

**Société Astronomique de la Montagne de Lure**

# **Les Céphéïdes**

**Jacques Vallée**  
**15 juillet 2017**

**Les Nuages de Magellan**  
**European Southern Observatory**

# Introduction

- **A l'oeil nu, la luminosité des étoiles semble constante**
- **Pourtant, la luminosité de pratiquement toutes les étoiles est variable**
- **Les Céphéides sont une famille d'étoiles variables**
- **Objectifs de cet exposé**
  - Présenter les principales caractéristiques des Céphéides
  - Montrer leur intérêt historique et actuel
  - Donner une idée des questions qu'elles soulèvent aujourd'hui

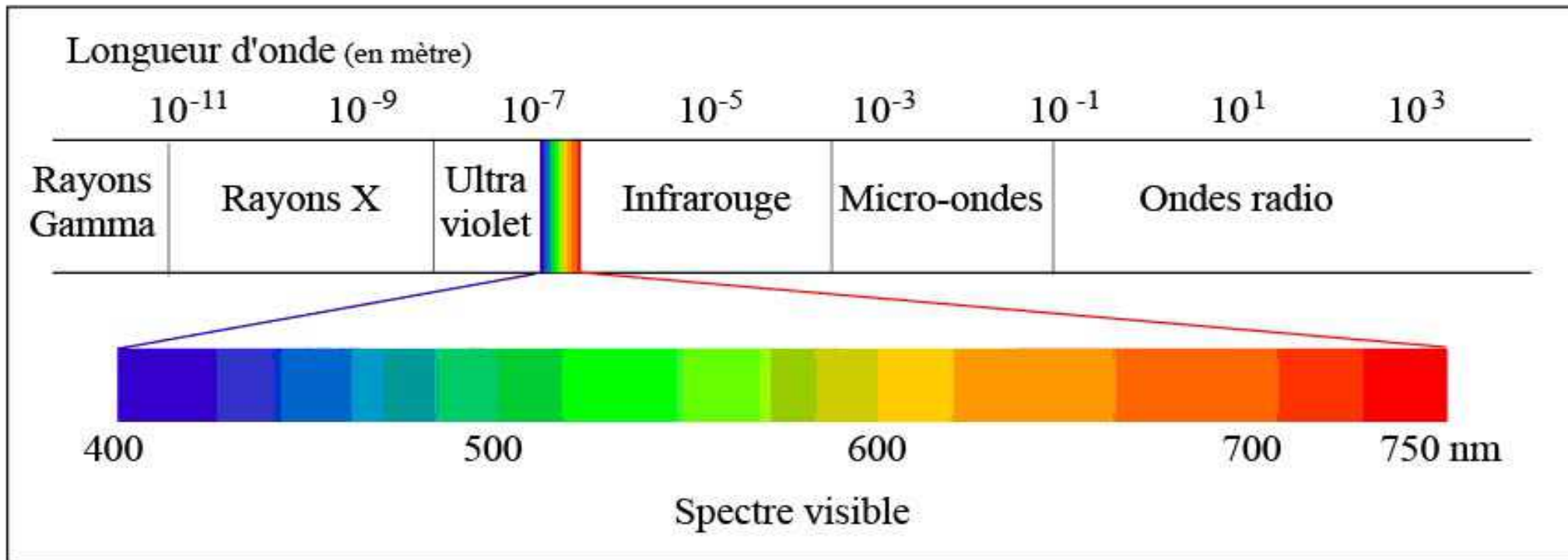
# Plan

- **La luminosité et l'éclat des étoiles**
  - **Magnitude apparente et absolue**
  - **Couleur et température**
  - **Diagramme Hertzsprung-Russell**
- **Les Céphéides**
- **La saga de la relation période / luminosité**
- **La méthode Baade-Wesselink de mesure des distances**



# Luminosité des étoiles

- L'énergie produite au cœur d'une étoile est dissipée sous forme de **rayonnement**
- La lumière émise couvre une bande de longueur d'ondes
  - Ultra-violet, visible, infra rouge
- La **luminosité** d'une étoile est la puissance émise par l'étoile



# Spectre d'une étoile

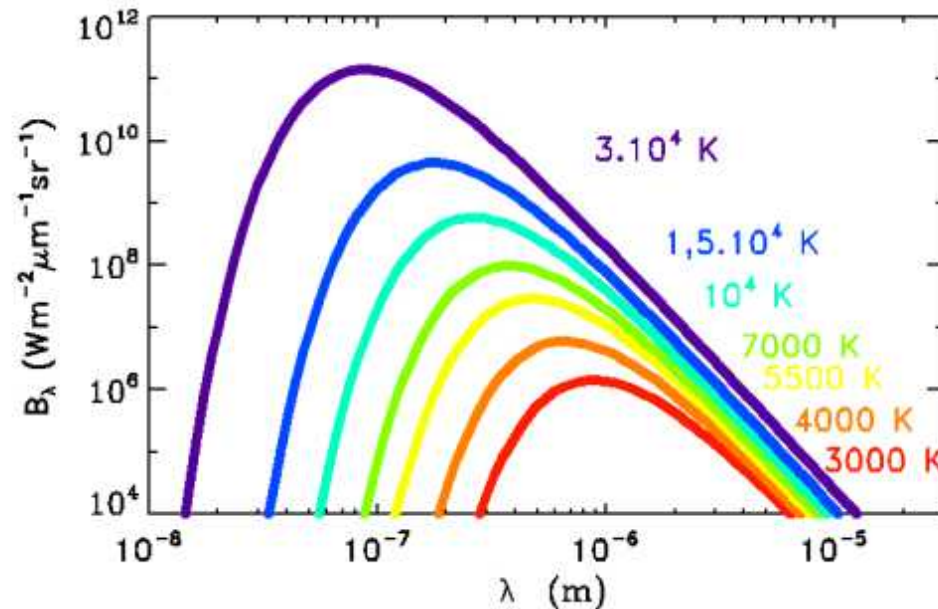
- **Rayon et température d'une étoile**

- La lumière d'une étoile est émise par la **photosphère** = région de faible épaisseur, de rayon R et de température T
- La **luminosité** d'une étoile est la puissance émise par l'étoile

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

- $\sigma$  = constante de Boltzmann

- **Spectre de lumière des étoiles**



# Magnitude apparente

- **Eclat** = puissance reçue par unité de surface à la distance de la Terre
  - Pour une étoile de luminosité L située à la distance D de la Terre, l'éclat vaut

$$E = \frac{L}{4 \pi \cdot D^2}$$

- **Magnitude apparente** = échelle comparant l'éclat des astres

$$m1 - m2 = -2.5 \cdot \log \frac{E1}{E2}$$

- Par convention la magnitude de Véga est nulle

E1 / E2	m1 - m2
1 / 1 000 = 1 / 10 <sup>3</sup>	7.5
1 / 100 = 1 / 10 <sup>2</sup>	5.0
1 / 10	2.5
1	0
10	- 2.5
100 = 10 <sup>2</sup>	- 5.0
1 000 = 10 <sup>3</sup>	- 7.5

# Magnitude absolue

- **Magnitude absolue** = échelle de luminosité
  - Magnitude apparente à une distance de **10 parsecs** (~ 32.6 a.l.)
  - C'est une propriété de l'astre
- **Module de distance** = différence entre magnitude apparente et absolue
  - D = distance étoile - Terre en parsec

$$m_{\text{apparente}} - M_{\text{absolue}} = 5 \cdot \log D - 5$$

- **Pour une étoile donnée**
  - Si  $m_{\text{apparente}}$  et  $M_{\text{absolue}}$  sont connus, on peut en déduire D
  - Si  $m_{\text{apparente}}$  et D sont connus, on peut en déduire  $M_{\text{absolue}}$

# Quelques ordres de grandeur de magnitude

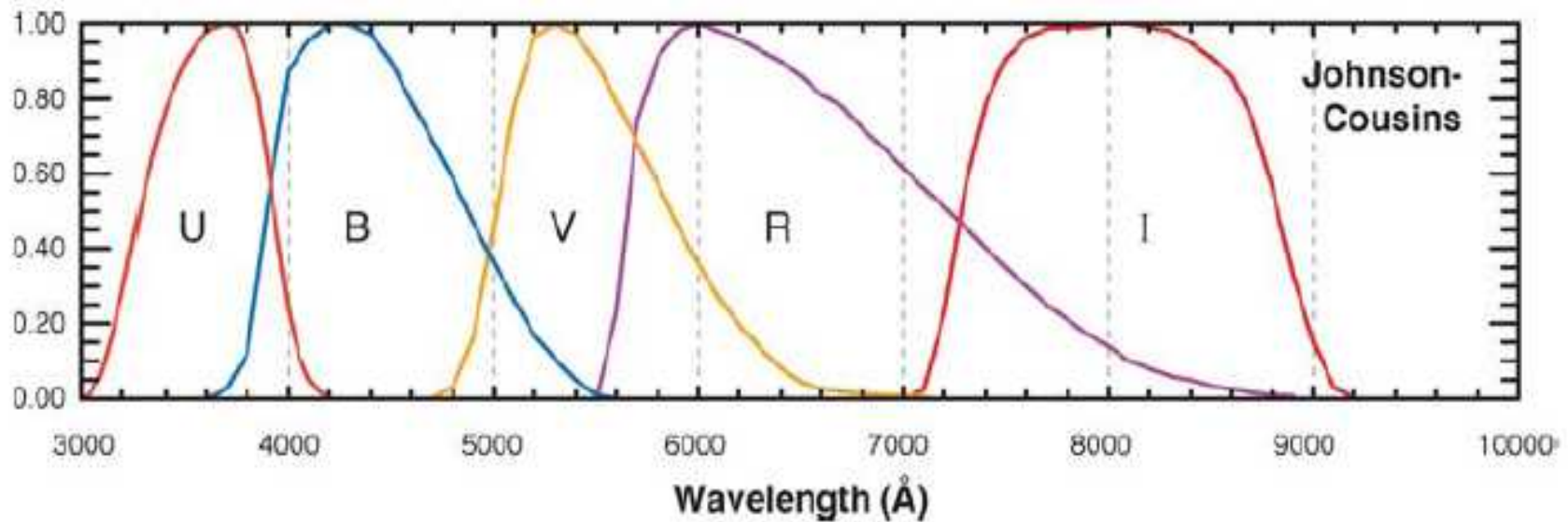
Objet	Magn. apparente	Magn. absolue	Distance (parsecs)	Distance (a.l.)
Soleil	- 26.7	4.83		
Sirius ( $\alpha$ Canis Majoris), étoile la plus brillante vue de la Terre	- 1.5	1.47	2.6	8.4
Véga ( $\alpha$ Lyrae), <b>magnitude app. 0 par définition</b>	<b>0</b>	0.58	7.6	25
Altaïr ( $\alpha$ Aquilae)	0.76	2.22	5.1	17
Antarès ( $\alpha$ Scorpii)	1.06	-5.58	213	694
Deneb ( $\alpha$ Gygni)	1.25	-7.2	490	1 597
<b>Limite perception œil nu</b>	<b>6</b>			
Limite mesures Hipparcos (1989-1997)	~ 12			
Limite mesures Gaia (2013-2019)	~ 20			
Limite perception télescope HST (1990-2020)	~ 30			



# Filtres photométriques

- **Les photorécepteurs ont des sensibilités spécifiques**
  - Oeil humain  $\neq$  plaques photographiques  $\neq$  appareils photos numériques, etc.
- **Nécessité d'établir une norme pour comparer les résultats provenant de différents instruments**
- **Les systèmes de filtres** permettent d'effectuer des mesures sur des bandes spectrales définies
  - Exemple : U, B, V, R, I du système [Johnson-Cousins](#)
- **Préciser la bande spectrale des magnitudes**
  - Exemple : m(Bleu), m(Visible), etc.
  - [Véga](#) a une magnitude apparente nulle dans toutes les bandes

# Exemple de système de filtres : Johnson-Cousins



Réponse des filtres Johnson-Cousins

# Indice de couleur et température d'une étoile

- L'**indice de couleur** d'une étoile entre 2 bandes photométriques est la différence de magnitude entre ces deux bandes

- Exemple :

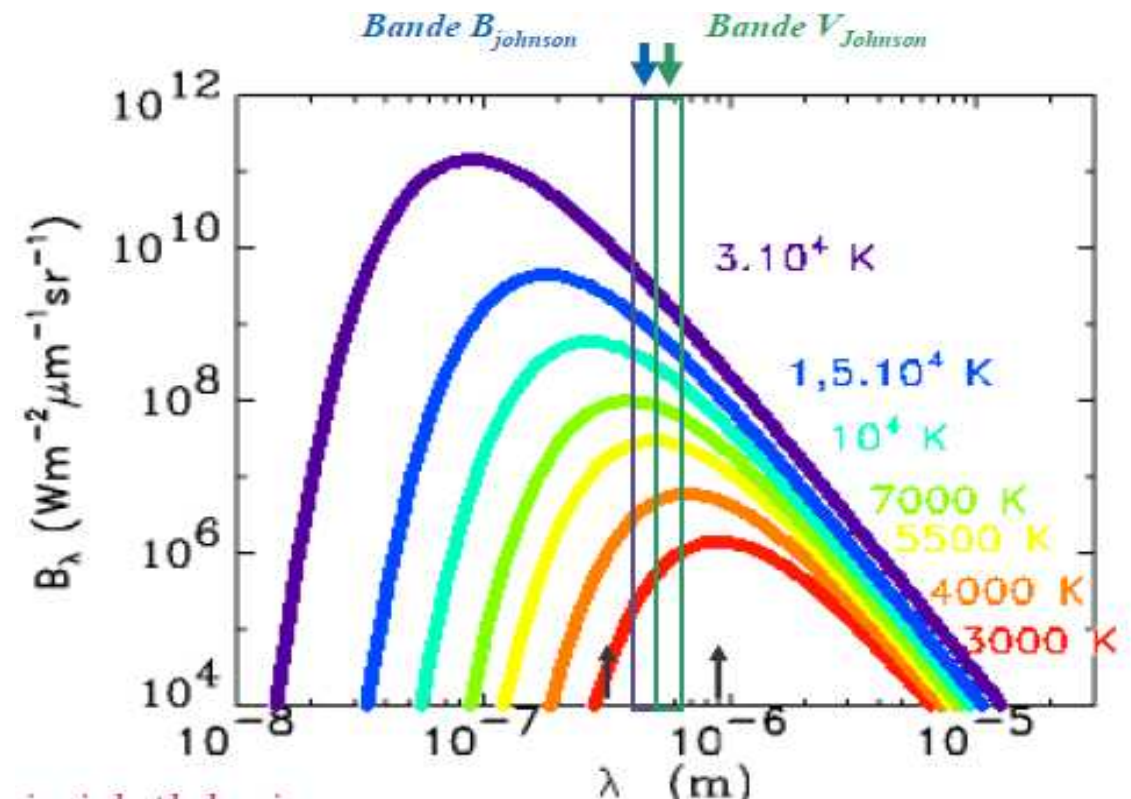
$$B - V = m(B) - m(V) = -2.5 \log \frac{E(B)}{E(V)}$$

