes techniques divers, font

que les données sont irrégulièrement espacées (voir figure 4(b)), ce qui rend im-  
 125 possible une détermination de la période directement par lecture du graphe ou par  
**transformée de Fourier**. La méthode généralement utilisée repose sur l'ajuste-  
 ment de sinusoides aux valeurs expérimentales. Une fois la valeur de la période  $P$   
 déterminée, on peut calculer la phase  $\Phi = t/P$  de chaque observation et «replier»  
 les données sur un intervalle de phase comme tracé sur la figure 4(a). Cette opé-  
 130 ration de «repliage» en phase explique pourquoi on peut avoir plusieurs valeurs  
 de luminosité pour une même valeur de phase (aux erreurs expérimentales près).  
 Lorsqu'on possède des données de très bonne qualité, ce qui est le cas quand on  
 peut faire des observations pendant plusieurs longues nuits (en hiver par exemple)  
 consécutives, et que la période est suffisamment grande par rapport à un jour ; on  
 135 peut alors obtenir une très bonne estimation de la période en interpolant «à la  
 main» les points expérimentaux. C'était le cas pour  $\delta$  *cephei* lors de sa découverte.

### 3.3 La relation période-luminosité et la mesure de distance

Les valeurs de période étant déterminées pour un échantillon de céphéides, on  
 peut tracer leurs luminosités en fonction de leurs périodes. C'est ce qui est fait sur  
 140 la figure 5 où un échantillon d'étoiles, toutes membres d'une même galaxie, a été  
 traité. Cette galaxie est le *Petit Nuage de Magellan*, dont toutes les étoiles sont  
 supposées être à la même distance des observateurs terrestres (ce qui revient à  
 négliger l'épaisseur du Petit Nuage de Magellan). Grâce à une régression linéaire  
 on peut mettre la relation période-magnitude sous la forme :

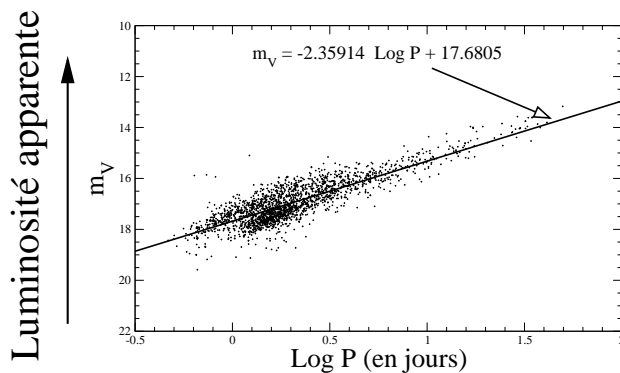


FIG. 5 – Un exemple de relation période-magnitude apparente. Ces données sont  
 issues de l'observation des céphéides du Petit Nuage de Magellan par le projet  
 OGLE (<http://www.astro.uw.edu.pl/~ogle>).

145

$$m_V = a \log P + b \quad (1)$$



avec  $P$  la période exprimée en jours et  $m_V$  la magnitude apparente dans la bande spectrale  $V$ . Les données utilisées pour la figure 5 conduisent à :

$$m_V = -2,35914 \log P + 17,6805 \quad (2)$$

On peut déterminer la distance des céphéides de notre Galaxie –par exemple– grâce à une méthode angulaire : la méthode des «parallaxes». C'est ce qu'ont fait  
 150 Michael Feast et Robin Catchpole en 1997 en employant des données collectées par le satellite astrométrique HIPPARCOS. Ils ont obtenu alors une relation période-magnitude absolue (luminosité intrinsèque) :

$$M_V = -2,81 \log P - 1,43 \quad (3)$$

Plus récemment, en 2007, Pascal Fouqué de l'Observatoire de Midi-Pyrénées et ses collaborateurs ont établi une relation similaire (aux erreurs près) :

