

Les étoiles pulsantes et les binaires à éclipses comme indicateurs de distances dans l'univers



Soutenance HDR, Le 20 dec. 2017, Nice
X. Delfosse - rapporteur & président
P. Fouqué - rapporteur
A. Lèbre - rapporteur
Y. Lebreton - examinatrice
K. Perraut - examinatrice
E. Poretti - examinateur

Nicolas Nardetto



From a window in Treasurer's House near this
tablet, the young deaf and dumb astronomer

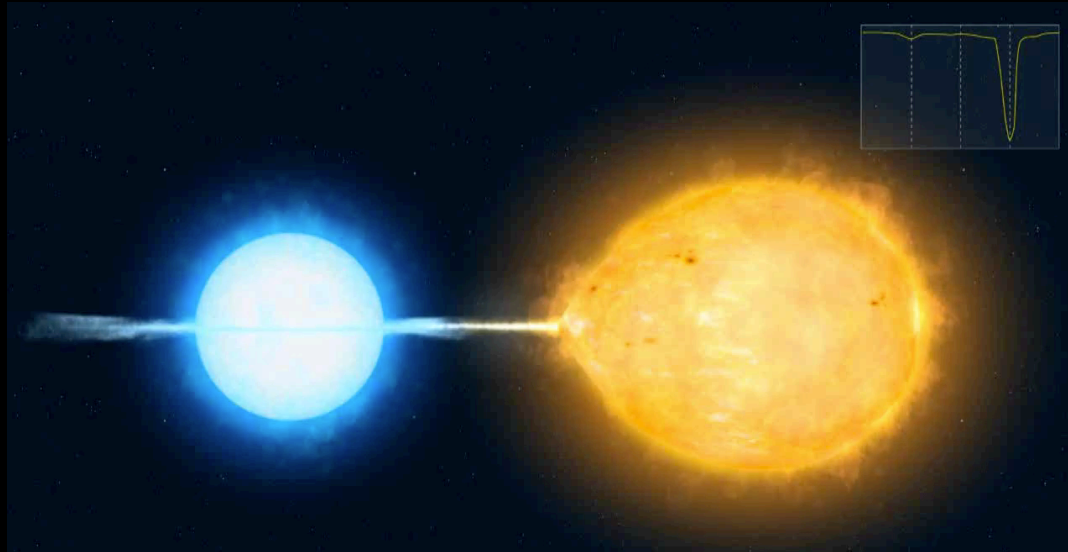
JOHN GOODRICKE

1764 - 1786

who was elected a Fellow of the Royal Society
at the age of 21, observed the periodicity of
the star ALGOL and discovered the variation
of δ CEPHEI and other stars thus laying the
foundation of modern measurement of the Universe.

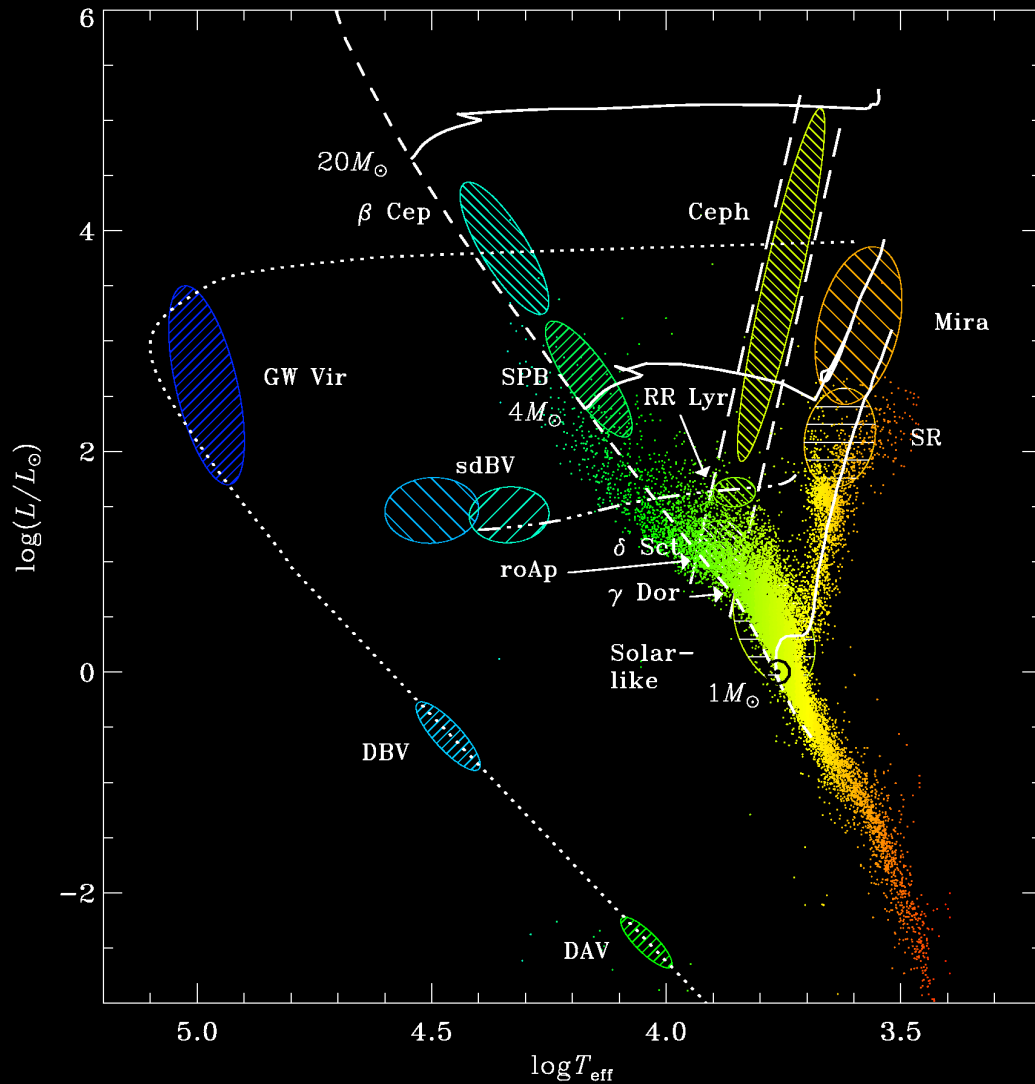


Le concept de binaire à éclipse (Algol)
est découvert par John Goodrick

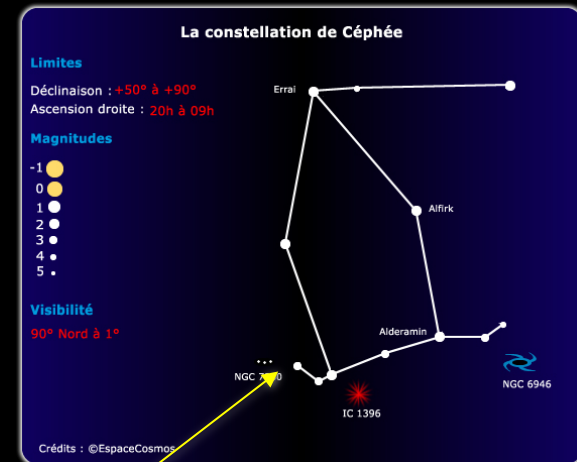


John Goodrick (1764-1786)

Découverte de la première Céphéide δ Cephei



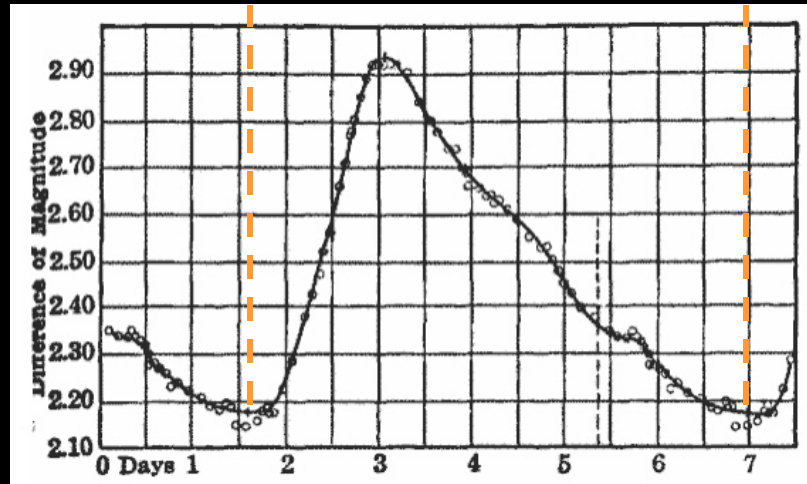
John Goodrick (1764-1786)



1912: Découverte de la relation période-luminosité (PL) des Céphéides

periode

25 Céphéides
dans le petit
nuage de
Magellan (SMC)



magnitude

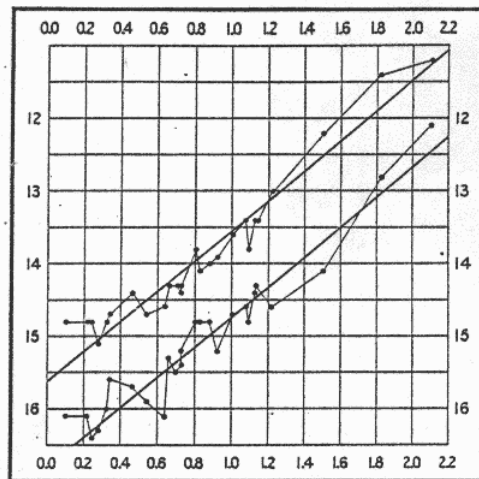


FIG. 2.