- **Bon indicateur de température**

- $B-V < 0 \rightarrow$  étoile chaude
- $B-V > 0 \rightarrow$  étoile froide

T (K)	B-V	T (K)	B-V
40 000	- 0.35	6 580	0.42
28 000	- 0.31	6 030	0.58
15 000	- 0.16	5 520	0.70
9 000	0.00	4 900	0.89
7 400	0.27	3 480	1.45

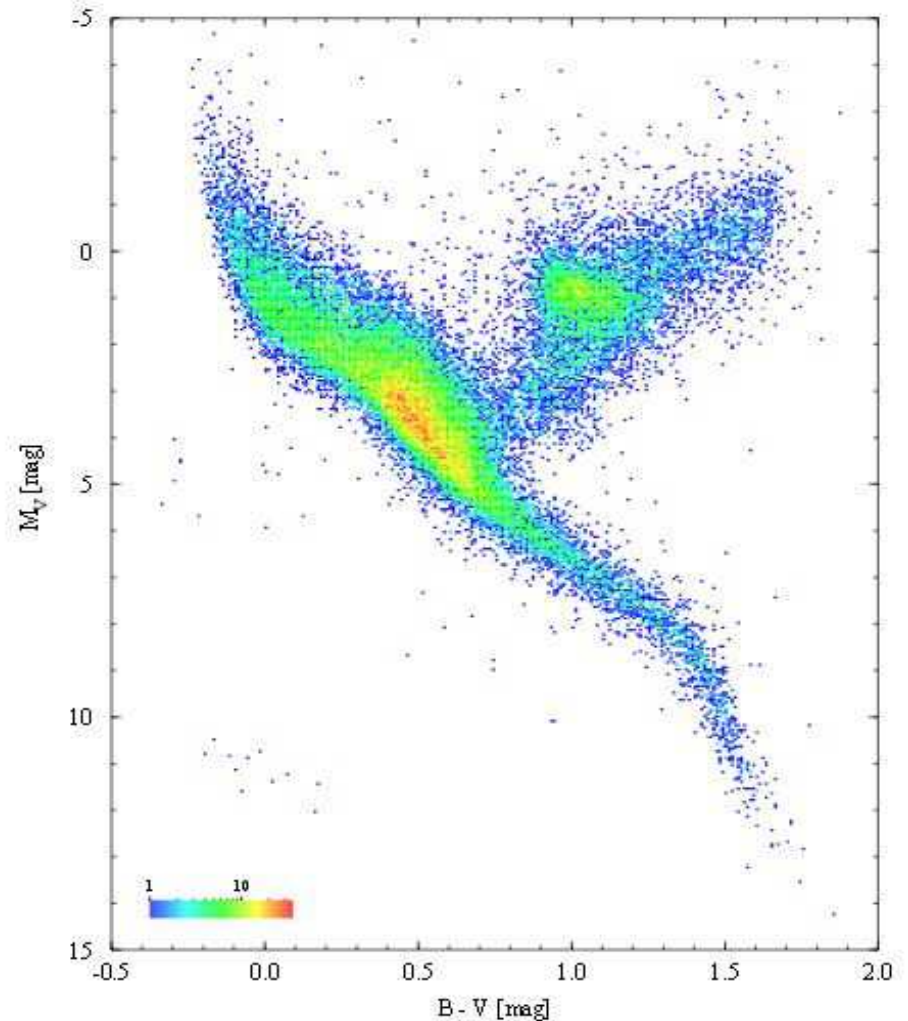
Correspondance température  
indice de couleur



Comparaison des magnitudes bleu et visible

# Diagramme Hertzsprung-Russell (HR)

- Diagramme température / luminosité
- Au cours de sa vie, une étoile se déplace dans le diagramme
- Deux groupes majeurs
  - Séquence principale
  - Géantes



**Diagramme HR constitué à partir  
des données Hipparcos**

Le diagramme a été établi à partir de 41 704 étoiles  
du catalogue Hipparcos

# Plan

- **La luminosité et l'éclat des étoiles**
- **Les Céphéides**
  - Paramètres fondamentaux
  - Pulsations, courbes de luminosité de delta Cephei
  - Modes et fréquences de vibration des Céphéides
  - Pourquoi les Céphéides vibrent ?
  - Stade évolutif, bande d'instabilité
- **La saga de la relation période / luminosité**
- **La méthode Baade-Wesselink de mesure des distances**



# Les Céphéides

- **Une des premières familles d'étoiles variables périodiques identifiées**
  - 1784 : découverte de  $\eta$  [Aquilae](#) par Edward Pigott et  $\delta$  [Cephei](#) par John Goodricke, un astronome amateur
- **Où les voit-on ?**
  - Notre Galaxie, les nuages de Magellan, Andromède et autres galaxies proches
- **Parmi les ~ 100 milliards d'étoiles de notre Galaxie, les Céphéides sont peu nombreuses**
  - ~ 1 000 Céphéides répertoriées actuellement
  - ~ 20 000 à 35 000 Céphéides suspectées
  - ~ 5 000 pourraient être découvertes par la mission Gaia de l'ESA
  - ~ 40 Céphéides visibles à l'oeil nu (parmi 6 000 étoiles)
  - [l'Etoile Polaire](#) est la Céphéide la plus proche de nous et la plus brillante (431 a.l.)

# Paramètres fondamentaux

- **Les Céphéides (classiques ou de type I)**
  - Géantes moyennement massives ayant quitté la séquence principale
  - Pulsantes, amplitude de magnitude visuelle de 1.5 à 0.1
- **$\delta$  Cephei est le prototype**

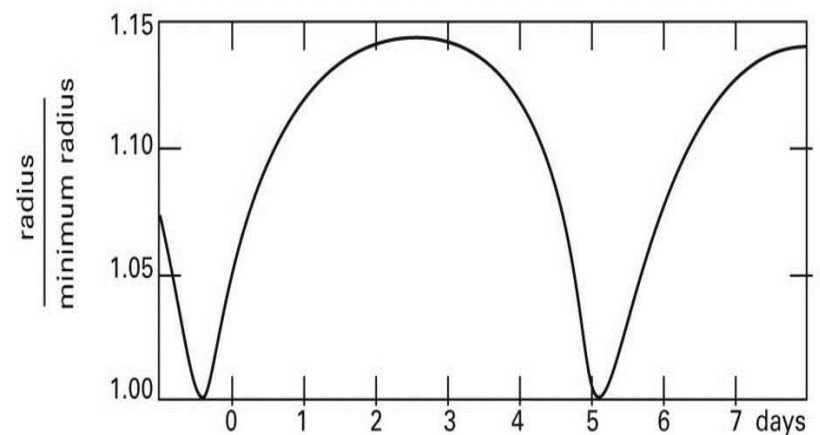
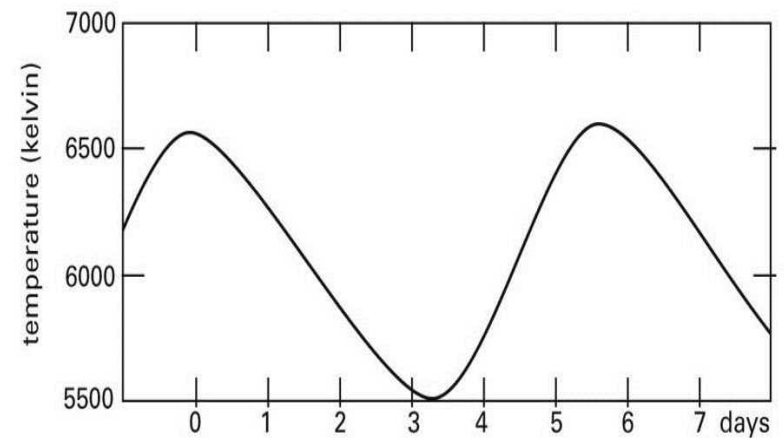
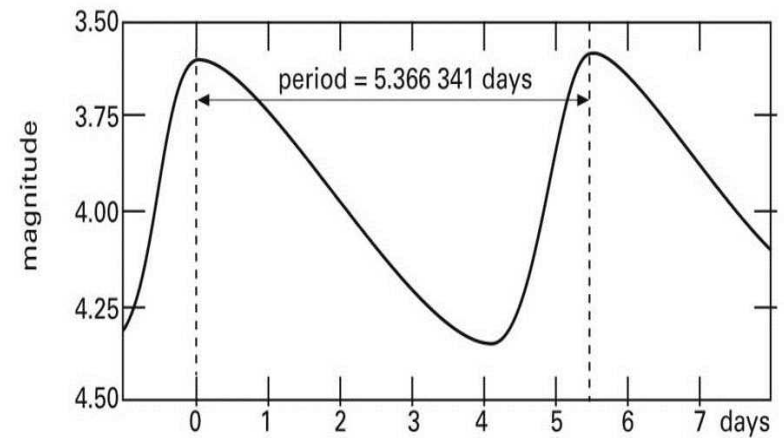
	Minimum	$\delta$ Cephei	Maximum
Période	1 jour	5.366 jours	50 jours
Luminosité moyenne	380 LSoleil	2 000 LSoleil	31 000 LSoleil
Température moyenne	6 900 K	6 100 K	5 400 K
Rayon moyen	14 RSoleil	42 RSoleil	200 RSoleil
Masse	3.7 MSoleil	5 MSoleil	14 MSoleil
Masse volumique moyennne	1.9 kg / m <sup>3</sup>	0.09 kg / m <sup>3</sup>	0.002 kg / m <sup>3</sup>
Magnitude absolue (V)	-1	-3.4	-6
Variation de magnitude (V)	0.1	0.8	1.5

# Pulsations de $\delta$ Cephei

- **Mode pulsation radial**
  - Conservation de la sphéricité de l'étoile
- **Au cours d'une période**
  - La magnitude croît et décroît
  - Les autres paramètres de l'étoile, rayon, température, varient avec un déphasage
- **Stabilité de la période**
  - 5 jours 8 heures 47 minutes 31.86 secondes

## Variations des caractéristiques de $\delta$ Cephei au cours d'une pulsation

De haut en bas :  
Magnitude apparente  
Température (en K)  
Rayon (en valeur relative)



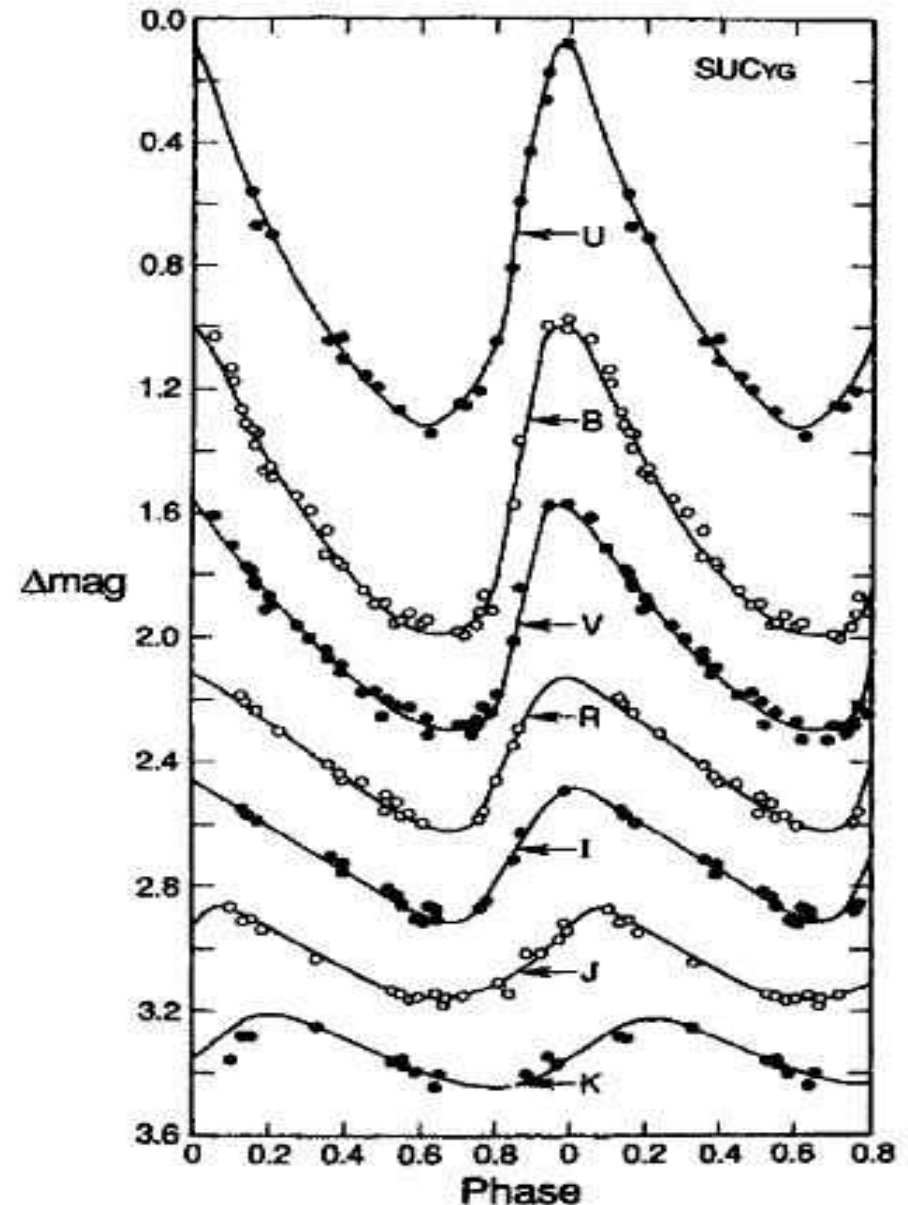
# Influence de la longueur d'onde sur l'amplitude de magnitude