$$M_V = (-2,678 \pm 0,076) \log P - 1,275 \pm 0,023 \quad (4)$$

155 En négligeant les variations de pente, sujet qui fait l'objet d'un vaste débat, et en supposant la relation  $M_V = f(\log P)$  des céphéides comme «universelle» ; la différence  $\mu_V = m_V - M_V$  ne dépend que de la distance  $d$  des objets. Comme on l'a déjà vu :

$$m_V - M_V = -5 + 5 \log d = \mu_V \quad (5)$$

où  $d$  est exprimée en parsecs<sup>2</sup>. On notera que  $\mu_V = m_V - M_V$ , le «module de  
 160 distance», est à peu de chose près une distance en échelle logarithmique. Pour notre échantillon d'étoiles du Petit Nuage de Magellan on a  $\mu_V \sim 19$  ; ce qui conduit à une distance moyenne des céphéides du Petit Nuage de Magellan valant :

$$d = 63 \text{ kpc} \quad (6)$$

soit environ 206 000 années-lumière (à titre de comparaison le Soleil se trouve à environ 8 minutes-lumières de la Terre).

165 L'utilisation de cette relation période-magnitude permet donc de déterminer la distance des galaxies. La mesure des parallaxes n'est pas faisable au-delà d'une centaine de parsecs, les angles devenant trop petits. La méthode n'est applicable que lorsqu'il est possible de détecter des céphéides. Ce qui est actuellement réalisable jusqu'à des distances de plusieurs dizaines de méga-parsecs. Au-delà, il  
 170 devient impossible de résoudre en étoiles les galaxies. D'autres méthodes prennent alors le relais, comme celles reposant sur les variations de luminosité des supernovæ.

---

<sup>2</sup>Unité de longueur utilisée en astronomie. C'est la distance à laquelle le rayon moyen de l'orbite terrestre est vu sous un angle d'une seconde. 1 pc =  $30,84 \times 10^{12}$  km = 3,26 années lumières

175 Etant donné l'enjeu scientifique, la détermination précise des coefficients pré-  
sents dans la relation période-magnitude (on parle de «calibration») a été, et reste  
un des grands problèmes de l'astrophysique. Les difficultés sont nombreuses ; elles  
sont telles qu'il a fallu attendre Baade en 1952, pour que la distance –totalement  
fausse– obtenue par Hertzsprung en 1912 pour le Petit Nuage de Magellan, soit  
180 corrigée. Plusieurs aspects de la relation période-magnitude sont toujours de nos  
jours sujet à débat. La composition chimique peut avoir un effet, la relation est  
également suspectée de ne pas être complètement linéaire. La détermination du  
rougissement et de l'absorption interstellaire entache d'incertitudes les magni-  
tudes des céphéides.

185 Finalement, on pourra noter qu'il n'existe pas une relation période-luminosité  
mais plusieurs : une pour chaque bande photométrique ; l'utilisation du domaine  
infrarouge est particulièrement intéressante car les effets du rougissement sont  
alors moins sensibles.

190 De très nombreux chercheurs ont travaillé sur la détermination de relations  
périodes-magnitude. Bien qu'il soit impossible d'être exhaustif ; outre les travaux  
de Fouqué & *al.* (2007) on peut également citer Madore & Freedman (1991) ainsi  
que Sandage & Tammann (2006).

## 195 4 Interprétation des propriétés des céphéides grâce à la modélisation

On entend ici par *modélisation* le fait de mettre en équation un système  
physique à partir de lois fondamentales (comme la deuxième loi de Newton) ou  
phénoménologiques (comme la loi des gaz parfaits) ; et de définir les conditions  
aux limites dans l'espace et le temps. Les situations les plus simples peuvent  
200 être traitées analytiquement, on obtient alors aisément les lois liant les grandeurs  
physiques pertinentes pour le problème posé. C'est le cas pour la modélisation  
de l'atmosphère terrestre dans le cadre de la statique des fluides, où la relation  
donnant la pression en fonction de l'altitude est obtenue sans difficulté.