Log P (jours)

Leavitt & Pickering (1912)

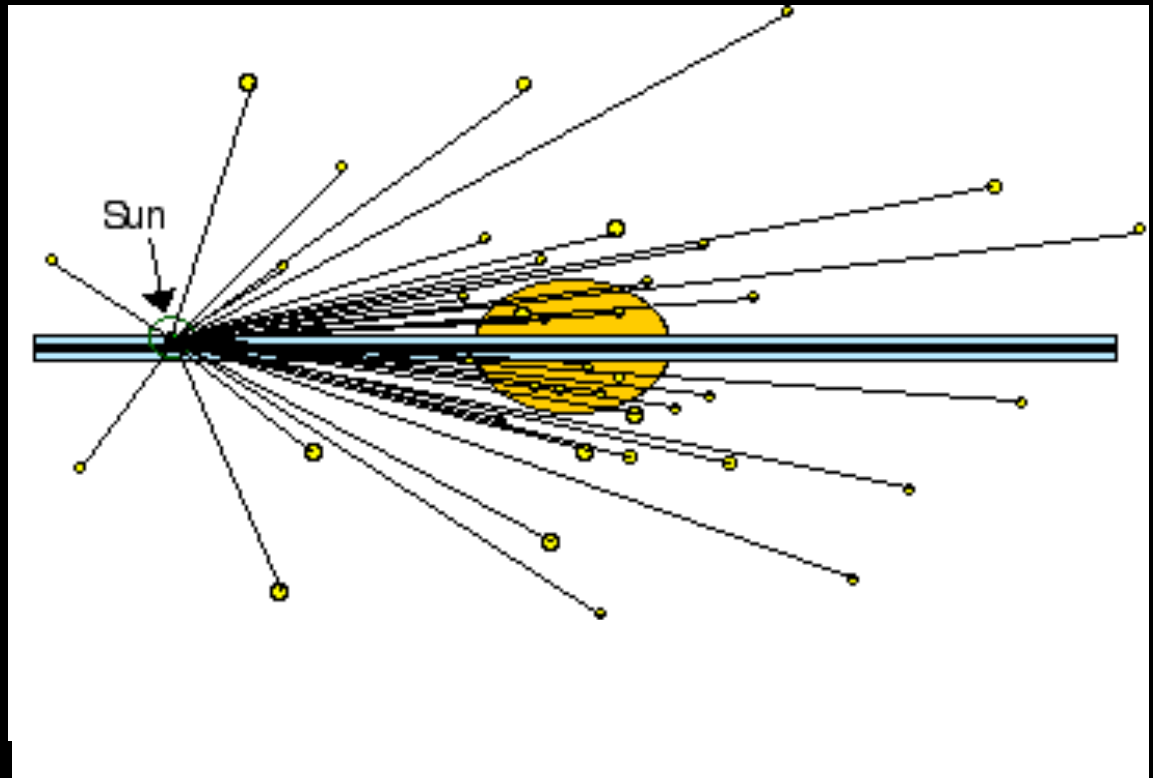


H. Leavitt (1868-1921)

En 1917, Shapley utilise les Céphéïdes de type 2 (W Virginis) pour déterminer la distance de 93 amas globulaires ...



Shapley (1885-1972)



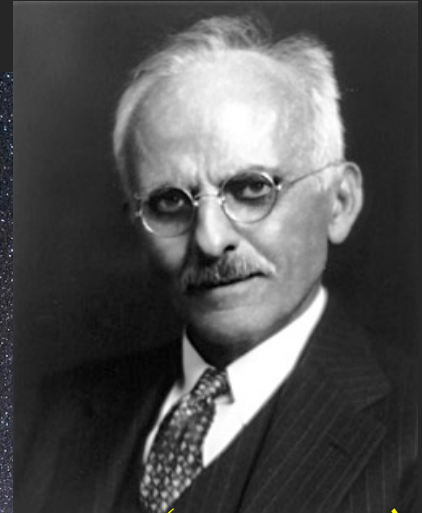
... et montre que le système solaire
« n'est pas au centre de l'univers » !

En 1920, Le débat Shapley-Curtis

Shapley, soutient que les « nébuleuses spirales » sont petites et proches
Curtis, était partisan de la théorie de Kant des « univers-îles » (1755)



Shapley (1885-1972)



Curtis (1872-1942)

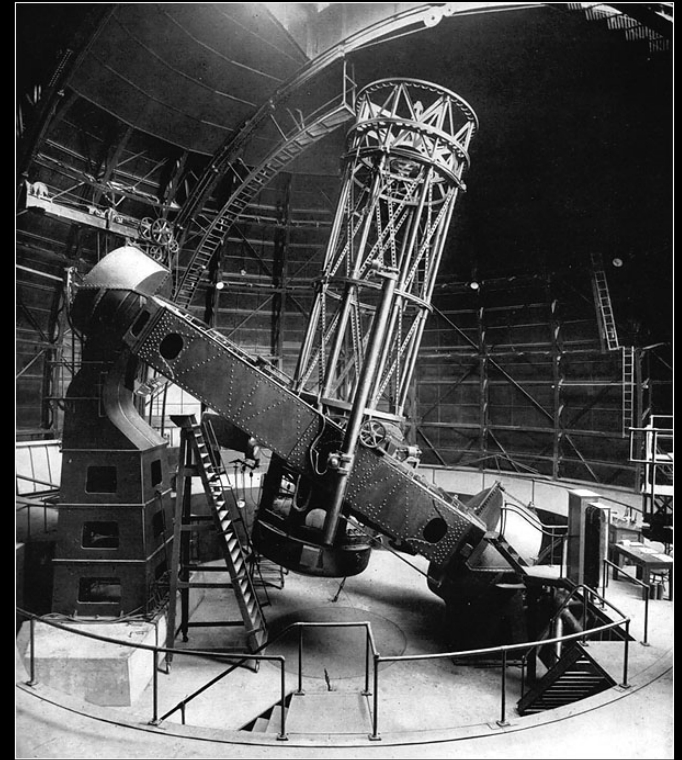


© ESO/J. Colosimo

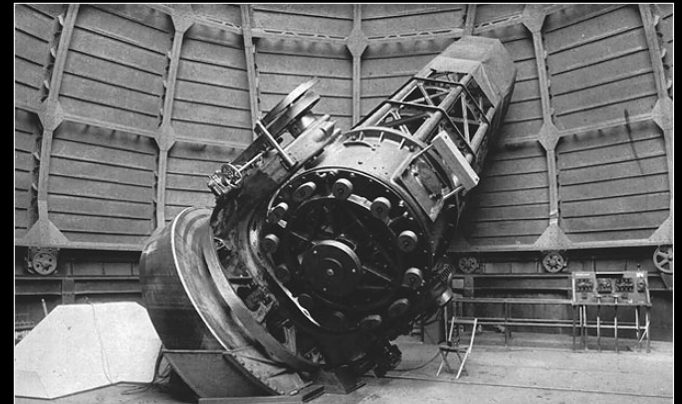
En 1923, Hubble observe les Céphéïdes dans la galaxie d'Andromède M31...



E. Hubble (1889 - 1953)

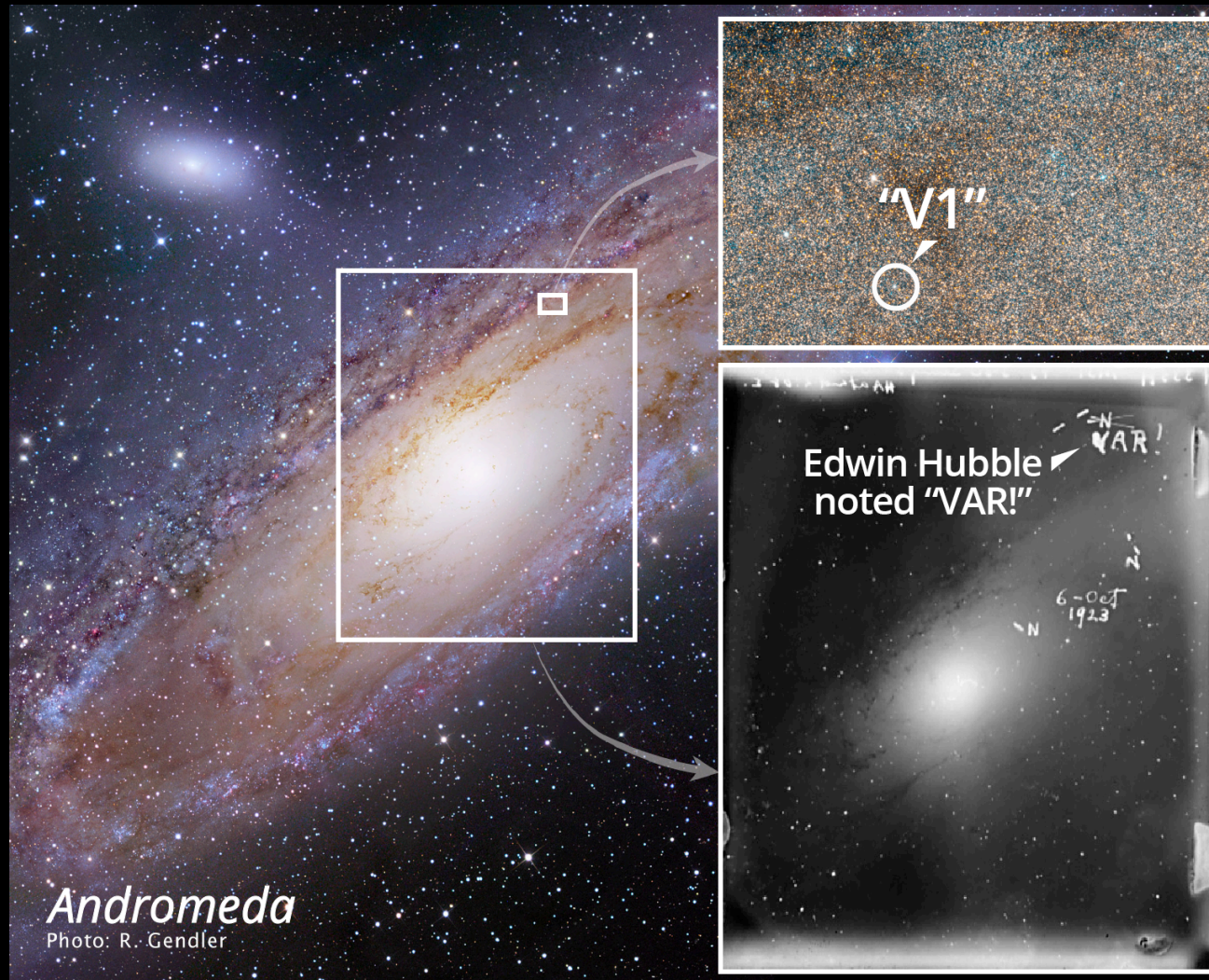


Le télescope Hooker de 2m56 de l'Observatoire du Mont Wilson.