- L'amplitude des courbes de lumière décroît fortement de l'UV à l'IR

- $\Delta \text{mag}$  ultraviolet =  $\sim 1.2$
- $\Delta \text{mag}$  IR =  $\sim 0.2$

**Courbes de lumière  
d'une Céphéide de la Galaxie**

Source : Madore & Freedman 1991



# Modes de vibration des Céphéides

- **Mode fondamental**

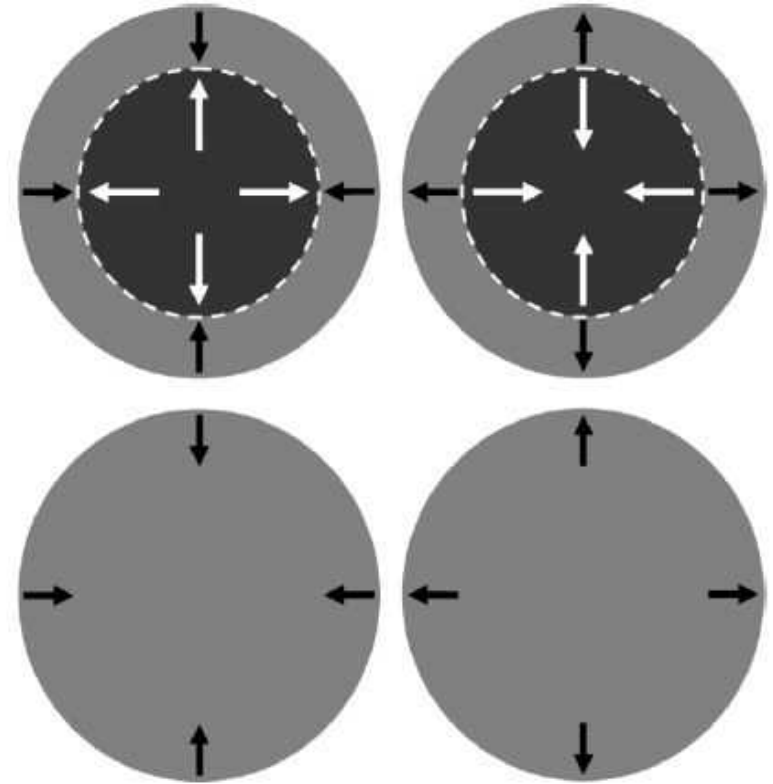
- Toute l'étoile se dilate ou se contracte alternativement

- **Harmoniques**

- Présence d'une ou deux sphères immobiles

- **Les vibrations peuvent être :**

- Mono-modes : F, O1, O2
- Multi-modes : F + O1, F + O2 , O1 + O2



**Modes de vibration des Céphéides**

En bas : mode fondamental F, la totalité de l'étoile se rétracte ou se dilate

En haut : mode O1, la sphère nodale est immobile



# Modes de vibration des Céphéides

- **Le mode fondamental est le plus fréquent**

- La période  $P_0$  du mode fondamental est égale au temps parcouru par une onde de pression pour traverser l'étoile

$$P_0 \sim \frac{Q}{\sqrt{\bar{\rho}}}$$

- $Q = \text{constante}$ ,  $\bar{\rho}$  = densité moyenne de l'étoile

- **Les harmoniques ont des amplitudes plus faibles que le mode fondamental et des périodes plus petites**

- Pour le mode O1, période  $P_1 \sim P_0 \times 0.7$
- Pour le mode O2, période  $P_2 \sim P_1 \times 0.8$

# Pourquoi les Céphéides vibrent ?

- **Première explication (erronée) des pulsations**
  - Variabilité extrinsèque (étoile binaire)
  - Explication rapidement abandonnée
  - Nécessité d'une source d'énergie interne pour entretenir les oscillations
- **1926 : Hypothèses (partiellement exactes) de A. Eddington**
  - **Moteur** analogue à un moteur à explosion, capable d'emmagasiner de l'énergie mécanique à la compression
  - Source d'énergie proche du centre de l'étoile → hypothèse erronée
  - Pas de description physique du phénomène
- **1962 : Description du mécanisme kappa**
  - La source d'énergie se situe dans des zones à **ionisation partielle** qui peuvent modifier l'**opacité** du milieu → contrôle des flux d'énergie

# Le moteur des vibrations : le mécanisme kappa

- **Zone d'ionisation partielle**

- Le niveau d'ionisation des éléments (H, He, etc.) croît avec la température
- Pour les Céphéides, le moteur des pulsations se situe dans la zone d'ionisation partielle de H et He ( $\sim 11\,000\text{ K}$ )

- **Que se passe-t-il lorsqu'une zone à ionisation partielle est comprimée ?**

- La température augmente  $\rightarrow$  H et He s'ionisent
- L'opacité de la couche augmente  $\rightarrow$  le flux de chaleur traversant la couche diminue
- La température et la pression en amont de la couche augmentent
- Lorsque la pression devient  $>$  gravité, **l'étoile se dilate**

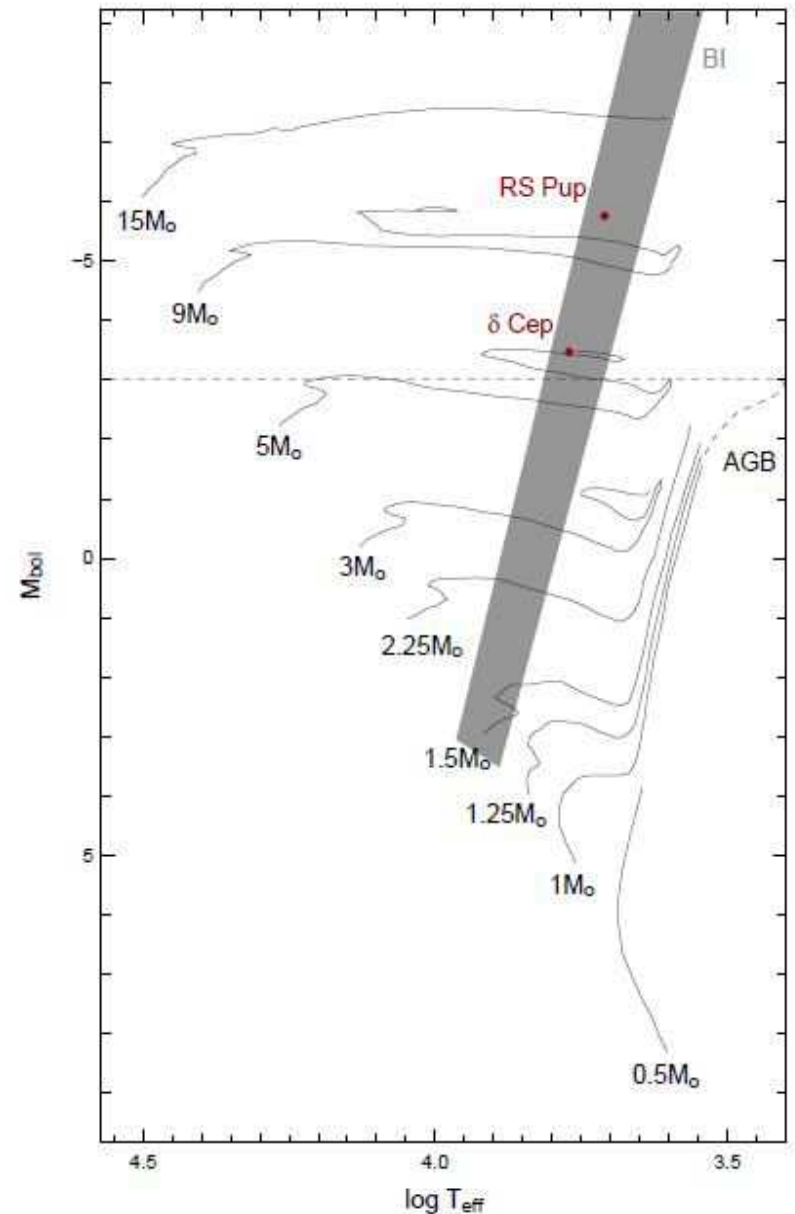
- **Le mouvement s'inverse lorsque la gravité  $>$  pression**

# La bande d'instabilité du diagramme HR

- L'énergie fournie par le mécanisme kappa génère des ondes qui se propagent dans l'étoile
- Pour les Céphéides, la zone d'ionisation partielle de H et He ( $\sim 11\,000\text{ K}$ ) est située à une « **bonne distance** » du centre et de la surface de l'étoile permettant :
  - La génération d'ondes stationnaires
  - La vibration de l'étoile selon un mode et une fréquence propres (éventuellement plusieurs)
- Dans le diagramme HR, ces conditions correspondent à la **bande d'instabilité**
  - Cette position assure l'homologie des Céphéides

# Stade évolutif des Céphéides

- La bande d'instabilité a deux bords pratiquement parallèles
- Une Céphéide est une étoile de masse moyenne ayant quitté la séquence principale et **traversant la bande d'instabilité**
  - Age = de 300 à 50 Ma
- Au cours de sa vie une telle étoile effectue plusieurs traversées « **blue loops** » dans un sens ou dans l'autre



Bande d'instabilité dans le diagramme HR



# Stade évolutif des Céphéides

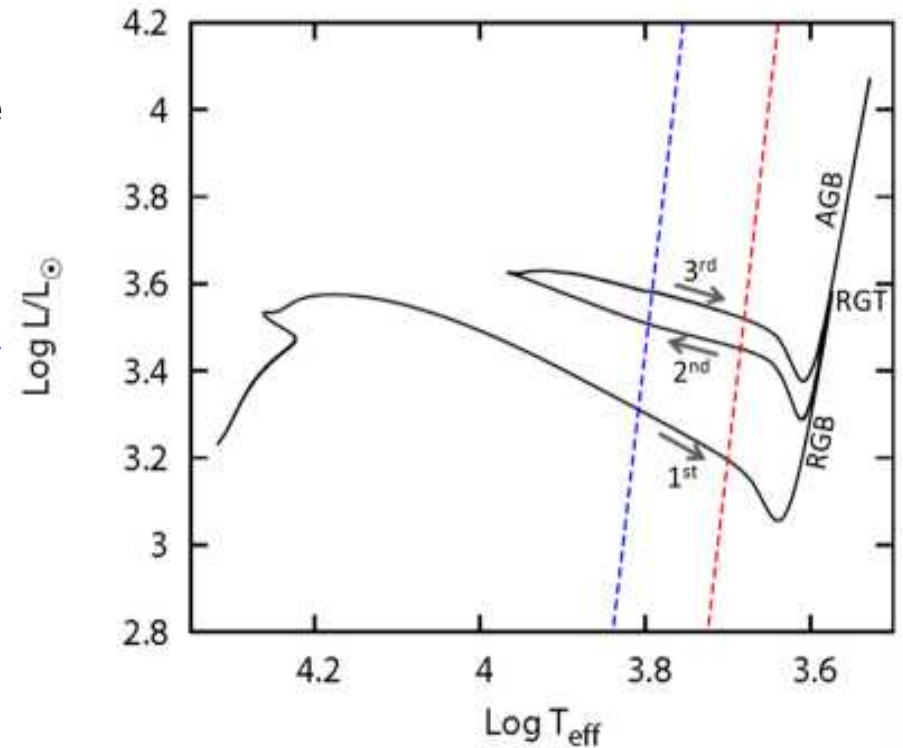
- **1<sup>er</sup> passage**

- L'étoile est une sous-géante, le cœur He est inactif et H brûle en couche
- La phase de sous-géante est courte
- Ce 1<sup>er</sup> passage est très rapide (1 000 à 10 000 ans), rarement observable

- **2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> passages**

- L'étoile est une géante, He brûle au cœur, H en couche
- Passage beaucoup plus long ~ 1 Ma

- **4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> passages éventuels pour les Céphéides les plus massives**