205 Quand on cherche un degré de modélisation aussi réaliste que possible, il  
n'existe très souvent aucune méthode pour résoudre analytiquement le système  
d'équations dicté par les lois de la physique. Des méthodes numériques, pro-  
grammées sur ordinateur, permettent alors d'approcher la solution. Un exemple  
typique en est donné encore par l'atmosphère terrestre, traitée dans sa globalité  
210 et considérée comme dynamique. Suivant l'échelle de temps considérée, les résul-  
tats donnent : soit les prédictions météorologiques, soit l'évolution du climat sur  
de longues périodes.

Les propriétés des étoiles en général, et des céphéides en particulier, peuvent  
215 être prédites et interprétées dans le cadre de modèles numériques. On s'intéressera à deux aspects particuliers : l'évolution stellaire et les propriétés liées aux oscillations.

L'évolution et les oscillations peuvent être étudiées indépendamment car elles  
220 correspondent à des échelles de temps très différentes : de l'ordre de plusieurs dizaines ou centaines de millions d'années pour la première, de l'ordre du jour ou même de la minute pour les oscillations.

## 4.1 La vie des étoiles : interprétation du diagramme HR

En première approximation, une étoile est un volume de gaz (principalement  
225 de l'hydrogène et de l'hélium) subissant sa propre attraction gravitationnelle. Sous l'action de sa masse, ce gaz a tendance à se contracter, provoquant une élévation de température particulièrement importante dans les régions centrales. La pression du gaz et la pression de radiation s'opposent à la contraction gravitationnelle. La température, lorsqu'elle devient assez importante, déclenche des  
230 réactions nucléaires, principales sources d'énergie des étoiles.

On va donner quelques éléments de théorie de l'évolution stellaire, ceci en excluant les objets «exotiques» comme les trous noirs et les étoiles à neutrons. En premier lieu, la deuxième loi de Newton peut être appliquée à un volume  
235 élémentaire  $d\tau$  de fluide stellaire, on a ainsi :

$$\rho d\tau \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i^* d\tau \quad (7)$$

avec  $\rho$  la masse volumique,  $\vec{v}$  la vitesse d'écoulement du fluide, les  $\vec{F}_i^*$  sont les forces agissant sur l'unité de volume. Dans les  $\vec{F}_i^*$  on tient compte des forces de pression (dues au gaz, mais aussi la pression de radiation) et de l'attraction gravitationnelle. Pour certains types de modélisation on doit tenir compte de la  
240 rotation de l'étoile ou du champ magnétique. Pour la plupart des simulations d'évolution stellaire, dans le cadre d'un équilibre hydrostatique, on obtient :

$$\frac{\partial P}{\partial m} = -\frac{Gm}{4\pi r^4} \quad (8)$$

en prenant  $m$  (la masse de matière, comptée depuis le centre) comme variable indépendante. A cette équation, on ajoute la conservation de la matière, des éléments de thermodynamique, une description des phénomènes de transport et les  
245 équations liées à la production d'énergie nucléaire.

Dans les années 50, Louis Henyey de l'Université de Berkeley en Californie, a mis au point une méthode numérique qui permet de résoudre le système d'équations de la structure interne stellaire. A partir de la «naissance» de l'étoile :  
 250 l'instant  $t_0 = 0$  où les réactions nucléaires de fusion de l'hydrogène s'amorcent dans le cœur de l'étoile, on intègre une première fois le système d'équations régissant la structure interne (l'équilibre hydrostatique), ce qui permet d'obtenir –entre autres grandeurs physiques– la luminosité  $\mathcal{L}$  et la température de surface  $T_S$ . En prenant un pas de temps  $\Delta t$  on a un nouvel instant  $t_1 = t_0 + \Delta t$  pour  
 255 lequel on calcule la nouvelle composition chimique issue des réactions nucléaires et du mélange, ceci en tout point de l'objet. Les équations de l'équilibre hydrostatique sont alors à nouveau résolues. On recommence le processus autant de fois que nécessaire pour une suite d'âges  $t_2, t_3, \dots, t_N$ .