Le télescope équatorial de 1m52 de l'Observatoire du Mont Wilson.

... et trouve 275kpc pour sa distance (au lieu de 752+/-27 Riess+12)
Il observe les Céphéïdes de type I et utilise la relation de Shapley
(valable pour les W Virginis).

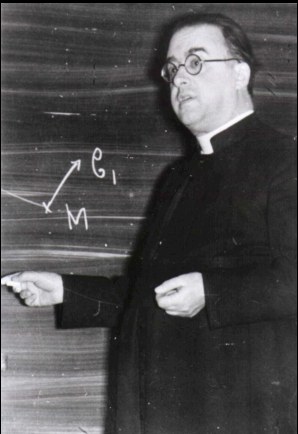


Les univers-îles existent !

1929: L'univers est en expansion !



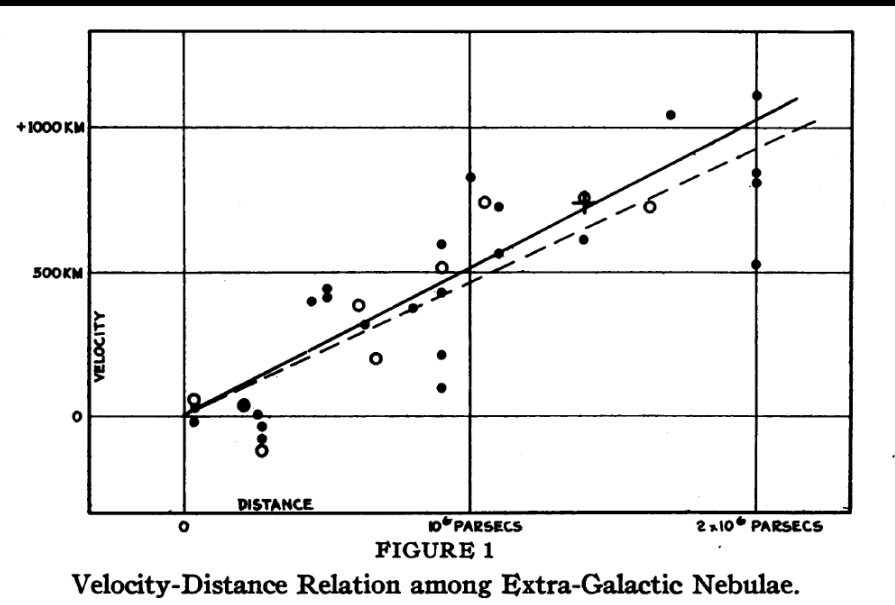
- Slipher en 1914: décalage des galaxies vers le rouge



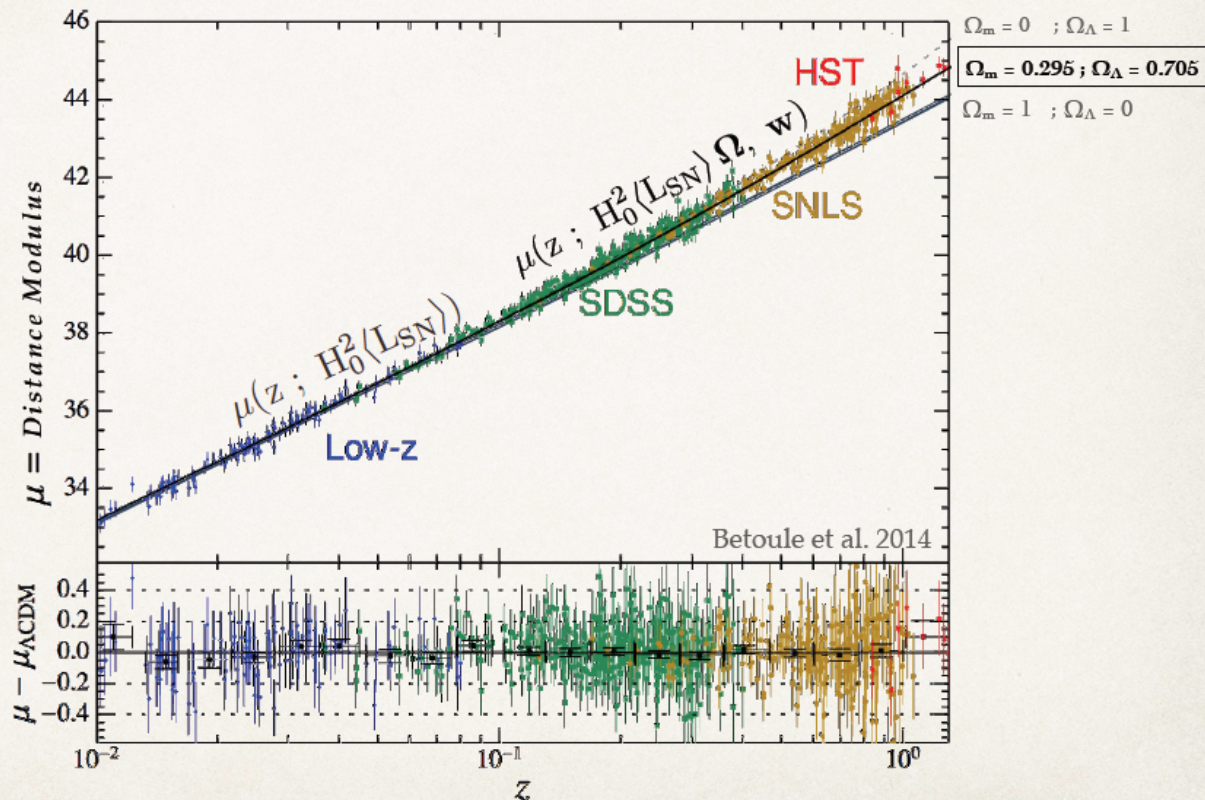
- Lemaître en 1927 découvre la loi d'expansion de l'univers mais publiée en Français...



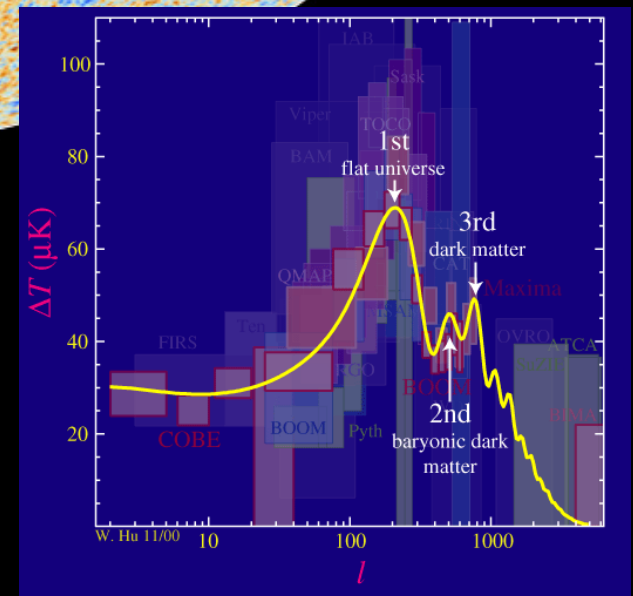
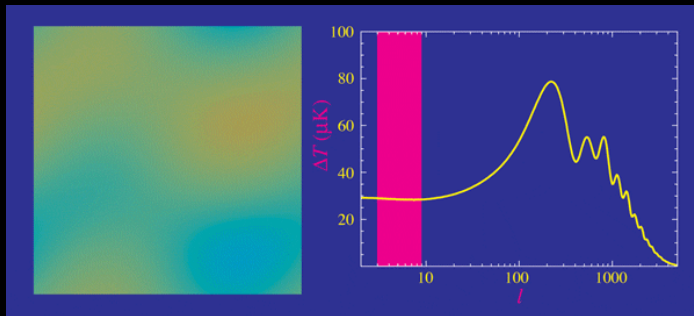
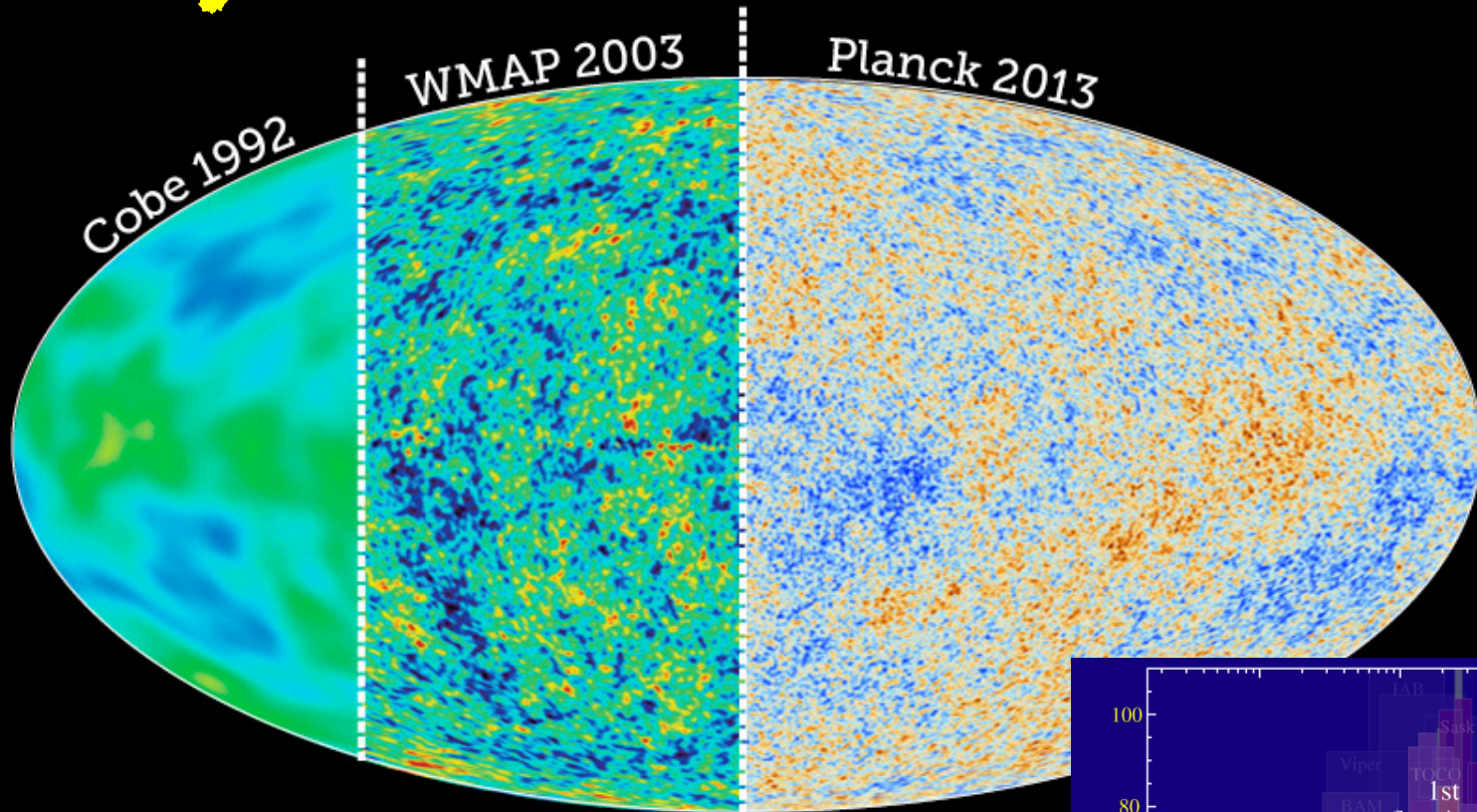
- Hubble en 1929 (re-)découvre la fameuse loi