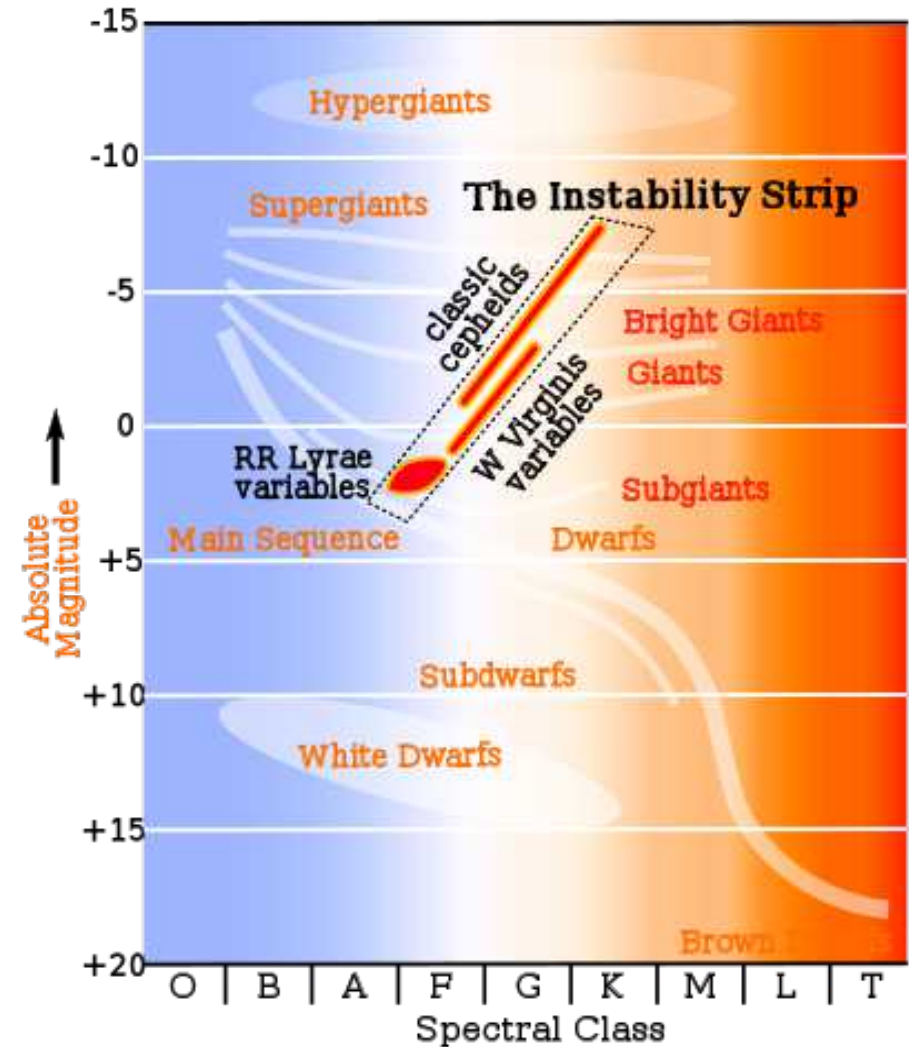
## Evolution d'une Céphéide de 7 MSoleil dans le diagramme HR

Le schéma est obtenu à partir du code de Yoon & Langer (2005)

RGB = red giant branch, RGT = red giant tip, AGB = asymptotic giant branch

# Autres étoiles pulsantes de la bande d'instabilité

- En dehors des Céphéides (type I), d'autres familles de géantes variables se situent dans la bande d'instabilité
- Exemples
  - *W Virginis* (= Céphéides type II)
  - RR Lyrae
- Les pulsations de ces étoiles sont radiales et entretenues par le mécanisme kappa
  - Pour la même période, elles ont des luminosités plus faibles que la Céphéide



Bande d'instabilité dans le diagramme HR

# Les étoiles W Virginis et RR Lyrae

- Etoiles de faible métallicité et vieilles (âge > appr. 10 Ga)
- Moins massives que les vraies Céphéides
- **Risque de confusion entre ces familles et les Céphéides type I**

	RR Lyrae	$\delta$ Cephei	W Virginis
Période	13 heures	5.65 jours	17 jours
Masse	0.65 MSoleil	5 MSoleil	0.4 MSoleil
Luminosité	49 LSoleil	2 000 LSoleil	851 LSoleil
Température	6 100 K	6 100 K	5 300 K
Rayon	5.3 RSoleil	42 RSoleil	35 RSoleil
Magnitude absolue	0.6	- 3.4	-3

Comparaison des caractéristiques des étoiles prototypes  
RR Lyrae,  $\delta$  Cephei et W Virginis

# Plan

- **La luminosité et l'éclat des étoiles**
- **Les Céphéides**
- **La saga de la relation période / luminosité**
  - **La découverte d'Henrietta Leavitt**
  - **Le rôle de la relation dans la mesure des distances en Astronomie**
  - **La relation P / L aujourd'hui**
- **La méthode Baade-Wesselink de mesure des distances**

# Henrietta Leavitt (1868-1921)

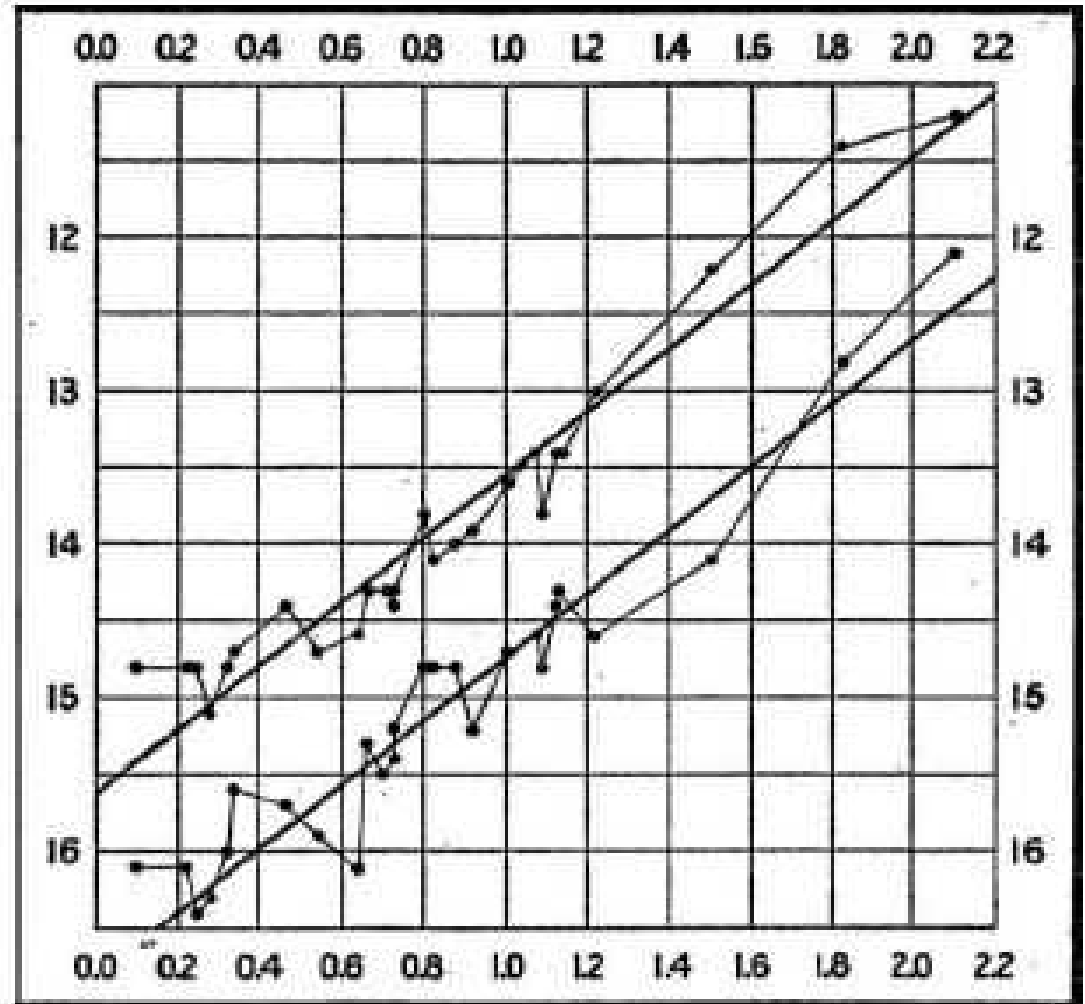
- **Une astronome américaine**
  - « Calculatrice » du département photométrie de l'Observatoire de l'Université de Harvard (Cambridge, Massachusetts)
- **Etudie les plaques photographiques des Nuages de Magellan provenant de l'observatoire d'Arequipa (Pérou)**
  - Télescope de 24 pouces
  - Identifie plus de 1 700 étoiles variables



# Henrietta Leavitt

- H. Leavitt sélectionne 25 étoiles du Petit Nuage de Magellan et observe
  - « ... a remarkable relation between the brightness of these variables and their periods »
  - Relation linéaire entre la magnitude moyenne de ces étoiles et le log de leur période

$$m = -2.0332 \log P + 16.163$$



Courbes P-L tracées par H. Leavitt (Leavitt & Pickering 1912)

En abscisse le logarithme de la période en jours, en ordonnée la magnitude photographique. Les deux courbes représentent les magnitudes maxi et mini.

# Henrietta Leavitt

- **H. Leavitt comprend la portée de sa découverte**

- *« Since the variables are probably the same distance from the Earth, their periods are apparently associated with their actual emission of light »*
- Intérêt de calibrer la relation (déterminer b) = obtenir une relation avec la magnitude absolue qui permettrait de calculer la distance D de n'importe quelle Céphéide à partir de  $m_{\text{apparent}}$  et P

$$M_{\text{absolue}} = -2.0332 \log P + b$$

- **Pour calculer b il suffit de connaître la distance D d'une Céphéide**

$$M_{\text{absolue}} = m_{\text{apparent}} - 5 \log D + 5 = -2.0332 \log P + b$$

- **H. Leavitt ne poursuit pas ses recherches et meurt en 1921**

- On pense à elle pour le prix Nobel de physique de 1926 !

# 1913 : première calibration par Ejnar Hertzprung

- **Aucune Céphéide n'est proche (< 100 a.l.)**
  - Impossibilité d'utiliser une méthode géométrique directe (parallaxe trigonométrique)
- **E. Hertzprung crée le terme de « Céphéide » et calibre la relation**
  - Utilise la méthode du **parallaxe statistique** sur un groupe de 13 Céphéides de la Galaxie
  - Obtient une formule erronée

$$M_V = -2.1 \log P - 0.6$$

- **Estime le Petit Nuage de Magellan à 30 000 a.l.** (actuel ~ 200 000 a.l.)
- La distance la plus lointaine connue à l'époque était celle de l'amas ouvert des **Hyades** à 130 a.l. (actuel 151 a.l.)
- **Principales sources d'erreur**
  - Le rougissement dans le plan de la Galaxie est ignoré
  - L'imprécision de la méthode de la parallaxe statistique





# 1920 : Harlow Shapley

- **Nouvelle calibration avec de nouvelles observations**
- **Confond involontairement deux natures de Céphéides**
  - Type I dans le plan galactique (c'est le type observé par H. Leavitt dans le Petit Nuage de Magellan)
  - Type II (W Virginis) dans les amas globulaires, étoiles moins brillantes mais avec un rougissement plus faible que les Céphéides du plan galactique
- **Les erreurs se compensent mais cela revient à calibrer la relation avec les W Virginis et non les Céphéides type I**
- **La calibration n'est pas meilleure et les distances restent minorées**



# 1929 : Edwin Hubble évalue la distance de M31

- **Etudie les nébuleuses lointaines à l'observatoire du Mont Wilson (Californie)**
  - Télescope de 250 cm
- **Identifie 40 Céphéides dans la galaxie Andromède (M31)**
  - Évalue la distance de M31 à partir de la relation (erronée) de Shapley à **900 000 a.l.** (en réalité 2.5 M a.l.)
- **Malgré l'erreur, il démontre que l'Univers dépasse les limites de la Voie Lactée**
  - Fin du « grand débat » sur les « univers-îles » entre Curtis (pour) et Shapley (contre)
  - Valide la notion de galaxie



# 1944 : Walter Baade différencie les deux types de Céphéides I et II

- **« *Cepheids are the most useful stars in the sky* »**
  - Leon Campbell et Luigi Jacchia, *The Story of Variable stars*, 1941
- **W. Baade travaille au Mont Wilson pendant la Guerre avec le télescope de 2.5 m**
  - Résout des étoiles dans la région centrale de la galaxie Andromède
- **1944 : il différencie les 2 types de Céphéides**
  - Type I = prototype  $\delta$  Cephei, étoiles jeunes, étudiées par H. Leavitt
  - Type II = étoiles plus vieilles, dans les amas globulaires (halo)
- **Pour une même période, les Céphéides type II sont moins lumineuses que les Céphéides classiques**
  - Ecart de magnitude = 1.5