260 Avec une étoile de masse et de composition chimique initiale données, on obtient à la fin du calcul un ensemble de couples  $(T_S, \mathcal{L})$  correspondant à tous les instants  $t_i$  pour lesquels la structure interne a été déterminée.

Dans le plan  $(\text{Log } T_S, \text{Log } \mathcal{L})$ , la ligne qui relie tous les points de coordonnées  
 265  $(\text{Log } T_S, \text{Log } \mathcal{L})$  (chacun d'eux correspondant à un instant) s'appelle un *trajet évolutif*. C'est un outil essentiel en théorie de l'évolution stellaire. Un exemple de trajet évolutif est donné par la figure 6.

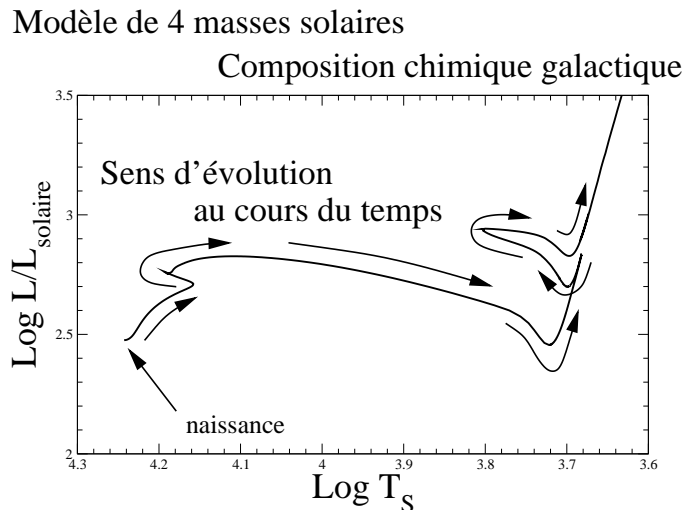


FIG. 6 – Un exemple de trajet évolutif obtenu pour une masse de 4 masses solaires et une composition chimique initiale typique de notre galaxie. Le sens d'évolution de l'étoile est indiqué par des flèches de long de la courbe.

Les couples  $(\text{Log } T_S, \text{Log } \mathcal{L})$  calculés théoriquement peuvent être convertis en  
 270 données comparables avec les observations, c'est ce qui est fait sur la figure 7.