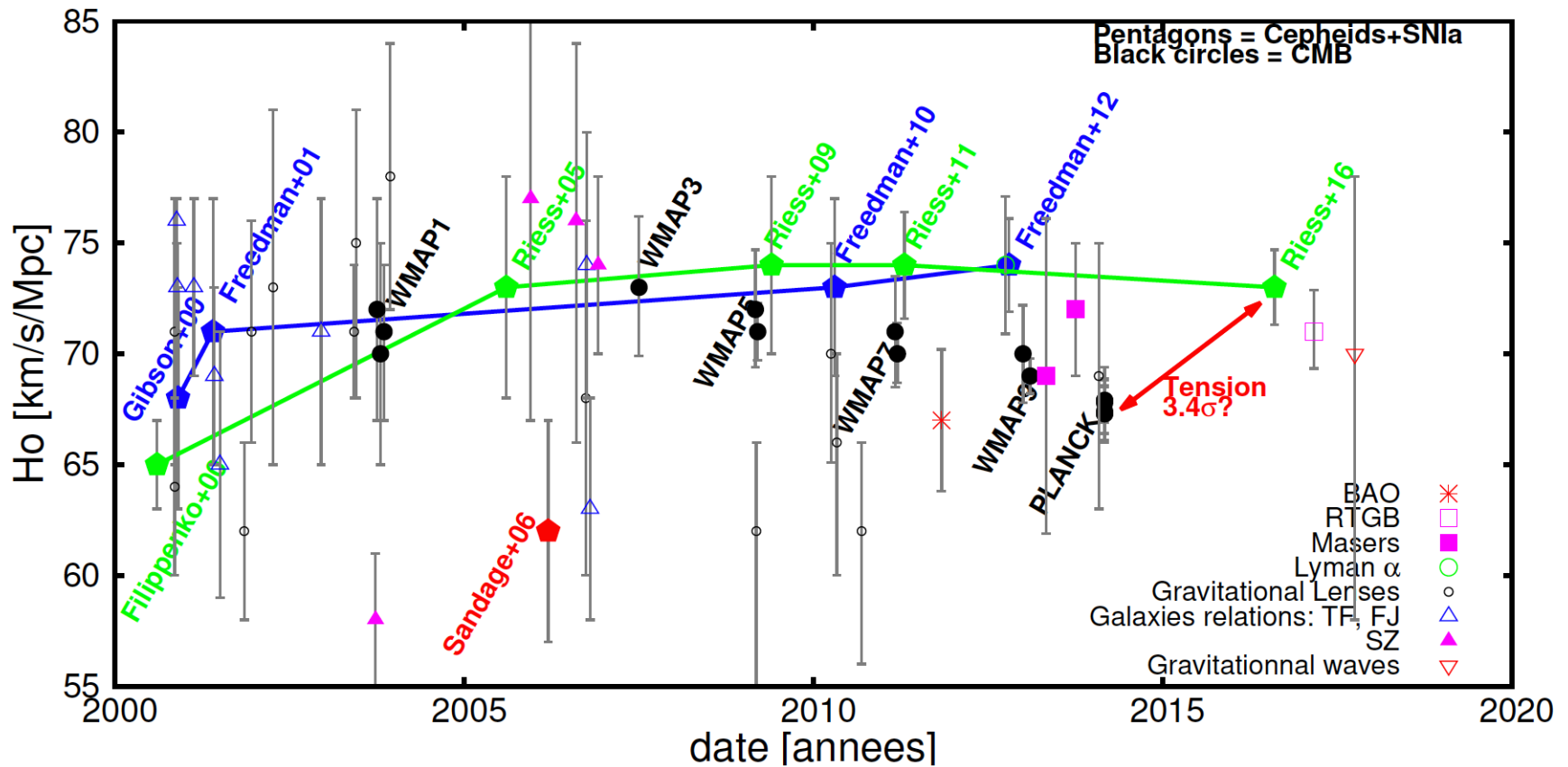
1998: L'univers est en expansion accélérée!



Le rayonnement de fond cosmologique



Mesure de la constante de Hubble

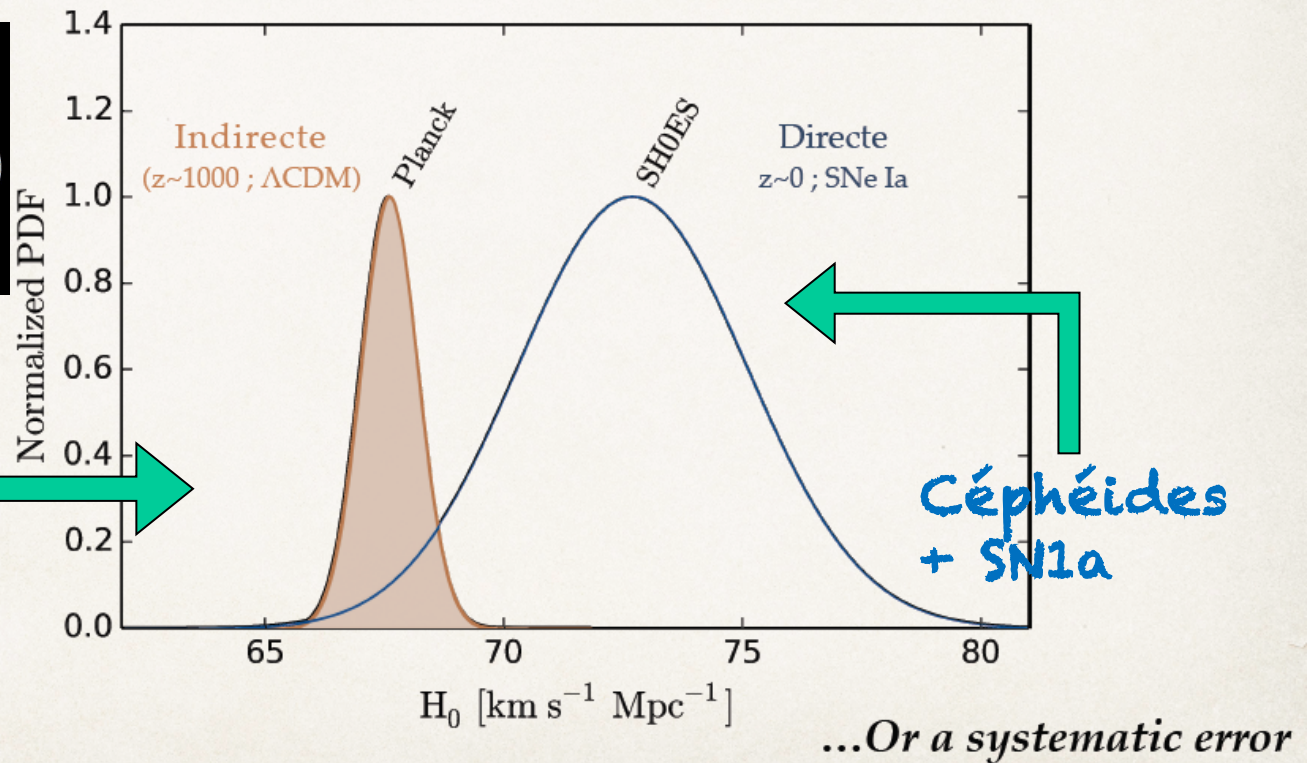
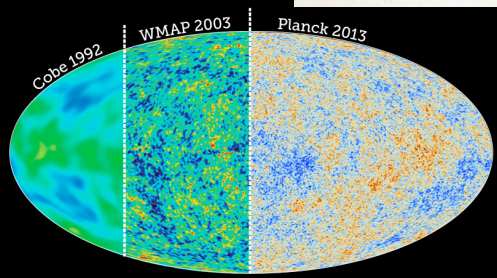


« Accurate astrophysics. Correct cosmology. »
13-16 Juillet 2015, Londres

Tension in the Λ CDM model

~~$\sim 2.5\sigma$
 $\sim 3.6\sigma$~~

Could it be an indication for a new (massless) particle ?