# Vers une relation P / L moderne

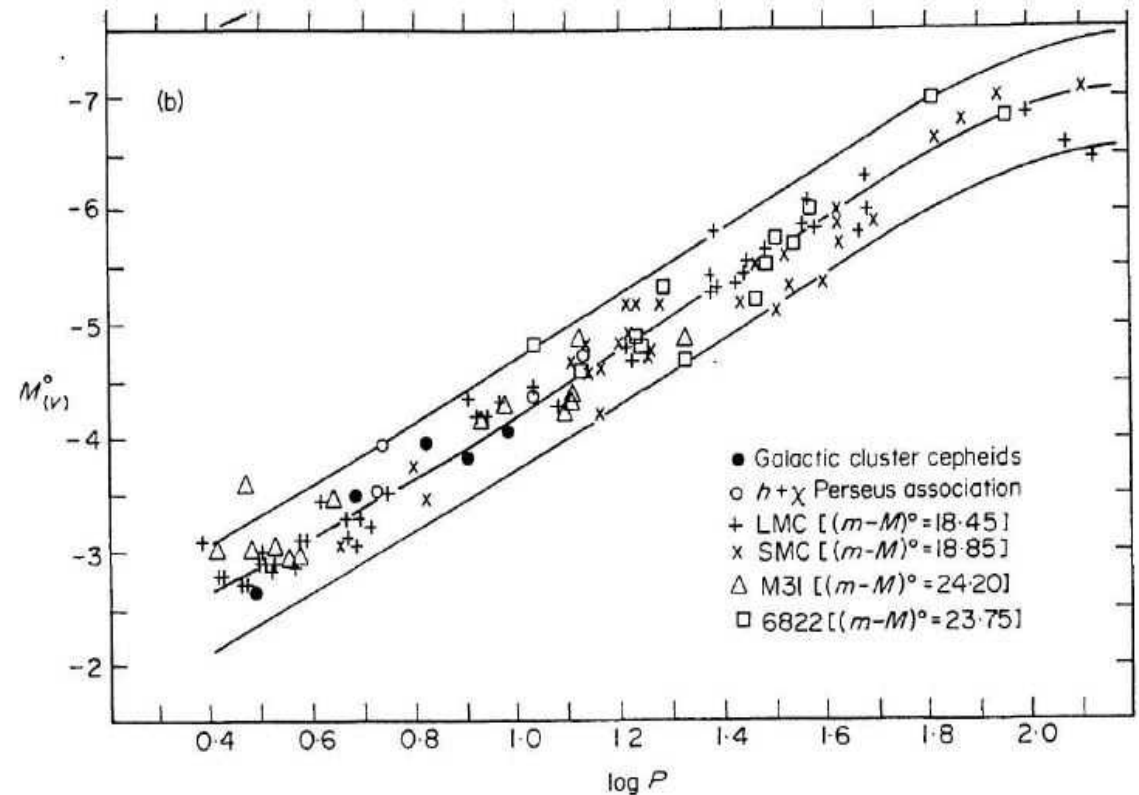
- **1952 : W. Baade effectue une nouvelle calibration de la relation avec les deux natures de Céphéides qui révolutionne la cosmologie**
  - Double la distance de la Galaxie Andromède
  - Nouvelle valeur de la constante de Hubble et de l'âge de l'Univers
- **1997 : La mission Hipparcos mesure la distance de plusieurs Céphéides par parallaxe trigonométrique → nouvelle calibration, couramment retenue de nos jours**

$$M_V = -2.81_{\pm 0.06} \log P - 1.43_{\pm 0.10}$$

- - 2.81 obtenu par 81 Céphéides du Grand Nuage de Magellan
- - 1.43 obtenu par 210 Céphéides de la Galaxie

# Comment améliorer la relation P / L ?

- La précision croissante des mesures ne se traduit pas par une amélioration de la précision de la relation
- La relation P / L est une **relation d'échelle** qui n'a qu'une valeur statistique
- D'autres facteurs interviennent dans la relation
  - Longueur d'onde
  - Mode de vibration
  - Température
  - Métallicité



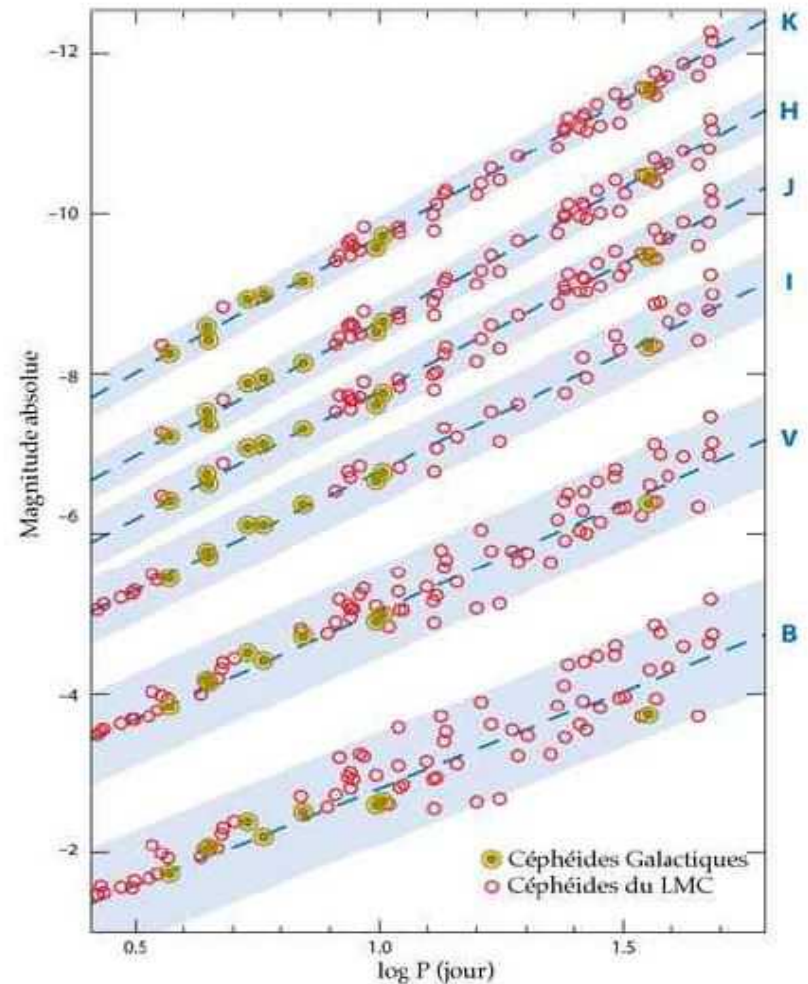
**Courbe P / L tracée à partir de Céphéides situées dans la Galaxie et 4 galaxies externes**

Source : Sandage, 1972

# Influence de la longueur d'onde

- **Lorsque la longueur d'onde croît**
  - La pente augmente
  - L'ordonnée à l'origine diminue
  - L'incertitude sur la formule diminue
- **Les mesures actuelles se font de préférence dans l'infra rouge**
  - Moins de rougissement
  - Relation P / L plus resserrée
- **Exemple de relation dans la bande K**
  - Calibrée à partir de 10 Céphéides de la Galaxie dans l'IR (2 000 à 2 500 nm)
  - Benedict et al. 2007

$$M_K = -3.32_{\pm 0.12} (\log P - 1) - 5.71_{\pm 0.03}$$



Les courbes correspondent à différentes bandes de longueur d'onde et ont été obtenues avec des Céphéides de la Galaxie (cercles pleins) et du Grand Nuage de Magellan (cercles transparents).

# Exemple de relation P / L dans la bande K

$$M_K = -3.32_{\pm 0.12} (\log P - 1) - 5.71_{\pm 0.03}$$

Céphéide	Distance parallaxe pc (1)	Période (jours)	Mag. app. K	Distance P / L en pc (2)	$\frac{(2) - (1)}{(1)}$
I Car	497	35.551	1.071	527	5.9 %
ξ Gem	360	10.151	2.097	368	2.3 %
β Dor	318	9.842	1.944	336	5.5 %
W Sgr (†)	438	7.595	2.796	419	- 4.5 %
X Sgr	333	7.013	2.557	356	6.7 %
Y Sgr	469	5.773	3.582	501	6.7 %
δ Cephei	273	5.366	2.310	266	- 2.7 %
FF Aql (†)	356	4.471	3.465	401	12.6 %
T Vul	526	4.435	4.187	556	5.6 %
RT Aur	416	3.728	3.925	439	5.3 %

## Distances de 10 Céphéides de la Galaxie à partir de mesures du télescope HST

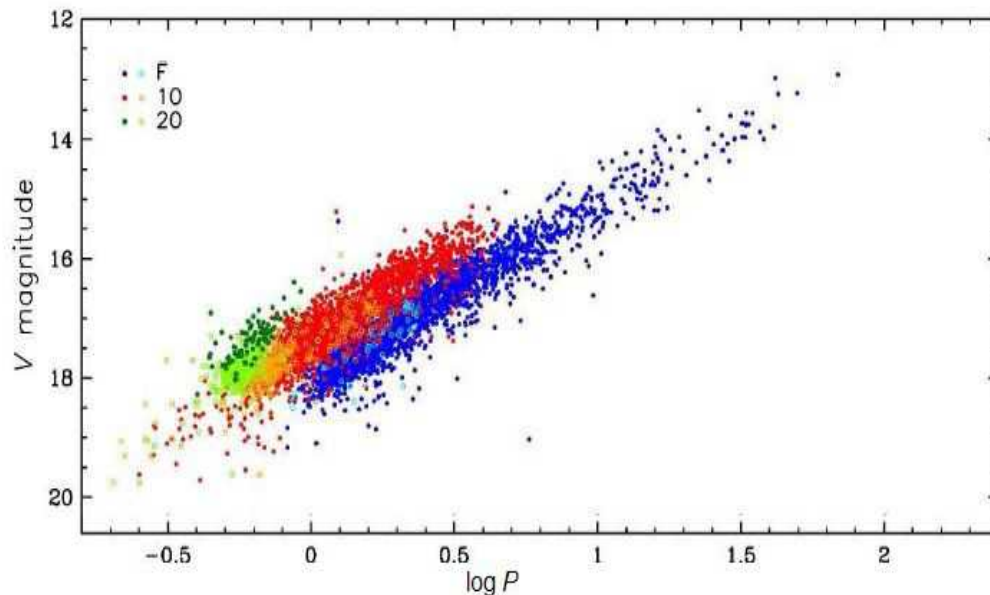
(1) est obtenu par la parallaxe trigonométrique (2) est obtenu par application de la relation P / L indiquée ci-dessus après mesure de la période et de la magnitude apparente K  
 † : présence d'étoiles compagnon pour W Sgr et FF Aql



# Influence du mode de vibration

- **Chaque mode de vibration correspond à une relation P / L**
  - Exemple : relation entre magnitude apparente dans le visible et période pour les Céphéides du Petit Nuage de Magellan

Mode de vibration	Relation P / L
Fondamental (F)	$m_v = -2.898 \log P + 17.984$
1 <sup>ère</sup> harmonique (O1)	$m_v = -3.155 \log P + 17.368$
2 <sup>ème</sup> harmonique (O2)	$m_v = -3.544 \log P + 16.870$



**Courbes P / L (magnitude apparente dans le visible) de Céphéides du Petit Nuage de Magellan en fonction du mode de vibration**

Les cercles pleins en bleu, rouge et vert foncé sont relatifs aux modes F, O1 et O2 des pulsateurs mono-mode.

Source : Soszynski, OGLE



# Influence de la température

- La relation P / L est la projection d'une relation P / L / Température

- Relation Période / Couleur

- Exemple obtenu à partir de 321 Céphéides de la Galaxie

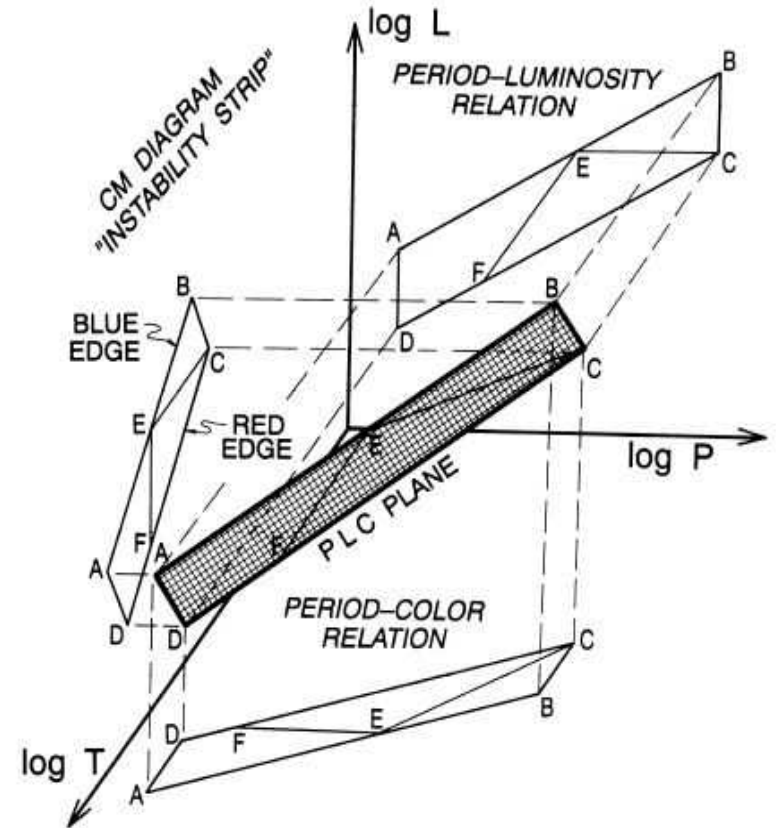
$$(B - V)_0 = 0.366 \log P + 0.361$$

- Variation de la période lorsque la Céphéide traverse la bande d'instabilité (bord bleu vers rouge  $\rightarrow P \uparrow$ )