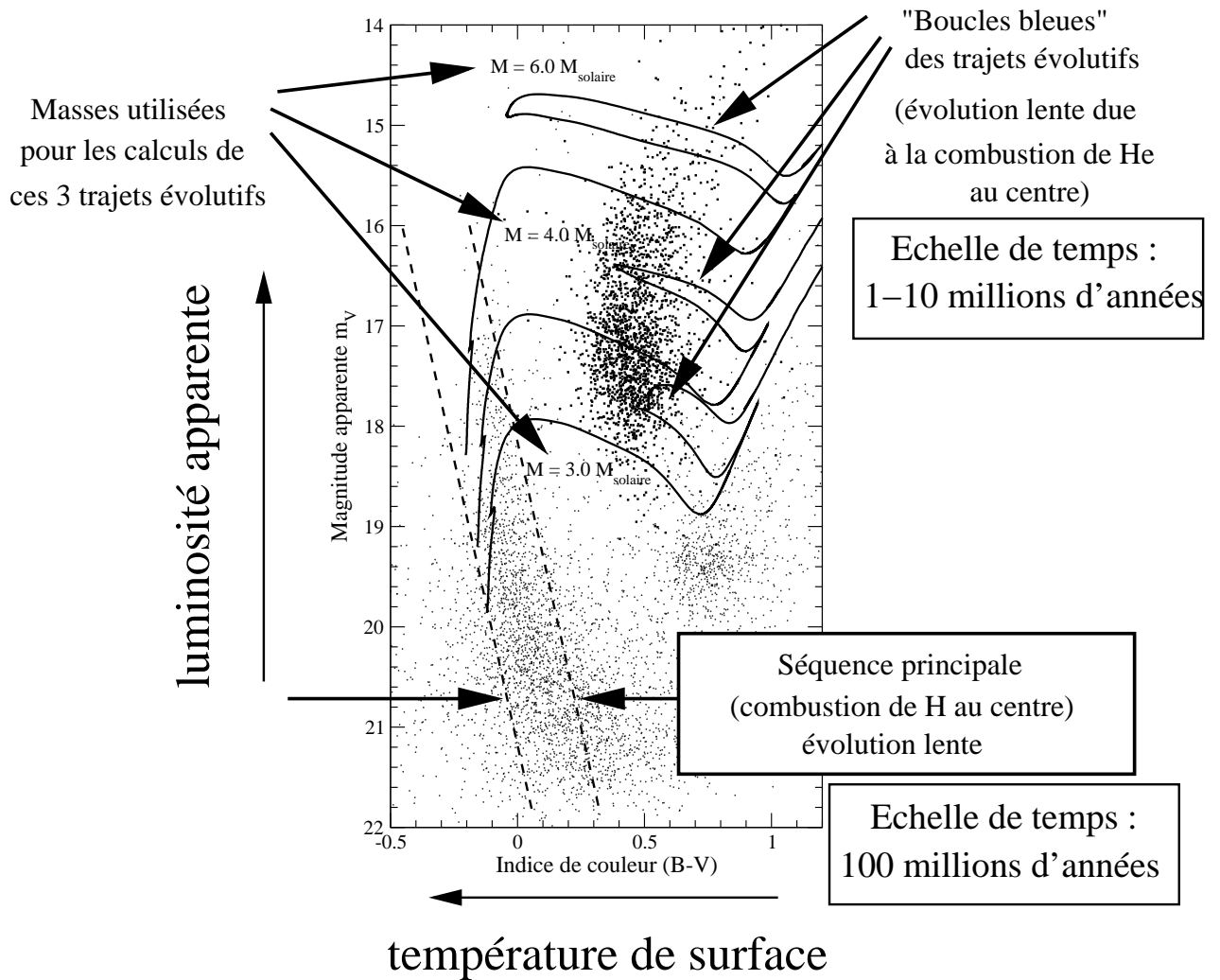


FIG. 7 – Diagramme de Hertzsprung-Russell reprenant celui de la figure 2, auquel ont été ajouté trois trajets évolutifs. Les phases évolutives les plus lentes correspondant à la combustion de H et à celle de He ont été indiquées avec les échelles de temps correspondantes. Sur la séquence principale toutes les étoiles n'ont pas été représentées afin de préserver la lisibilité de la figure.

Comme on le voit, la distribution non-uniforme des étoiles dans ce diagramme correspond à différentes phases de la vie des l'étoiles, la production massive d'énergie par les réactions nucléaires au centre des étoiles permet l'existence de

phases à longue durée de vie. La «séquence principale», région du diagramme où on trouve beaucoup d'étoiles, correspond à la combustion (au sens nucléaire du terme) de l'hydrogène au cœur de l'étoile. Les céphéides sont des objets ayant dépassé ce stade, elle brûlent de l'hélium dans leurs centres.

Les étoiles céphéides sont situées dans la «bande d'instabilité» déjà mentionnée sur la figure 2, cette région correspond à une portion des «boucles bleues» des trajets évolutifs. De plus, c'est dans cette région du diagramme que les étoiles se mettent à osciller sous l'effet déstabilisant du «mécanisme  $\kappa$ » (voir plus loin) qui fait de ces objets des étoiles variables.

## 4.2 Interprétation des courbes de lumière : modélisation des oscillations des céphéides

Vers le début du XXe siècle, beaucoup d'astronomes pensaient que les variations d'éclat observées chez les étoiles similaires à  $\delta$  *cephei* étaient causées par la présence de deux étoiles (voir par exemple Campbell 1895). On devait –selon eux– être en présence de «systèmes binaires». Pour ce type d'objet, l'éclipse plus ou moins partielle, d'une étoile par l'autre, engendre –pour l'observateur lointain– une luminosité périodique. En effet, quand un «système binaire» est suffisamment éloigné de l'observateur, il n'est pas possible de distinguer individuellement les étoiles le composant.