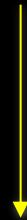
Transparent M. Rigault

Trois possibilités !

CMB



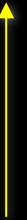
BAO



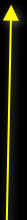
Ho



Ho



SN1a



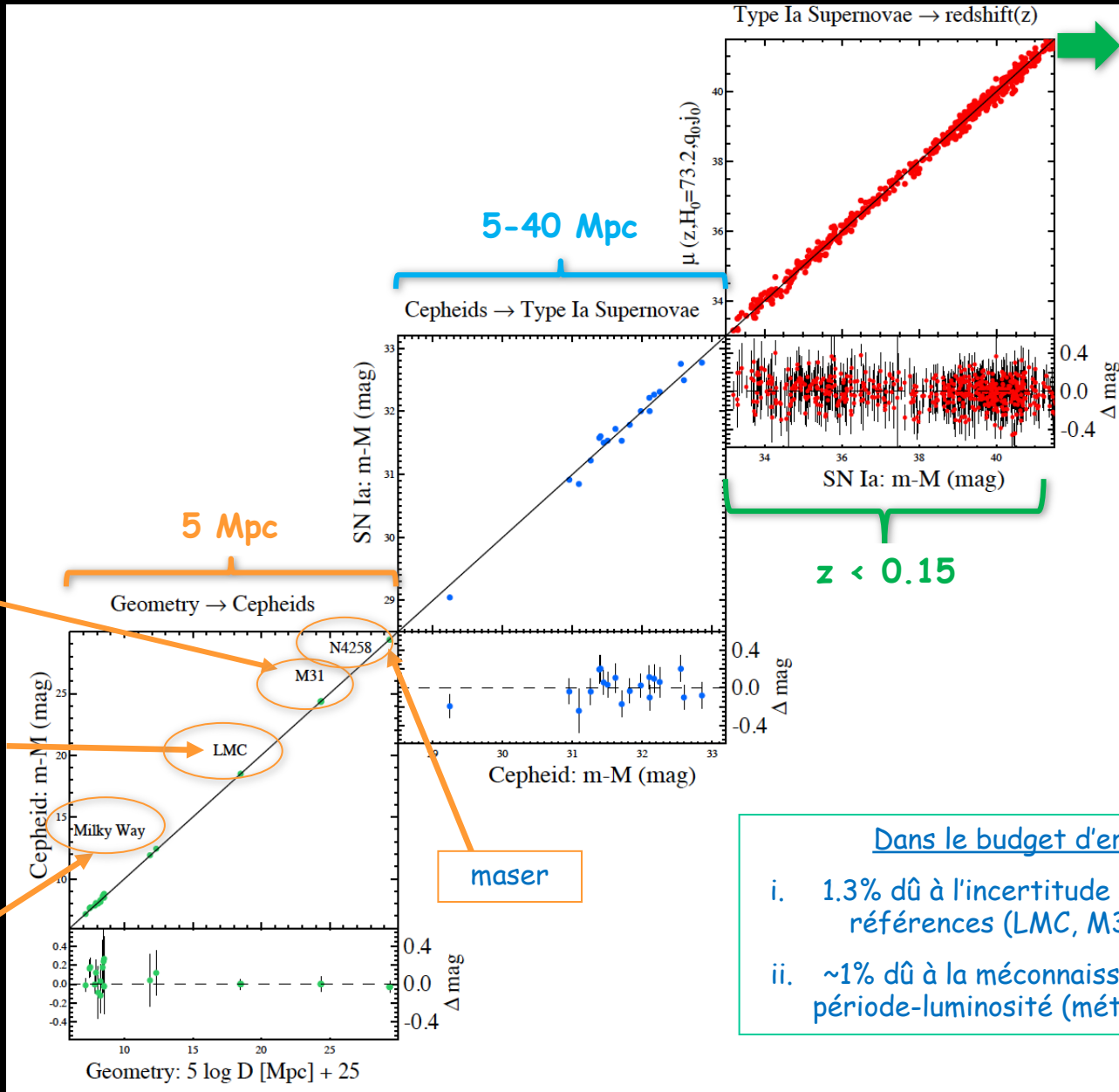
Céphéides



Le modèle λ CDM est un peu trop simple !

Etalonnage de la relation PL: 4 ancres

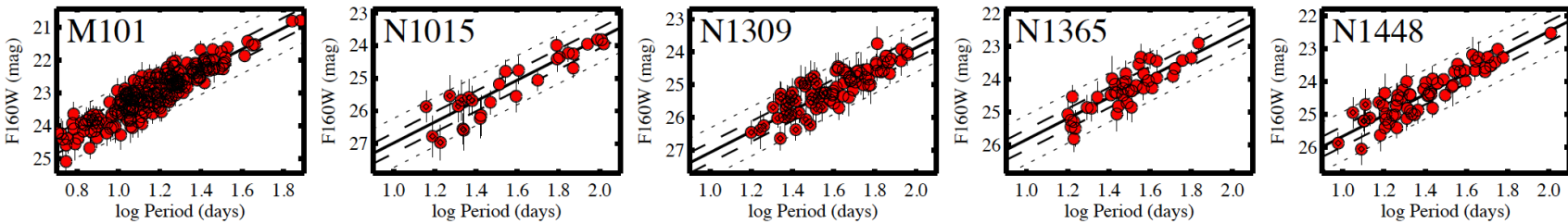
Riess et al. 2016, ApJ, 826, 56



- Dans le budget d'erreur (H_0):
- 1.3% dû à l'incertitude sur les galaxies de références (LMC, M31 et NGC 4248)
 - ~1% dû à la méconnaissance de la relation période-luminosité (métallicité, dispersion)

4 objectifs dans le cadre du **Projet Araucaria** et l'ANR **UnlockCepheids**

19 galaxies hôtes de SN Ia (5-40 Mpc):



• • + 14 autres

Relation
Période-
Luminosité (PL)

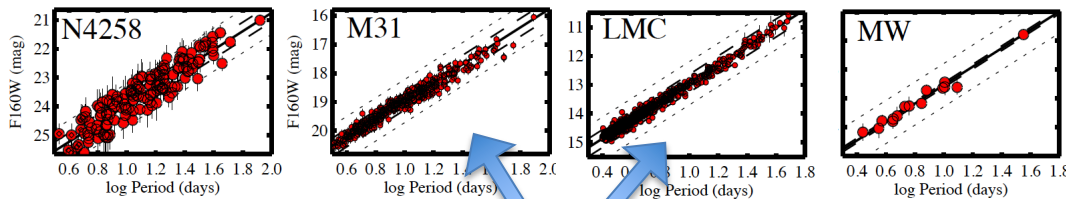
1

impact de la métallicité (pente & point zéro)

3

impact de l'enveloppe des Céphéides (biais & dispersion)

4 galaxies de références:



2

binaires à éclipses
relation Brillance de
surface - couleur
(+ SMC, M33)