- Relation P / L / Couleur

- Exemple obtenu à partir de 13 Céphéides de la Galaxie

$$M_V = -3.425 \log P - 2.459 + 2.52 (B - V)$$

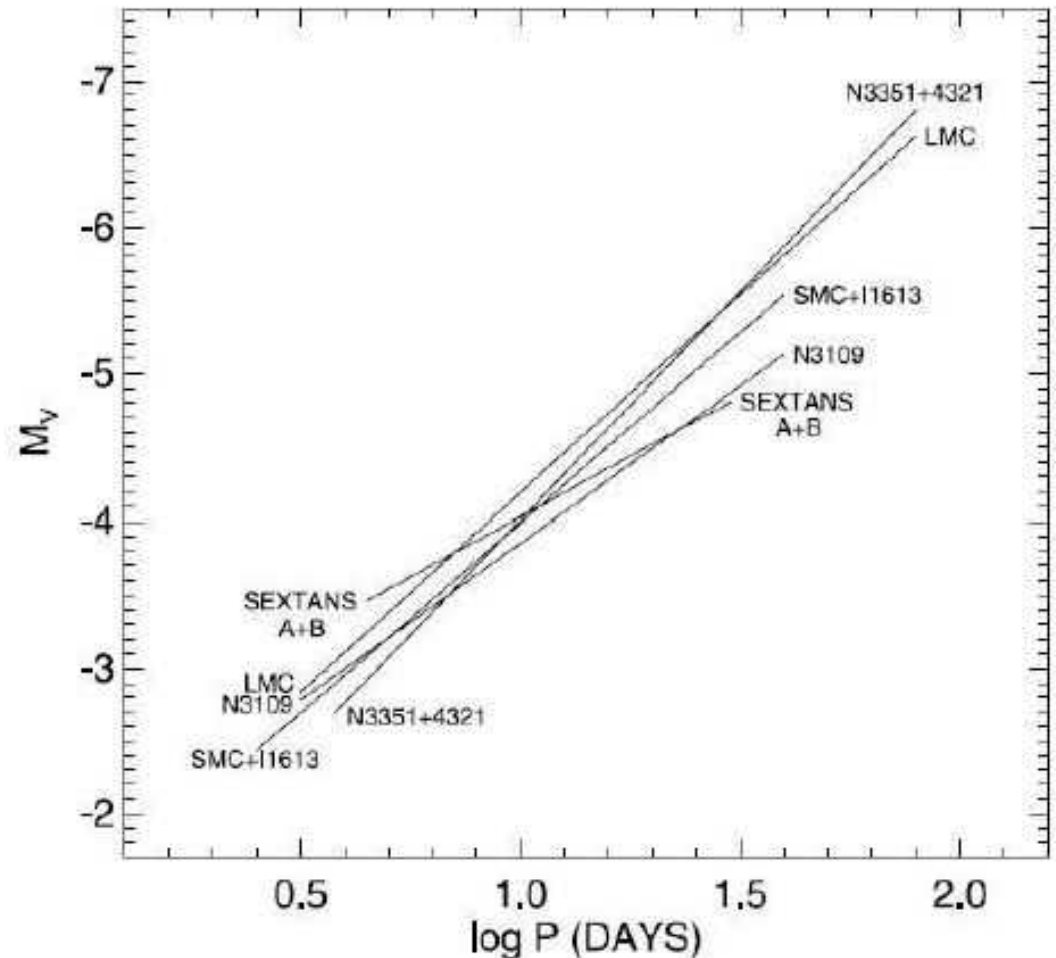


Relation période / luminosité / température

Source : Madore & Freedman, 1991

# Influence de la métallicité

- La métallicité d'une étoile est la proportion d'éléments plus lourds que He dans l'étoile
  - $Z \sim 0.015$  pour le Soleil
- L'impact de la métallicité sur la relation P / L fait actuellement débat
  - Impact mesuré dans le visible
  - Pratiquement pas d'impact dans l'IR mesuré par la mission Spitzer



**Relation P/L dans 10 galaxies ayant des métallicités différentes**

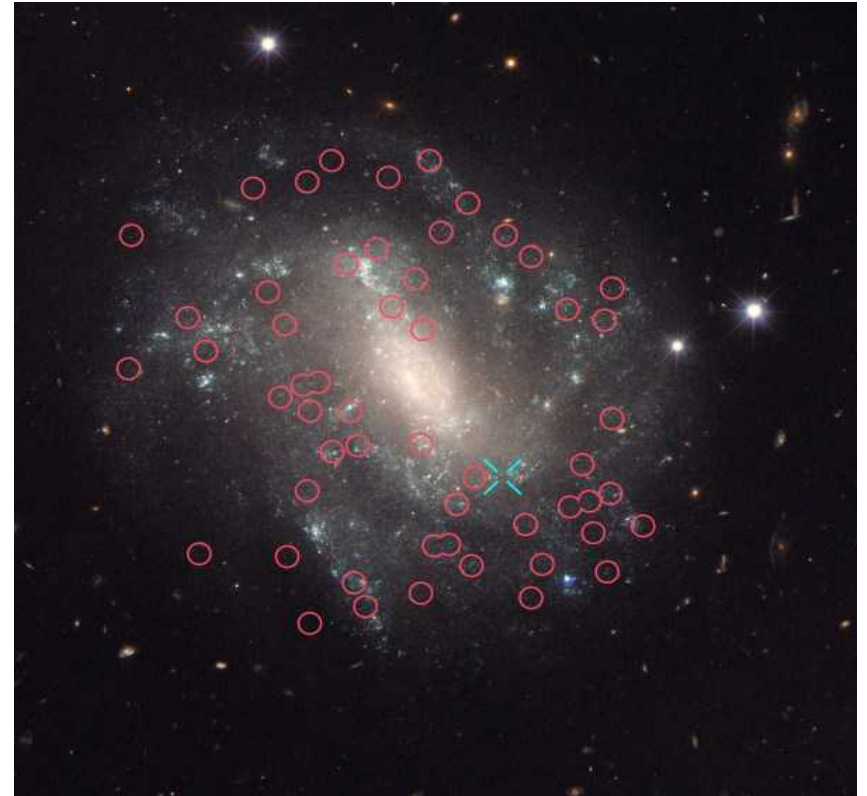
La pente de la droite P / L diminue avec la métallicité (de NGC 3351/4321 à Sextans A/B)

# Situation actuelle de la relation P / L

- **La relation P / L n'a pas son expression définitive**
  - « *The existence of a universal P / L relation of classical Cepheids is an only historically justified illusion* » (A. Sandage, G. A. Tammann, et B. Reindl, 2008, A&A)
  - « *The accuracy of the calibration of the Leavitt law is insufficiently competitive due to systematic uncertainties* » (P. Kervella, 2017, Optical interferometry and Gaia parallaxes for a robust calibration of the Cepheid distance scale)
- **C'est un axe de recherche**
  - Nécessité d'introduire des facteurs de second ordre
  - Importance des missions spatiales comme [HST](#) (1990-2020) ou [Gaia](#) (2013-2019)
- **Elle est cependant un [outil majeur d'évaluation](#) des distances**
  - Les Céphéides sont discernables dans un grand nombre de galaxies proches et sont des « [chandelles standard](#) » entre [1 kpc](#) et [~ 30 Mpc](#)
- **Exemples de distances de galaxies proches mesurées avec des Céphéides détectées par le HST**
  - [NGC 4603](#) : 33 Mpc ~ 108 millions a.l., 43 Céphéides
  - [UGC 9391](#) : 37 Mpc ~ 120 millions a.l., 52 Céphéides

# Céphéides dans la galaxie UGC 9391

- **Supernova type SNIa**
  - Explosion d'une naine blanche lorsque par accrétion de matière elle atteint la limite de  $1.4 M_{\text{Sol}}$
- **La présence de Céphéides et d'une supernova SNIa dans la même galaxie permet d'étalonner l'échelle des distances avec les supernovas**



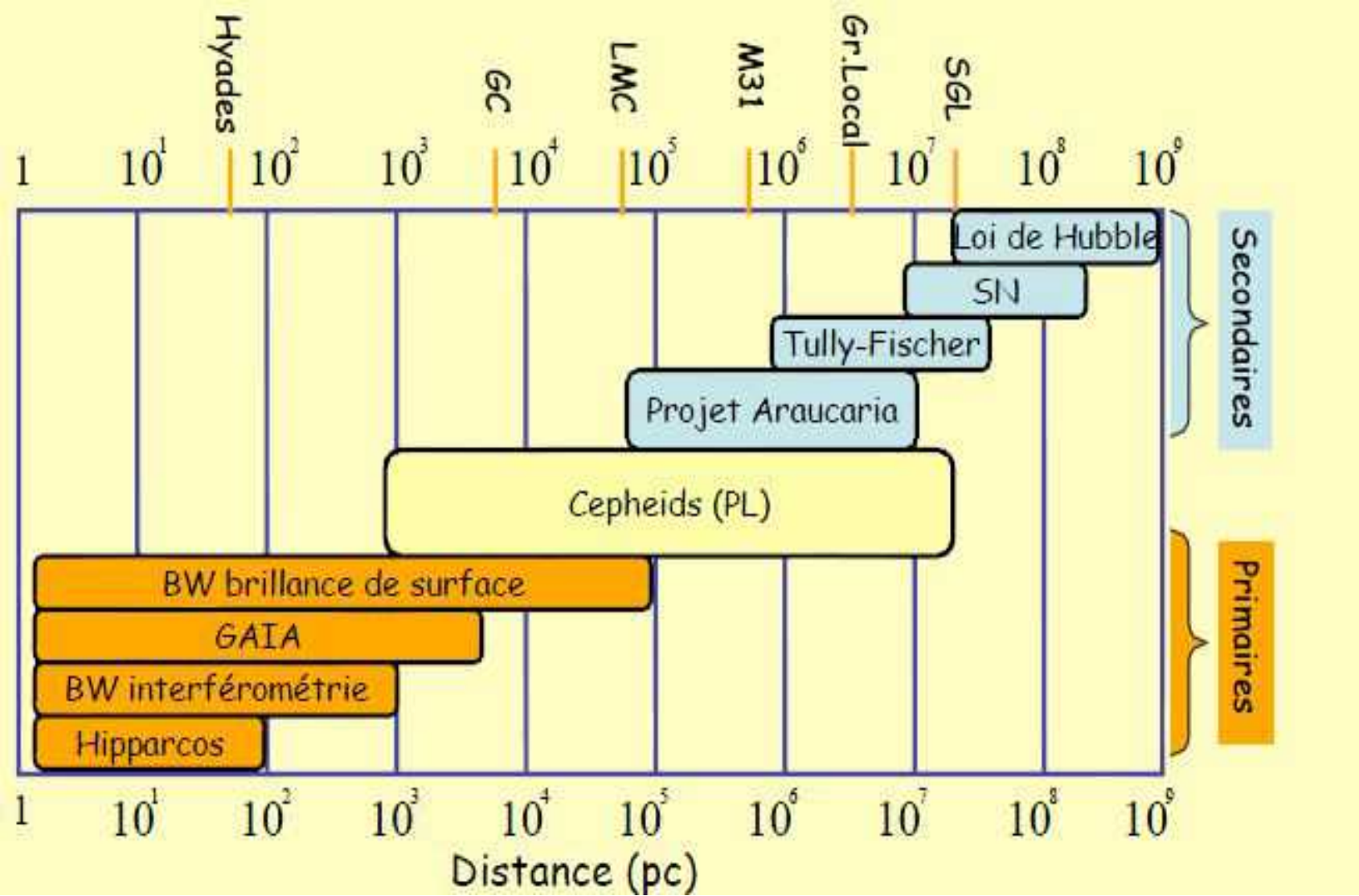
**Image de la galaxie UGC 9391 prise par le Hubble Space Telescope**

Chaque cercle rouge représente une Céphéide  
La croix bleue est la supernova SN 2003du

Distance de la galaxie	36.81 Mpc $\pm$ 0.10
Angle apparent	1.1' x 0.8'
Vitesse d'éloignement	1 939 km/s $\pm$ 75
Mag. app. UGC 9391 (B)	14.9
Mag. app. maxi. 2003du (B)	13.5

Source : Astronomy Picture Of the Day

# Les Céphéides et la mesure des distances



Source : Nicolas Nardetto, Collège de France 2009

# Plan

- **La luminosité et l'éclat des étoiles**
- **Les Céphéides**
- **La saga de la relation période / luminosité**
- **La méthode Baade-Wesselink de mesure des distances**
  - **Méthode la parallaxe de pulsation**
  - **Méthode de la brillance de surface**

# La méthode de Baade-Wesselink

- **La relation  $P / L$  permet d'évaluer la distance d'une Céphéide en mesurant sa période et sa magnitude apparente**
- **La méthode B-W est une méthode alternative**
  - Imaginée par W. Baade (1926) et expérimentée la première fois par A. Wesselink (1946)
- **Principe**
  - Déterminer la distance à partir des **variations de rayon et de magnitude** au cours d'un cycle de pulsation, sans utiliser la période
  - Nombreuses variantes possibles, applicables à toute étoile pulsant dans un mode radial
- **Deux variantes récentes**
  - Méthode de la **parallaxe de la pulsation**
  - Méthode de la **brillance de surface**