L'idée d'une origine intrinsèque des variations de luminosité a émergé avec les réflexions de Shapley (1914) et d'Eddington (1918 et 1919). Cependant un phénomène d'excitation des oscillations des céphéides devait être proposé. Deux hypothèses ont été envisagées, dont une appelée «mécanisme  $\kappa$ ». C'est Zhevakin qui montra que ce «mécanisme  $\kappa$ » devait être particulièrement fort dans une zone proche de la surface des céphéides.

La théorie des pulsations a été vraiment confirmée lors des premières simulations informatiques par Baker & Kippenhahn (1962). Nous allons dans la suite exposer quelques idées simples sur les oscillations des étoiles.

### 4.2.1 Nature de l'oscillateur

En négligeant tous les détails de la structure interne (existence de zones convective, ...), il est possible de schématiser une étoile par une «boîte» sphérique contenant du gaz porté à haute température. Par la pensée, on peut découper cette dernière en une suite de coquilles sphériques concentriques, dont les masses volumiques vont en croissant lorsqu'on se déplace de la surface vers le centre. C'est ce qui a été représenté sur la figure 8.

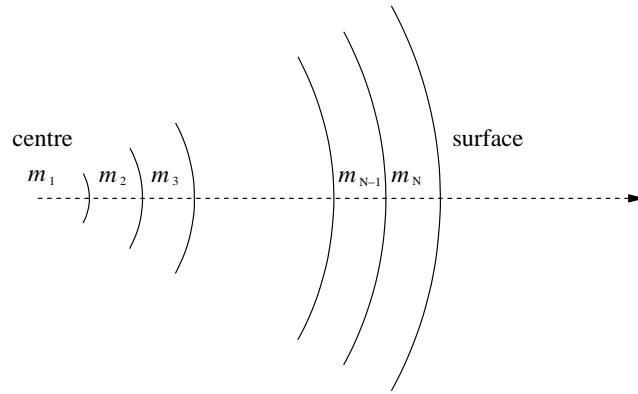


FIG. 8 – Schématisation d’une étoile comme une suite de coquilles.

315

Ce système est similaire à une chaîne de masselottes liées les unes aux autres par des ressorts (voir figure 9). Une tel système possède un ensemble de **périodes propres** d’oscillation. Pour que le système oscille, il faut cependant qu’il y ait un phénomène excitateur fournissant de l’énergie : la corde d’un violon a besoin du frottement de l’archet pour vibrer.

320

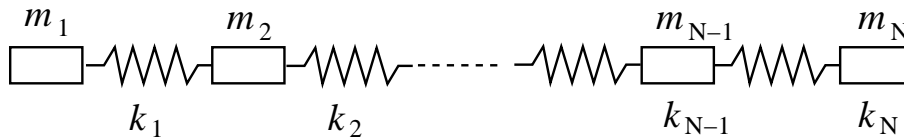


FIG. 9 – Ensembles de masselottes.

Toutes les étoiles sont susceptibles d’osciller et ainsi d’exhiber des variations de rayons, température et luminosité qui seront éventuellement observables. Les modes d’oscillation du Soleil sont entretenus par le «bruit» généré par la convection, ceux des céphéides le sont par le «mécanisme  $\kappa$ ». Ce dernier a lieu dans une zone proche de la surface où les atomes d’hydrogène et d’hélium sont ionisés. La zone d’ionisation des atomes d’hydrogène et celle de la première ionisation de l’hélium sont plus proches de la surface de l’étoile, elles se trouvent entre 10 000 K et 15 000 K. En allant vers le centre de l’étoile la température augmente, et vers 40 000 K se trouve la région de deuxième ionisation de l’hélium.

325

330

$\kappa$  est la notation usuelle pour le coefficient d’absorption moyen des ondes électromagnétiques par le plasma de l’étoile. Dans la région où H et He s’ionisent, ce coefficient  $\kappa$  a un comportement particulier que l’on va essayer de décrire très qualitativement.