Gaia

4

méthode de la parallaxe de
pulsation

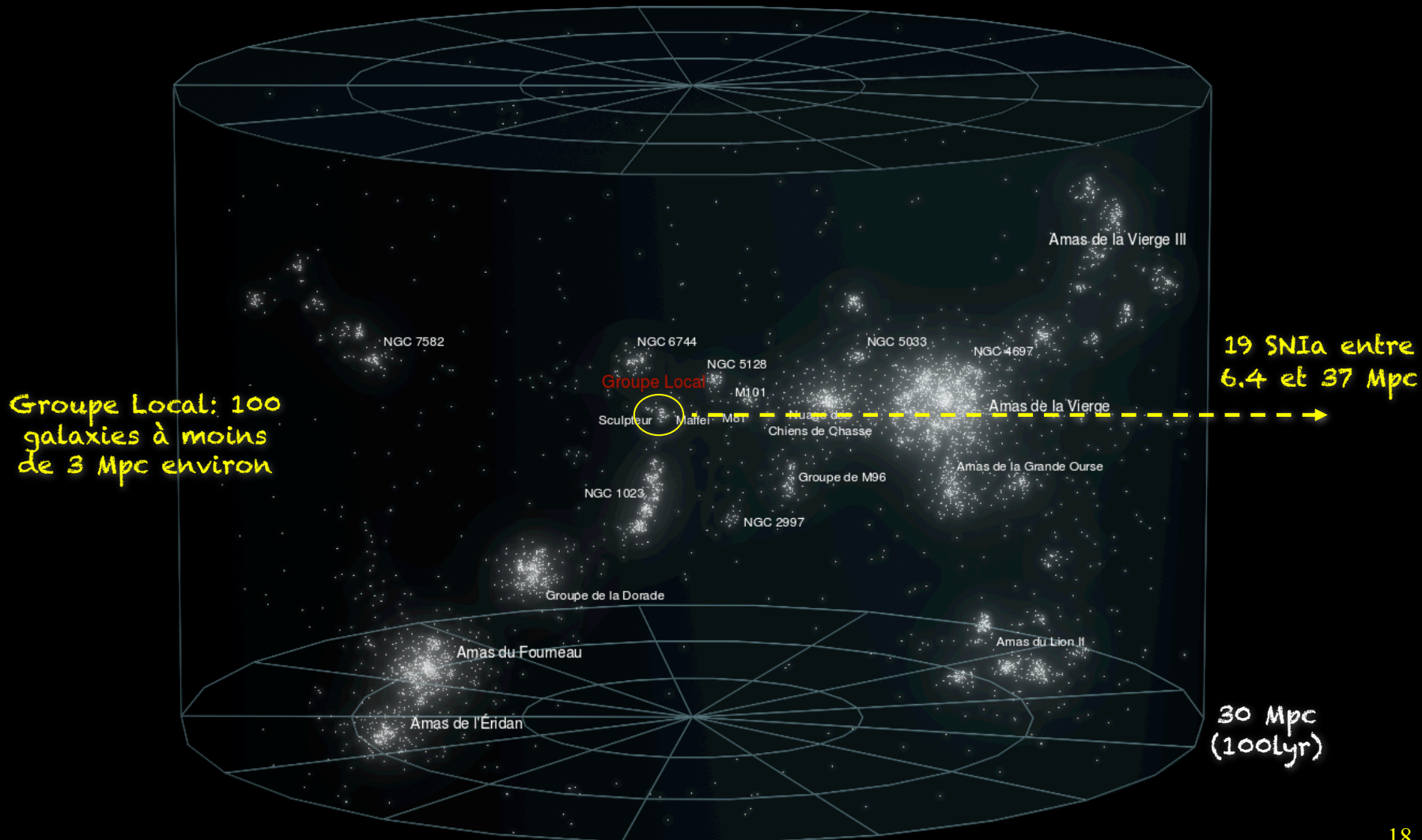
Groupe
Local

Le projet Araucaria

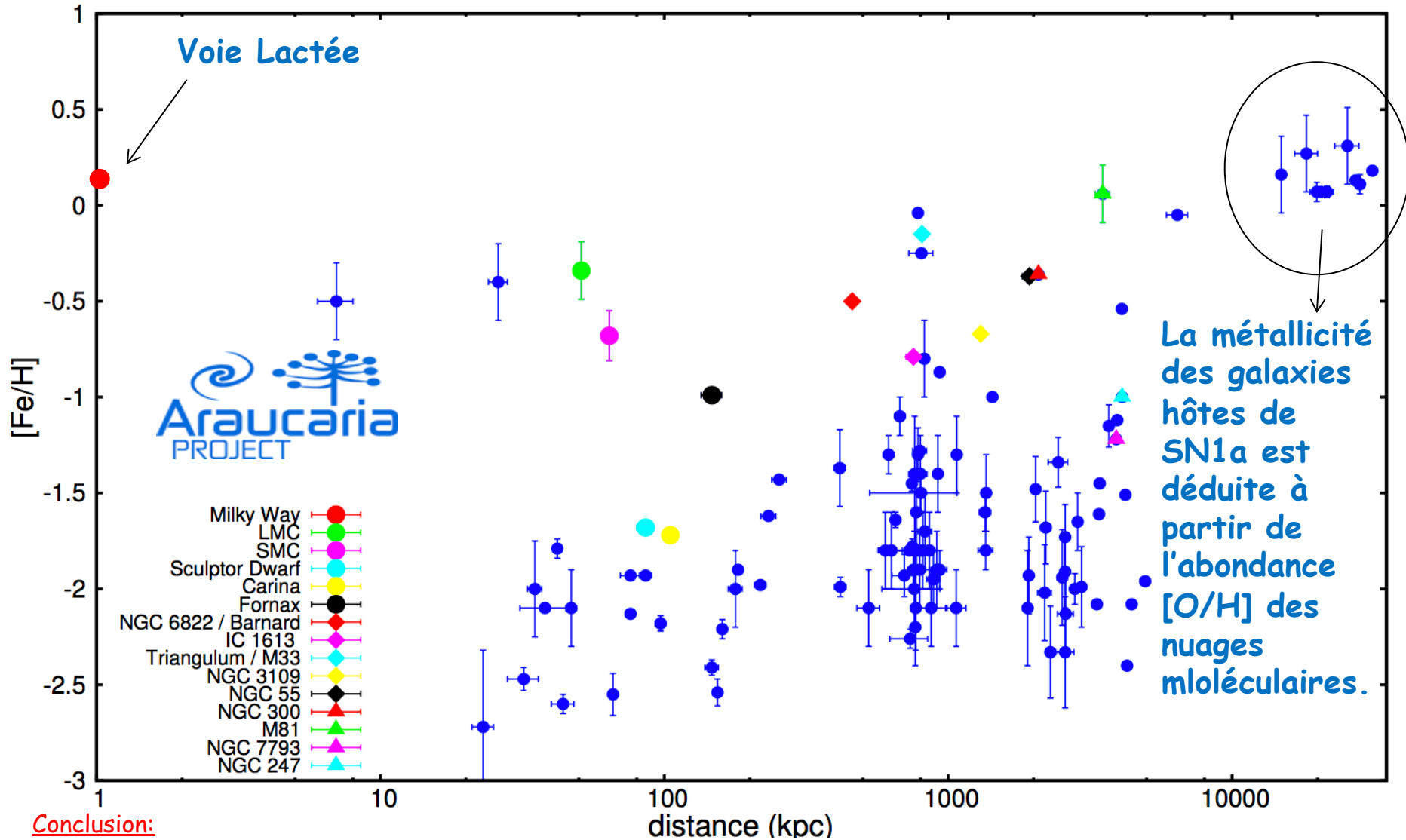
G. Pietrzynski, M. Gieren et 20 personnes (11 instituts, 6 pays)

Les distances dans le groupe local:

Utiliser différents indicateurs de distances: céphéides, RR Lyrae, binaires à éclipses, géantes et supergéantes rouges et bleues



Effet de la métallicité sur la relation PL



Conclusion:

1. La métallicité des Galaxies hôtes de SNIa => "Super Star Cluster (SSC) project"
2. Un consensus: la pente de la relation PL n'est pas sensible à la métallicité (bande K)
3. Un débat: l'effet de la métallicité sur le point-zéro de la relation PL (de -0.88 à 0.05 mag /dex)

Les binaires à éclipses comme indicateurs de distances dans l'univers



credit: press release ESO

LETTER

doi:10.1038/nature11878

An eclipsing–binary distance to the Large Magellanic Cloud accurate to two per cent

G. Pietrzyński^{1,2}, D. Graczyk¹, W. Gieren¹, I. B. Thompson³, B. Pilecki^{1,2}, A. Udalski², I. Soszyński², S. Kozłowski², P. Konorski², K. Suchomska², G. Bono^{4,5}, P. G. Prada Moroni^{6,7}, S. Villanova⁴, N. Nardetto⁸, F. Bresolin⁹, R. P. Kudritzki⁹, J. Storm¹⁰, A. Gallenne¹, R. Smolec¹¹, D. Minniti^{12,13}, M. Kubiak², M. K. Szymański², R. Poleski^{2,14}, Ł. Wyrzykowski², K. Ulaczyk², P. Pietrukowicz², M. Górski² & P. Karczmarek²

Nature, 2013, 495, 76

8 années d'observations photométriques et spectroscopiques de 8 binaires à éclipses dans le LMC => R1, R2 en km

$$d \sim R/\theta$$



www.eso.org

Relation brillance de surface couleur (SBCR) => θ_1, θ_2 en mas

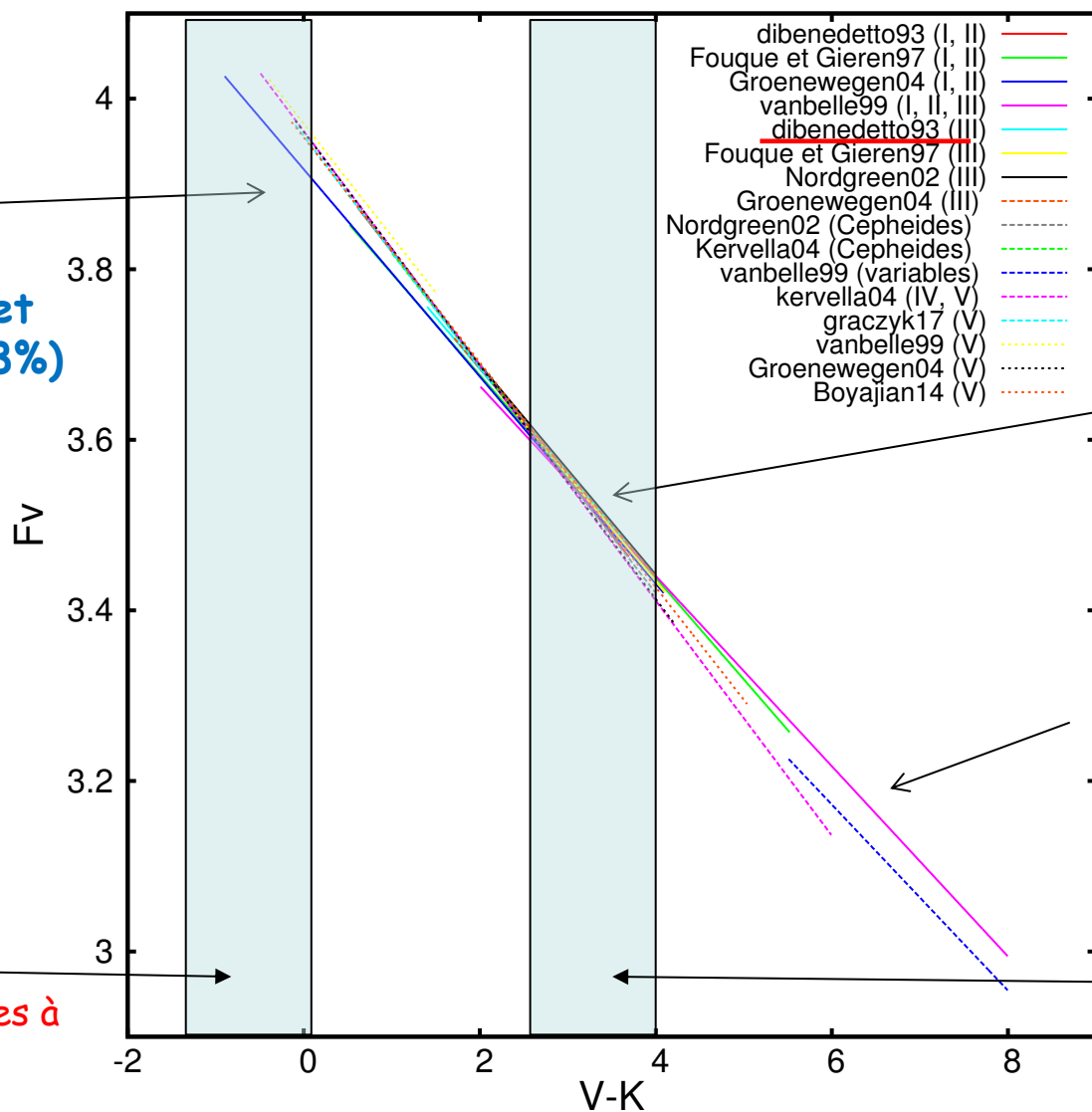
Distance au LMC avec 2.2% de précision:
49.97 +/- 0.18 (stat.) +/- 1.1 (syst.) kpc

Budget d'incertitudes: amplitudes des vitesses K1, K2 (0.5%), rayons stellaires (0.5%), inclinaison (0.2%), rougissement (0.8%), métallicité (0.3%), photométrie (0.5%) et SBCR (2%).