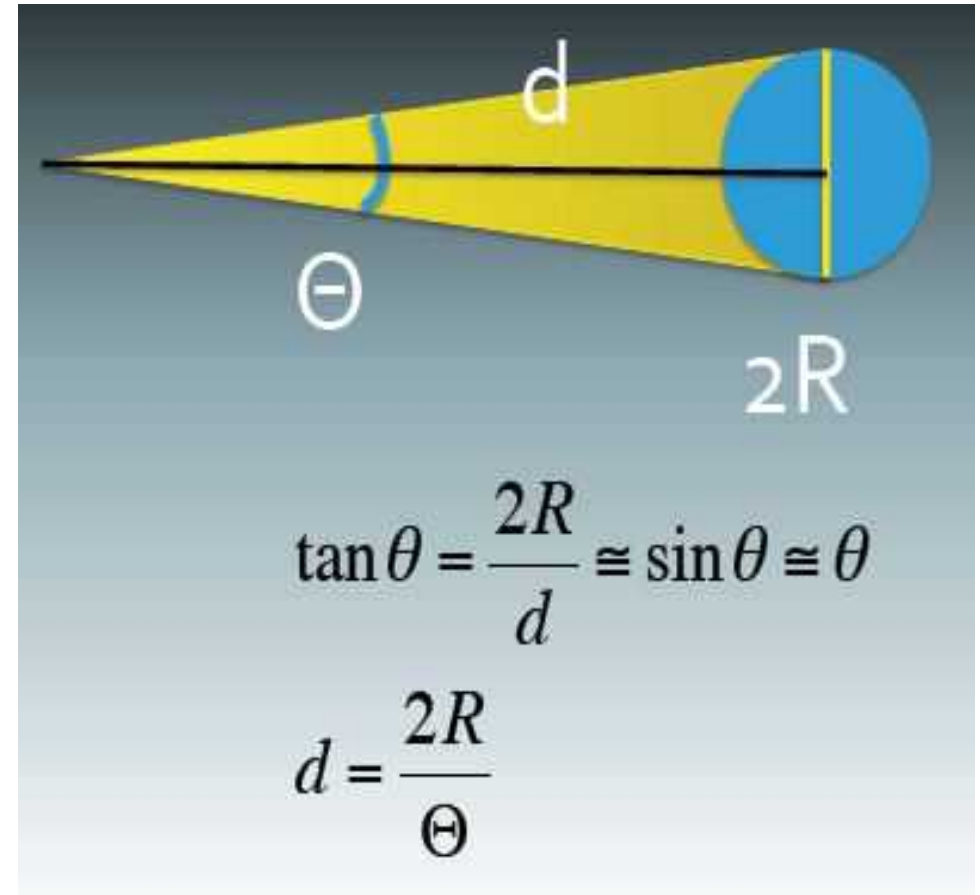
# Méthode de la parallaxe de la pulsation

- **Principe**

- Mesurer la variation de rayon  $\Delta R$  et la variation angulaire  $\Delta \theta$  de la Céphéide au cours d'une pulsation

- **Distance de la Céphéide à l'observateur**

$$d = 2 \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \theta}$$





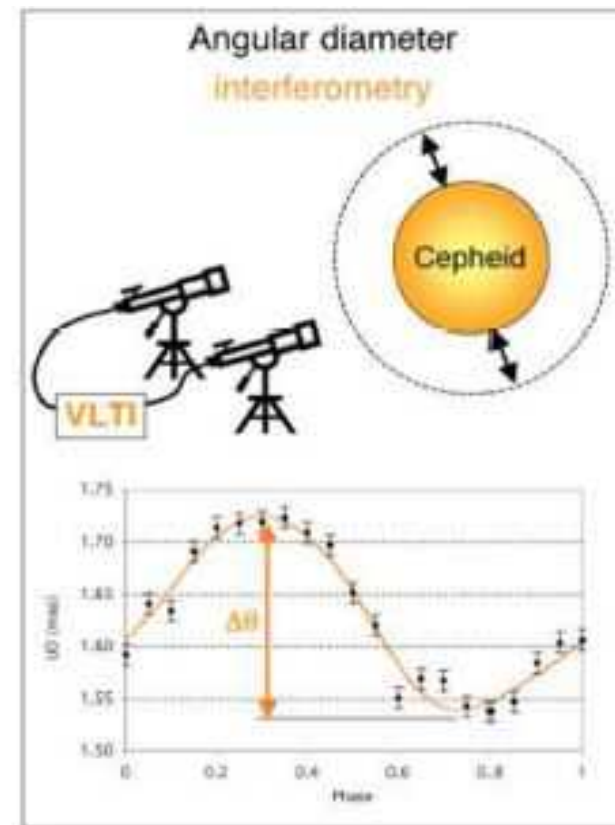
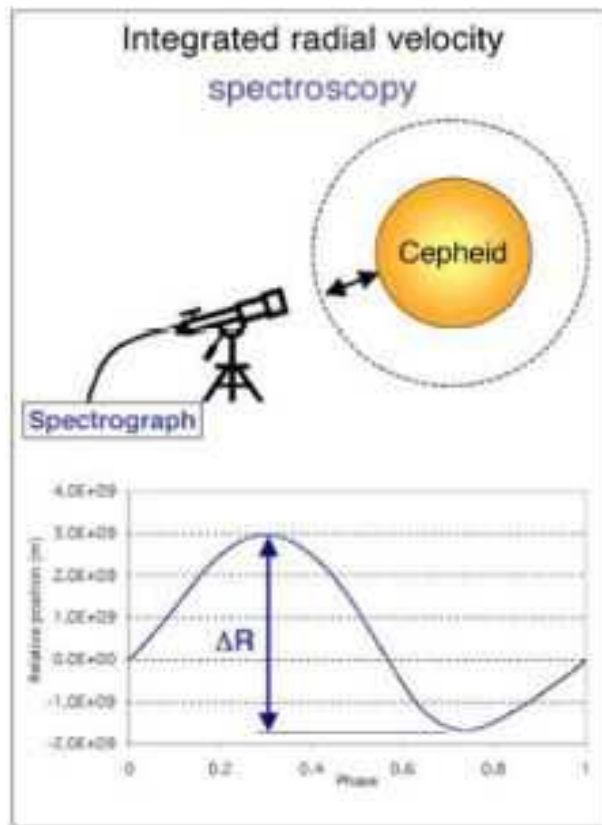
# Méthode de la parallaxe de la pulsation

- **Mesure de  $\Delta R$**

- Mesure de la vitesse par **spectroscopie**
- Calcul des rayons par intégration des vitesses

- **Mesure de  $\Delta\theta$**

- Mesure directe impossible avec les télescopes optiques habituels
- Nécessite la technique de l'**interférométrie à longue base**



$$d \text{ [pc]} = 9.305 \Delta R \text{ [R}_{\odot}] / \Delta\theta \text{ [mas]}$$

Source : Kervella et al. (2004)

# Mesure de la vitesse d'une source de lumière par spectroscopie

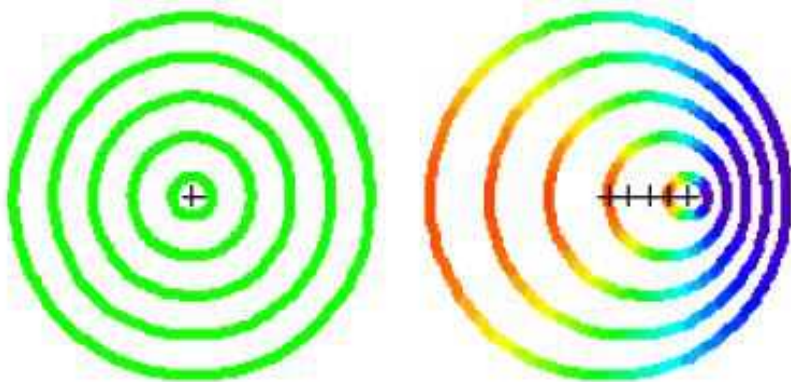
## • Effet Doppler

- La longueur d'onde reçue  $\lambda_{\text{reçu}}$  dépend de la longueur d'onde émise  $\lambda_{\text{émis}}$ , de la vitesse  $v$  de la source par rapport à l'observateur et de la vitesse  $c$  de la lumière dans le vide

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{reçu}} - \lambda_{\text{émis}}}{\lambda_{\text{émis}}} = \frac{v}{c}$$

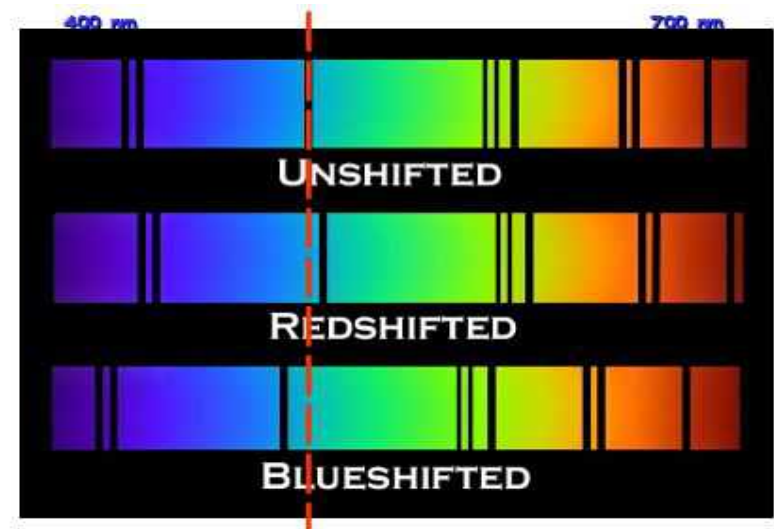
- Source qui s'éloigne de l'observateur (se rapproche) → décalage vers le rouge (bleu)

## • La mesure de $z$ permet de calculer la vitesse de la source



**Effet Doppler**

A gauche : source fixe monochromatique  
A droite : source mobile p/r à l'observateur



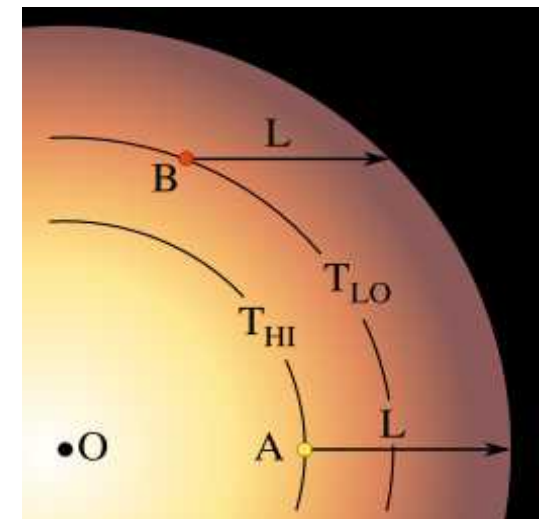
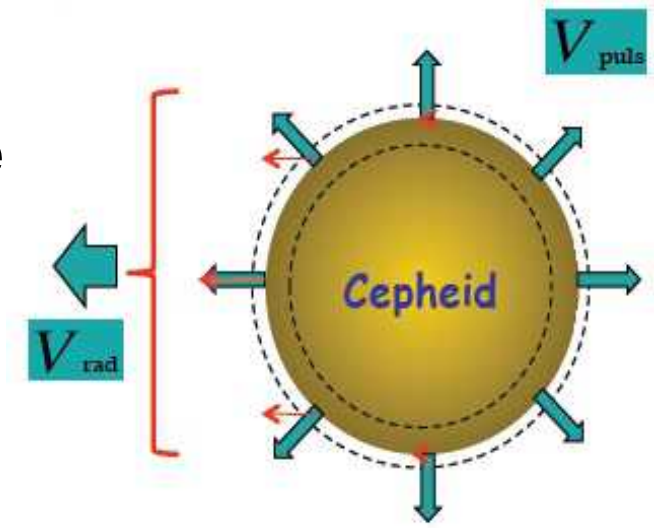
**Déplacement des raies d'un spectre**

# Mesure de l'amplitude de rayon

- La vitesse radiale  $V_{\text{rad}}$  mesurée par spectroscopie est plus petite que la vitesse de pulsation  $V_{\text{puls}}$  de l'étoile

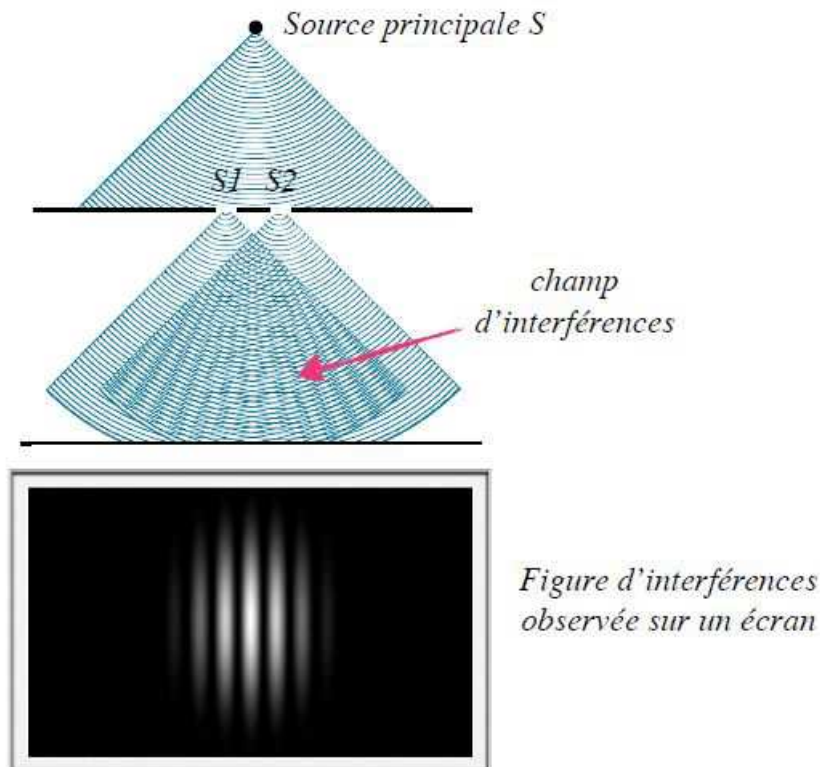
$$p = \frac{V_{\text{puls}}}{V_{\text{rad}}} > 1$$

- Deux facteurs interviennent dans le **coefficient de projection  $p$** 
  - Sphéricité de l'étoile
  - Assombrissement des bords
- Estimation de  $p$  entre 1.2 et 1.4



# Mesure des diamètres par interférométrie

- Observation avec **2 télescopes** distants d'une distance **B**
  - Création d'interférences par superposition des flux lumineux reçus par les 2 télescopes
  - La **résolution est identique à celle d'un télescope de diamètre B**
  - Les trajets doivent être de même longueur → nécessité de ligne à retard