335

Si on imagine qu'une légère surpression est appliquée dans la zone d'ionisation, la température augmente en faisant croître  $\kappa$ . L'énergie absorbée par la matière devient plus importante, ce qui tend à dilater le milieu. A contrario, si ce dernier est l'objet d'une légère dépression,  $\kappa$  diminue en provoquant une perte d'énergie et donc une tendance à la contraction.

Les zones d'ionisation de l'étoile entretiennent les oscillations qui se propagent dans toute l'étoile ; alors que les autres régions de l'astre ont tendance à amortir ces oscillations. Le «mécanisme  $\kappa$ » produit par le phénomène d'ionisation est étroitement lié à la température de l'étoile. Quand dans un diagramme HR, on se déplace des étoiles à surface chaude (côté gauche du diagramme) vers les étoiles plus froides (côté droit du diagramme) on peut montrer théoriquement qu'il existe une température critique où l'effet d'excitation par le «mécanisme  $\kappa$ » devient plus important que l'amortissement. Cette température critique définit le «bord bleu» de la bande d'instabilité révélée par les observations. En poursuivant notre déplacement dans la direction des basses températures, à l'intérieur des étoiles la convection devient de plus en plus importante, allant jusqu'à annihiler les oscillations ; ce qui explique l'existence du «bord rouge» de la bande d'instabilité.

#### 4.2.2 Détermination des valeurs de périodes propres : approche linéaire

Il existe plusieurs méthodes permettant de calculer les périodes propres des modèles d'étoiles céphéides. Les plus courantes sont de type «perturbatives» : on écrit pour la température, la pression, le rayon :

$$T = T_0 + \delta T, P = P_0 + \delta P, r = r_0 + \delta r, \dots$$

soit de façon générique pour une grandeur physique  $X$  :  $X = X_0 + \delta X$  avec  $|\delta X| \ll |X_0|$ ,  $|X_0|$  correspondant à l'équilibre hydrostatique. Les équations de la structure interne peuvent alors être écrites en négligeant les termes d'ordre supérieur ou égal à 2 : on linéarise les équations. On obtient par exemple, en partant de l'équation 7 :

$$\rho_0 r_0 \frac{d^2 \delta r / r_0}{dt^2} = - \left( 4 \frac{\delta r}{r_0} + \frac{\delta P}{P_0} \right) \frac{\partial P_0}{\partial r_0} - P_0 \frac{\partial \delta P / P_0}{\partial r_0} \quad (9)$$

On remarque qu'on a tenu compte ici du terme d'accélération. Si on connaît la structure (issue de l'hydrostatique) d'une étoile, les inconnues sont alors les  $\delta X$ .

Plusieurs approches sont disponibles dans la littérature afin d'obtenir les  $\delta X$ , une des plus populaires est celle publiée en 1971 par John Castor du laboratoire de Los Alamos aux Etats-Unis. La méthode de Castor traite la recherche des  $\delta X$  et des pulsations  $\omega$  (*i.e.* des périodes) comme un problème aux valeurs propres.



Linéariser les équations présente deux avantages principaux : le calcul est rapide et ne présente aucune difficulté numérique de convergence. En général, les valeurs des périodes obtenues sont en bon accord avec les observations. L'inconvénient majeur est l'absence de prédiction concernant les amplitudes des oscillations : on ne peut pas calculer ainsi des courbes de lumière théoriques.

## 5 Conclusion

Les étoiles céphéides offrent un intéressant exemple de système aux oscillations auto-entretenues. Dans une étoile comme le Soleil, une perturbation excite un ou plusieurs modes d'oscillation ; si la perturbation n'est pas maintenue au cours du temps, les oscillations sont amorties. A contrario, dans les étoiles sièges du «mécanisme  $\kappa$ », une perturbation engendre des oscillations qui vont voir leur amplitude croître dans le temps jusqu'à atteindre une valeur limite qui est celle observée.