SBCR = di Benedetto 05

La relation brillance de surface - couleur (SBCR)

relations peu
précises (7%) et
incohérentes (8%)



1. $S_V = V - 5 \log \theta_{LD} = \sum a_k (V - K)^k$
2. $F_V = 4.2207 - 0.1 S_V = \alpha + \beta (V - K)$
3. $\log \theta_{LD} = d_1 + c_1 I (V - K) - 0.2 V$
4. $\theta_{LD}(V = 0) = 10^{A+B(V-K)}$
5. $\Phi_V = \frac{\theta}{9.305 \times 10^{-5}} = \sum z_k (V - K)^k$

2% de
précision

relations précises
(1-2%) mais
incohérentes (6%)

Utile pour les
binaires à éclipses
types
tardifs
(LMC/SMC)

SMC à 3% (Graczyk+14)

Utile pour les binaires à
éclipses types
précoces
(M31/M33)

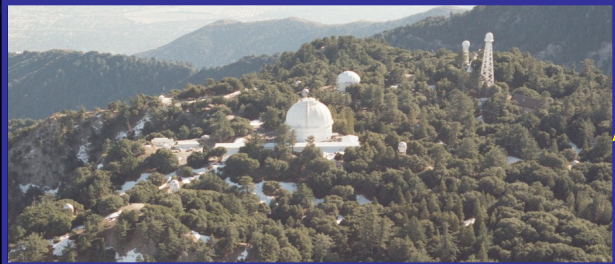
M31 à 4.4% (Ribas+05, Vilardell+10)

M33 à 5.5% (Bonanos+06)

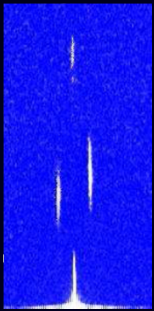
VEGA/CHARA

salle de télé-observation

Interféromètre CHARA



- . 4 télescopes
- . domaine visible
- . $R=5000, 30000$
- . résolution angulaire: ~ 0.27 mas
(Perraut et al. A&A, 590, 117)
- . magnitude limite: $mv=8.0$



Franges à
3 télescopes (3T)

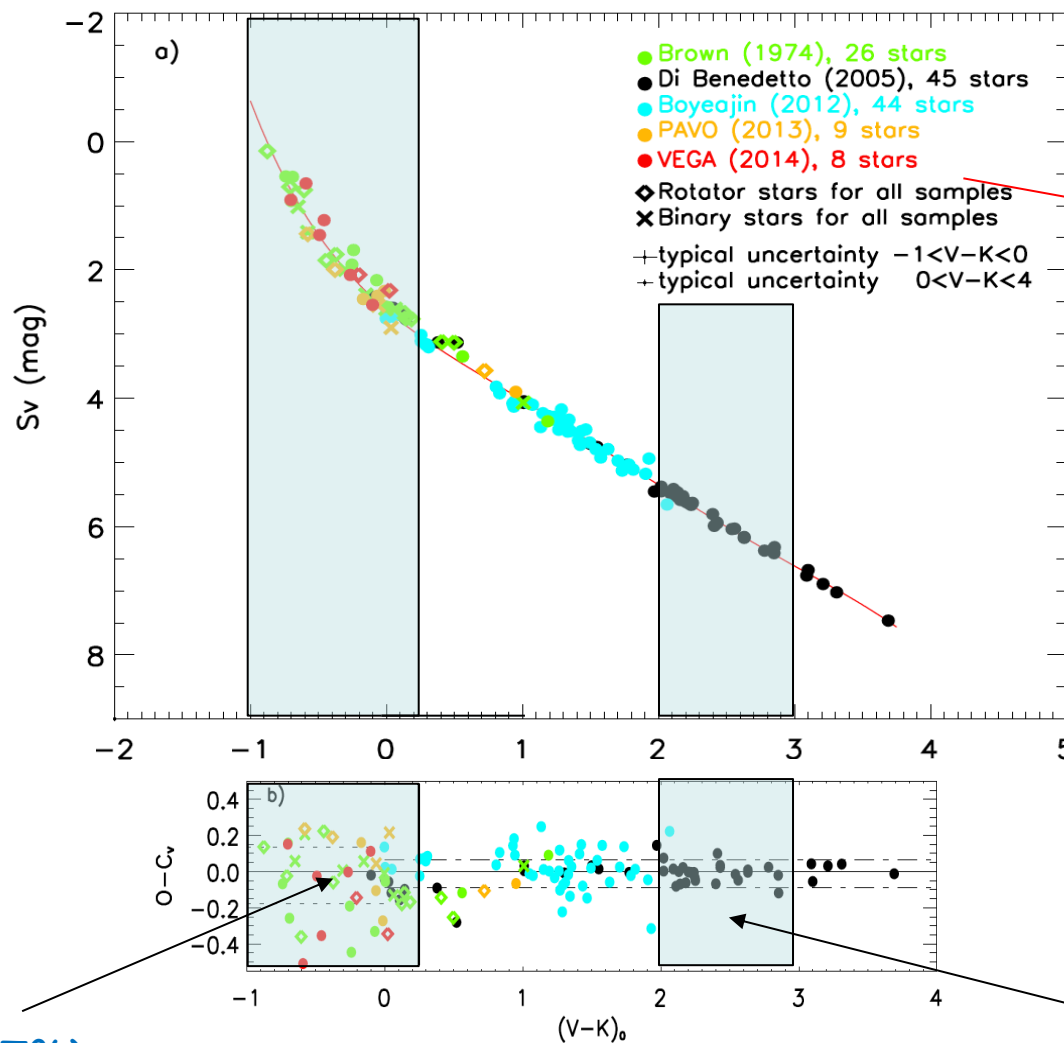
4T

<http://www-n.oca.eu/vega/en/publications/index.htm>
Mourard+ 2009, 2011 ; Ligi et al. 2013

Improving the surface brightness-color relation for early-type stars using optical interferometry^{★,★★}

A&A, 2014, A&A, 570, 104

M. Challouf^{1,2}, N. Nardetto¹, D. Mourard¹, D. Graczyk³, H. Aroui², O. Chesneau¹, O. Delaa¹, G. Pietrzyński^{3,4},
W. Gieren³, R. Ligi¹, A. Meilland¹, K. Perraut^{5,6}, I. Tallon-Bosc^{7,8}, H. McAlister^{9,10}, T. ten Brummelaar¹⁰,
J. Sturmann¹⁰, L. Sturmann¹⁰, N. Turner¹⁰, C. Farrington¹⁰, N. Vargas¹⁰, and N. Scott¹⁰



M. Challouf
PhD 2012-2015

8 mesures de
diamètres
VEGA/CHARA
avec une précision
de 1.5%

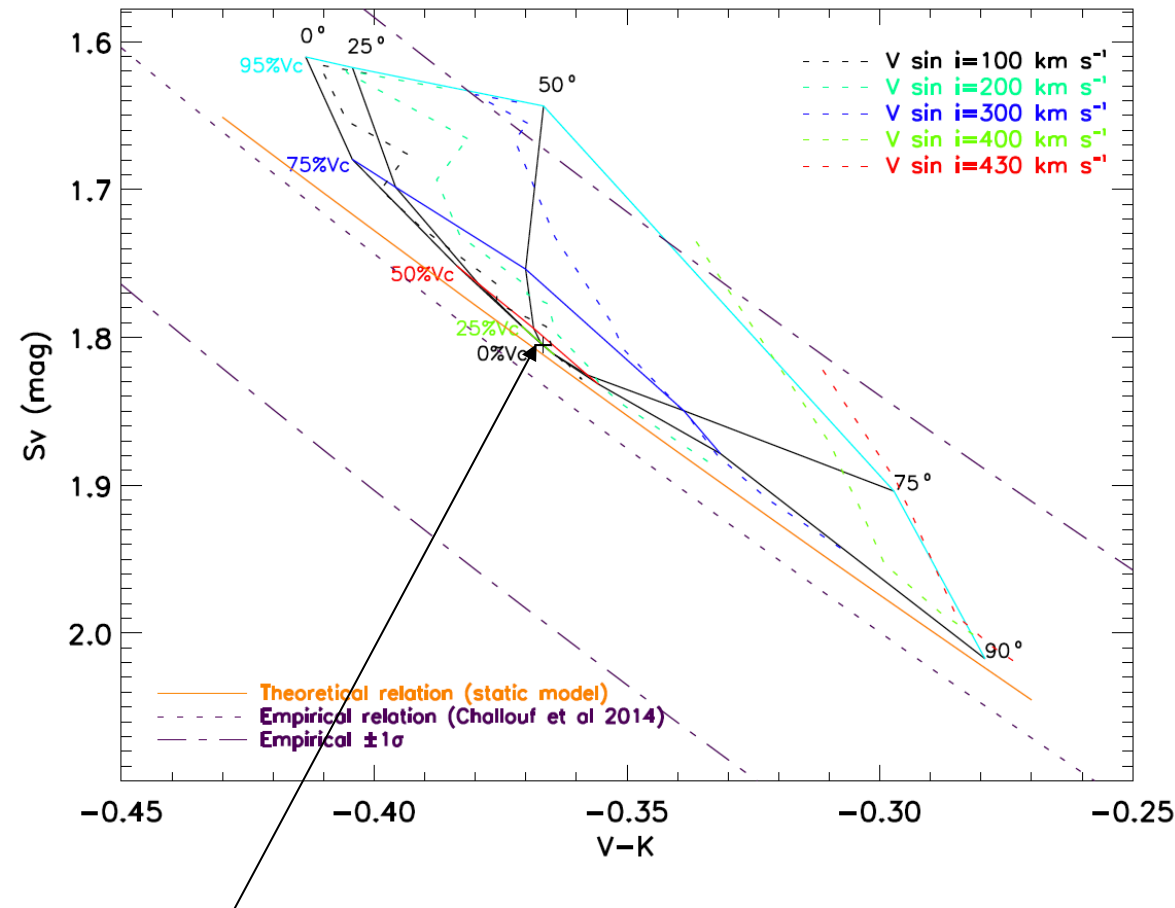
0.16 mag (7%)