Principe de l'expérience de Young

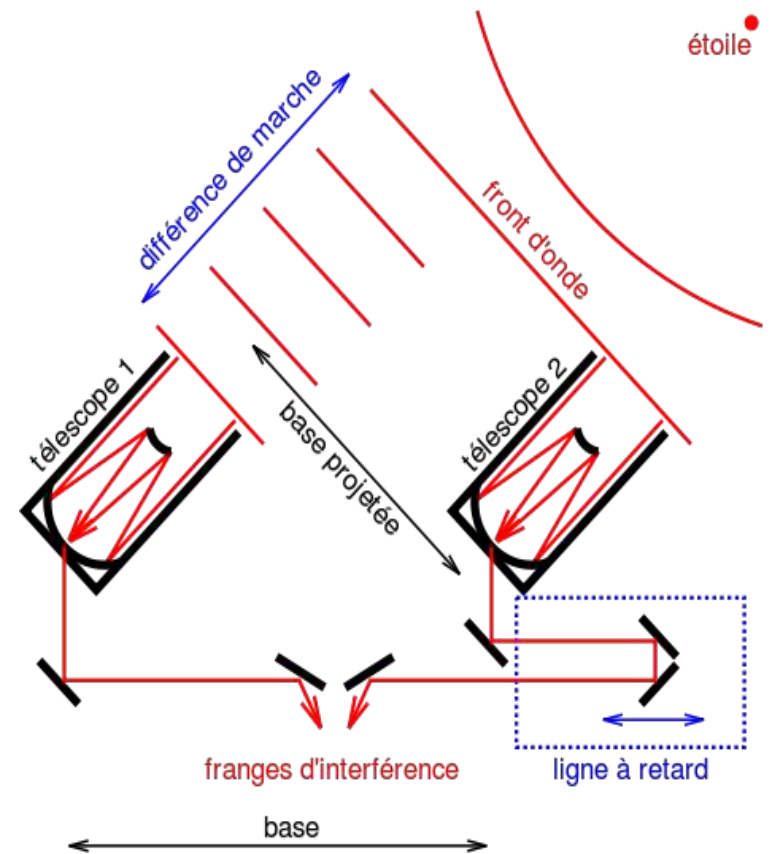
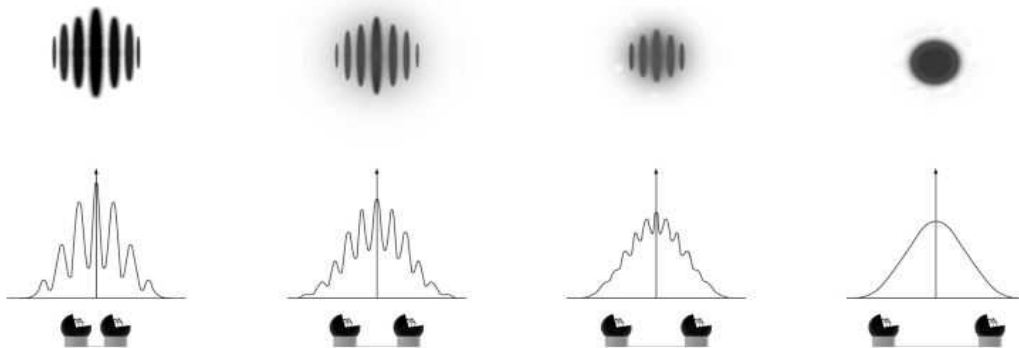


Schéma d'un interféromètre à longue base

# Mesure des diamètres par interférométrie

- **En augmentant B, la visibilité des franges diminue**
  - L'étoile est résolue lorsque les franges disparaissent
- **Exemple du VLTi de l'ESO (Paranal)**
  - $B \sim 200$  m  $\rightarrow$  précision suffisante pour mesurer le diamètre angulaire des Céphéides proches ( $\sim$  quelques mas) et leurs variations

$$\theta = 0.20 \cdot \frac{\lambda}{B}$$



## Observatoire du Paranal (Chili) de l'ESO

4 télescopes principaux de 8 m et 4 télescopes auxiliaires de 1.8 m utilisés pour l'interférométrie

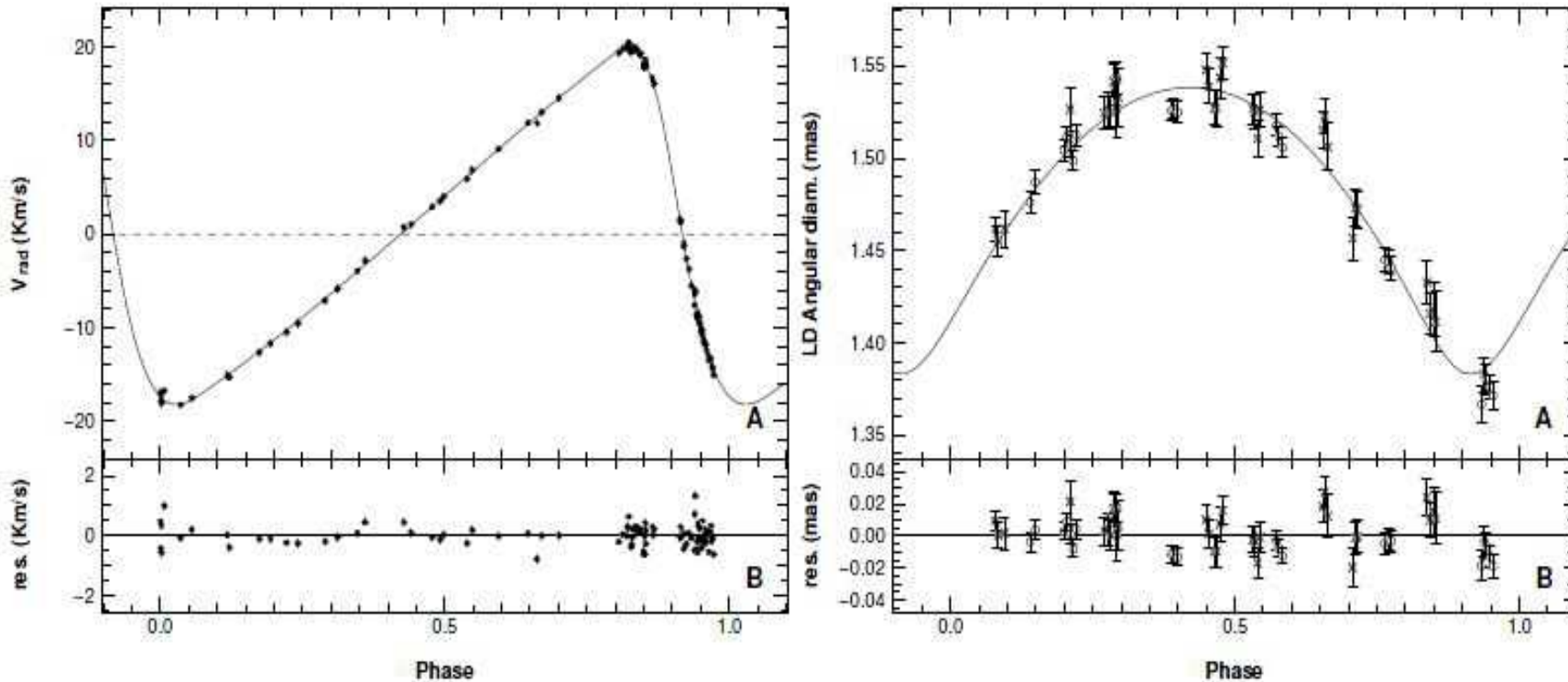
Source : Ciel et Espace, JL Dauvergne / G Hudepohl

## Résolution progressive d'une étoile lorsque la longueur de la base augmente

A droite, l'étoile est complètement résolue, les franges ne sont plus visibles



# Mesures de $\Delta R$ et de $\Delta\theta$ pour $\delta$ Cephei



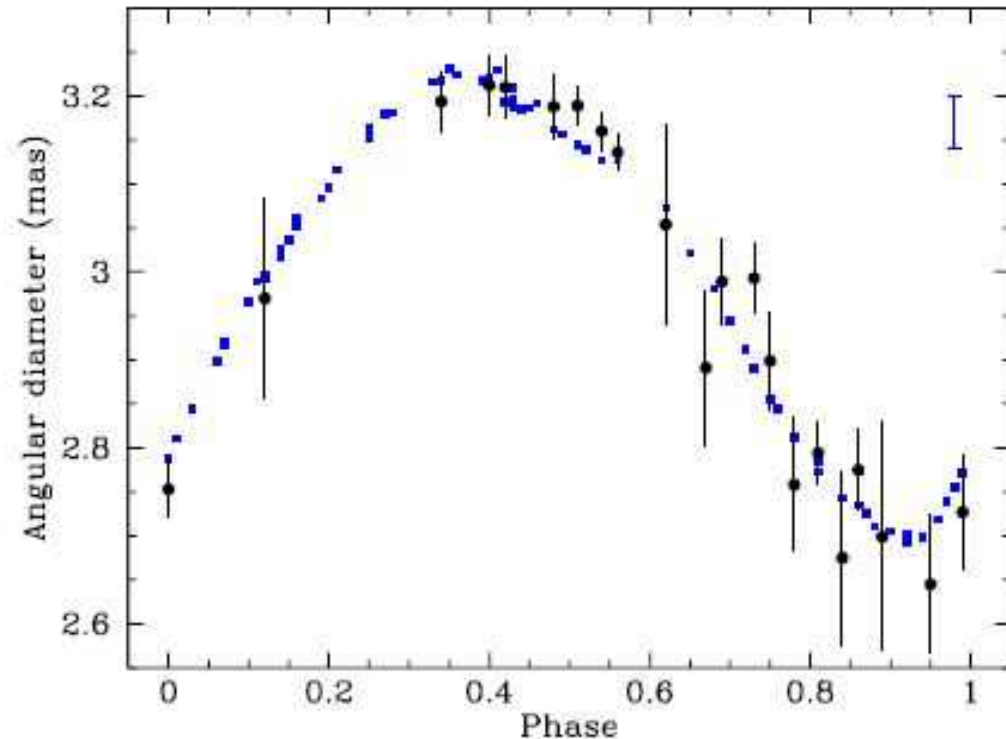
A gauche : courbe de vitesse radiale (Bersier et al. 1994)

A droite : courbe de diamètre angulaire mesurée sur l'interféromètre Chara (USA) avec des bases de 250 et 313 m

# Méthode de la brillance de surface

- **Méthode voisine de la parallaxe de pulsation**
  - Même mesure de la variation de rayon  $\Delta R$  (spectroscopie)
  - Mesure indirecte de la variation angulaire  $\Delta\theta$  par **photométrie**
- **Mesure de la variation angulaire**
  - Mesure des variations de magnitude corrigées de l'extinction dans le visible (V) et l'IR (K)
  - Une fois calibrée, la relation entre magnitudes V et K et angle  $\theta$  permet de calculer la variation angulaire

$$\Delta \log \theta = -0.2672 \cdot \Delta (V - K)_0 - 0.2 \Delta V_0$$



**Diamètres angulaires de I Carinae**

En bleu : mesure par la brillance de surface  
En noir, mesure par parallaxe de phase  
L'accord est  $\sim 1\%$

Source : Kervella et al. 2004

# Limitations de la méthode B-W

- **Coefficient de projection p**

- La principale source d'incertitude de la méthode B-W
- Relation possible avec la période ?

$$p = -0.08_{\pm 0.05} \log P + 1.31_{\pm 0.06}$$

- **Certaines Céphéides (toutes ?) sont entourées d'une enveloppe circumstellaire**

- Biais sur les mesures du diamètre et de l'émission photosphérique en bande K de l'étoile

- **Absorption et rougissement**

- Pour la méthode de brillance de surface, nécessité de dérougir les magnitudes

- **Binarité possible des Céphéides (étoiles spectroscopiques)**

- Biais sur la mesure photométrique ou la vitesse radiale



# Quelques résultats récents de la méthode B-W

Céphéide	Distance HST (1)	Parallaxe de pulsation (2)	Brillance de surface (3)	$\frac{(2) - (1)}{(1)}$	$\frac{(3) - (1)}{(1)}$
I Car	497	525	518	5.6 %	4.1 %
ξ Gem	360	344	385	- 4.4 %	7.0 %
β Dor	318	328	327	3.0 %	2.7 %
W Sgr (†)	438	362	217	- 17.4 %	- 50.5 %
X Sgr	333		322		- 3.4 %
Y Sgr	469	587	436	25.0 %	- 7.1 %
δ Cephei	273	284	267	3.9 %	- 2.2 %
FF Aql (†)	356		370		4.0 %
T Vul	526		542		3.0 %
RT Aur	416		389		- 6.6 %

## Distances (parsecs) de plusieurs Céphéides mesurées par 3 méthodes différentes

1) méthode de la parallaxe trigonométrique par le télescope HST, 2) méthode de la parallaxe de pulsation  
3) méthode de brillance de surface

† : FF Aql et W Sgr sont des binaires spectroscopiques → la méthode B-W peut être biaisée

Sources : (1) Benedict 2007 - (2) Barnes 2012 - (3) Storm 2011

# Conclusion

- **Les Céphéides sont des « chandelles standard » sur une importante échelle de distance**
  - La relation  $P / L$  découverte par [Henrietta Leavitt](#) joue un rôle majeur en cosmologie pour la détermination de la constante de Hubble
- **La dynamique des Céphéides est complexe et l'interprétation d'un grand nombre d'observations récentes fait actuellement objet de débat**
  - Exemples : influence de la métallicité, nuage circumstellaire, perte de masse, variations d'amplitude et de périodicité
  - La formulation de la relation  $P / L$  évolue
- **Les Céphéides contribuent largement à l'amélioration des modèles stellaires**



**Merci de votre attention**