Outre leur intérêt comme indicateurs de distance, les céphéides posent des problèmes de physique. Bien que leurs propriétés générales soient bien connues, certains comportements concernant aussi bien leur évolution (forme des trajets évolutifs en contradiction avec les observations) que leurs propriétés d'oscillateurs (modélisation des rapports de périodes pour celles oscillant suivant plusieurs modes). De plus la prise en comptes, dans les simulations numériques, de l'interaction entre les phénomènes d'oscillations et ceux liés à la convection sont encore hors de portée.

**Photon**

Le photon est la particule élémentaire médiatrice de l'interaction électromagnétique. Lorsque deux particules chargées électriquement interagissent, cette interaction se traduit d'un point de vue quantique, comme un échange de photons.

400 Les ondes électromagnétiques, des ondes radios aux rayons gamma en passant par la lumière visible, sont toutes constituées de photons. Ces derniers peuvent être considérés comme des «paquets» élémentaires d'énergie ou «quanta» de rayonnement électromagnétique qui sont échangés lors de l'absorption ou de l'émission de lumière par la matière.

405

**Corps noir**

Le corps noir est un objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il recevrait, sans réfléchir ni transmettre. Il n'est fait aucune hypothèse sur la nature de l'objet. La lumière étant une onde électromagnétique, elle est absorbée

410 totalement et l'objet devrait donc apparaître noir, d'où son nom.

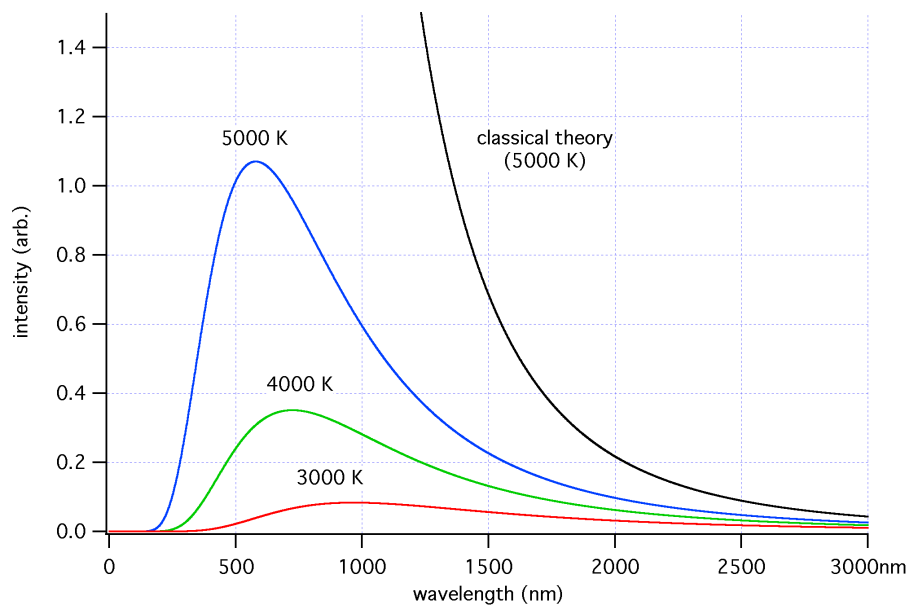


FIG. 10 – Exemples de spectres de corps noir, sur un diagramme de l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde. Quand la température est élevée, le pic de la courbe se déplace vers les courtes longueurs d'ondes, et inversement pour les plus basses températures.

Le spectre d'un corps noir (voir figure 10) ne dépend que de sa température, la position du maximum d'intensité d'émission du corps noir est donné par la loi du déplacement de Wien :

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

415 où  $\lambda_{\max}$  est la longueur d'onde de ce maximum,  $b = 2,8977685 \times 10^{-3}$  m.K est la constante du déplacement de Wien et  $T$  la température absolue du corps noir. La puissance électromagnétique totale émise par le corps noir lui permet de garder sa température constante.

---

#### 420 **Transformée de Fourier**

Pour une fonction qui peut être écrite comme une série de Fourier, la *transformée de Fourier* est une opération mathématique permettant d'obtenir le spectre des fréquences.