0.03 mag (2%)

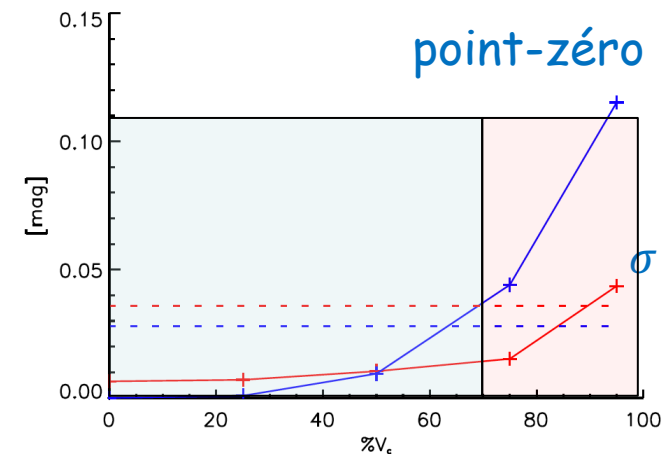
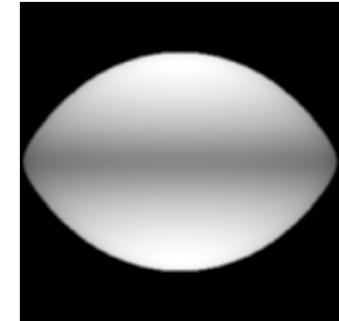
Theoretical impact of fast rotation on calibrating the surface brightness-color relation for early-type stars

A&A, 2015, A&A, 579, 107

M. Challouf^{1,2}, N. Nardetto¹, A. Domiciano de Souza¹, D. Mourard¹, H. Aroui², P. Stee¹, O. Delaa¹, D. Graczyk³,
G. Pietrzyński^{3,4}, and W. Gieren^{3,5}



modèle CHARON
Domiciano+02,12

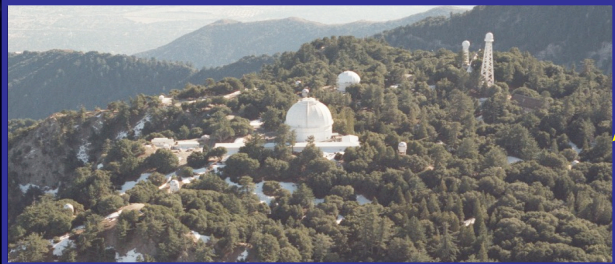


Modèle statique de départ, puis exploration de l'espace des paramètres (vitesse de rotation, inclinaison) pour différentes configurations de bases. Quantification de l'effet sur la relation brillance de surface - couleur.

SPICA/CHARA

salle de télé-observation

Interféromètre CHARA

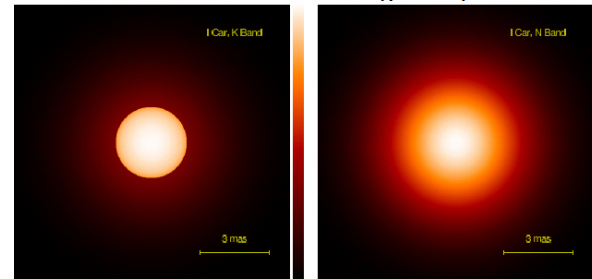
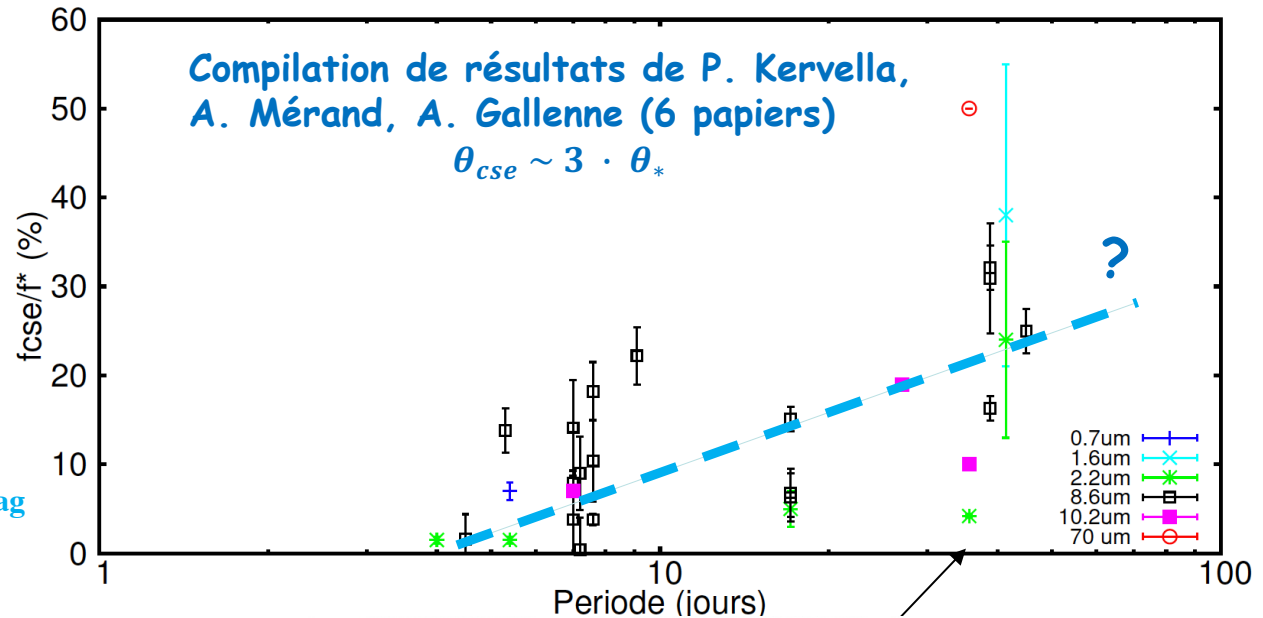
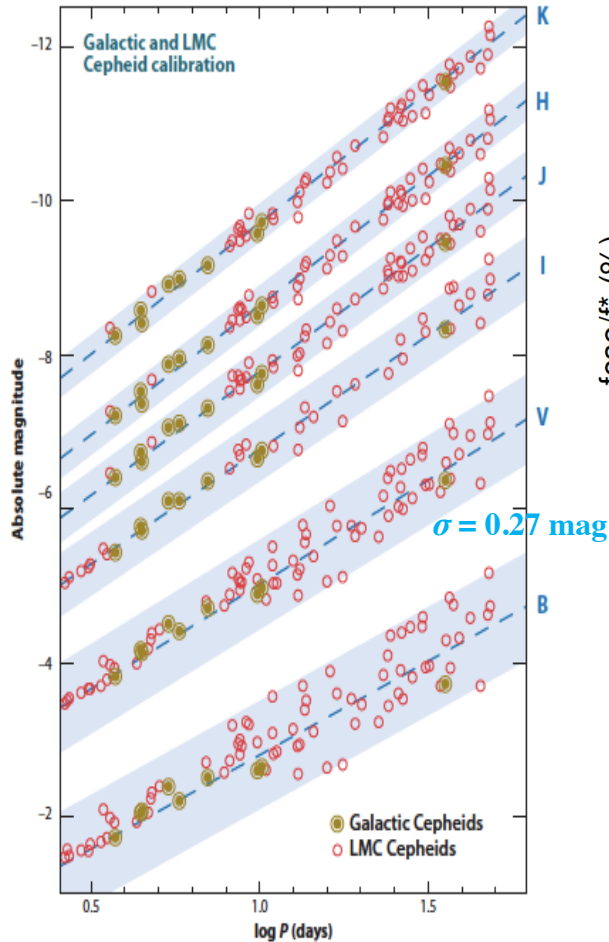


- . 6 télescopes
- . optiques adaptatives de CHARA
- . fibres et détecteur de nouvelle génération
- . domaine visible
- . $R = 140$ (diamètres), 3000 (images)

. Observer 1000 étoiles sur 5 ans (tous types et classes) dans le domaine visible (1% de précision jusqu'à 0.2 mas en terme de diamètres et une magnitude limite de $m_V=8$) en lien avec TESS, PLATO, et le projet Araucaria.

3

L'impact des enveloppes sur la relation PL

 $\sigma = 0.08 \text{ mag}$ 

modèle de I Car
[Crédit A. Mérand]

ANR 'UnlockCepheids'

P. Kervella, A. Mérand, A. Gallenne, N. Nardetto, E. Lagadec, W. Gieren, G. Pietrzynski

Docs: Boris Trahin, Vincent Houdé + Post-doc: Simon Borgniet

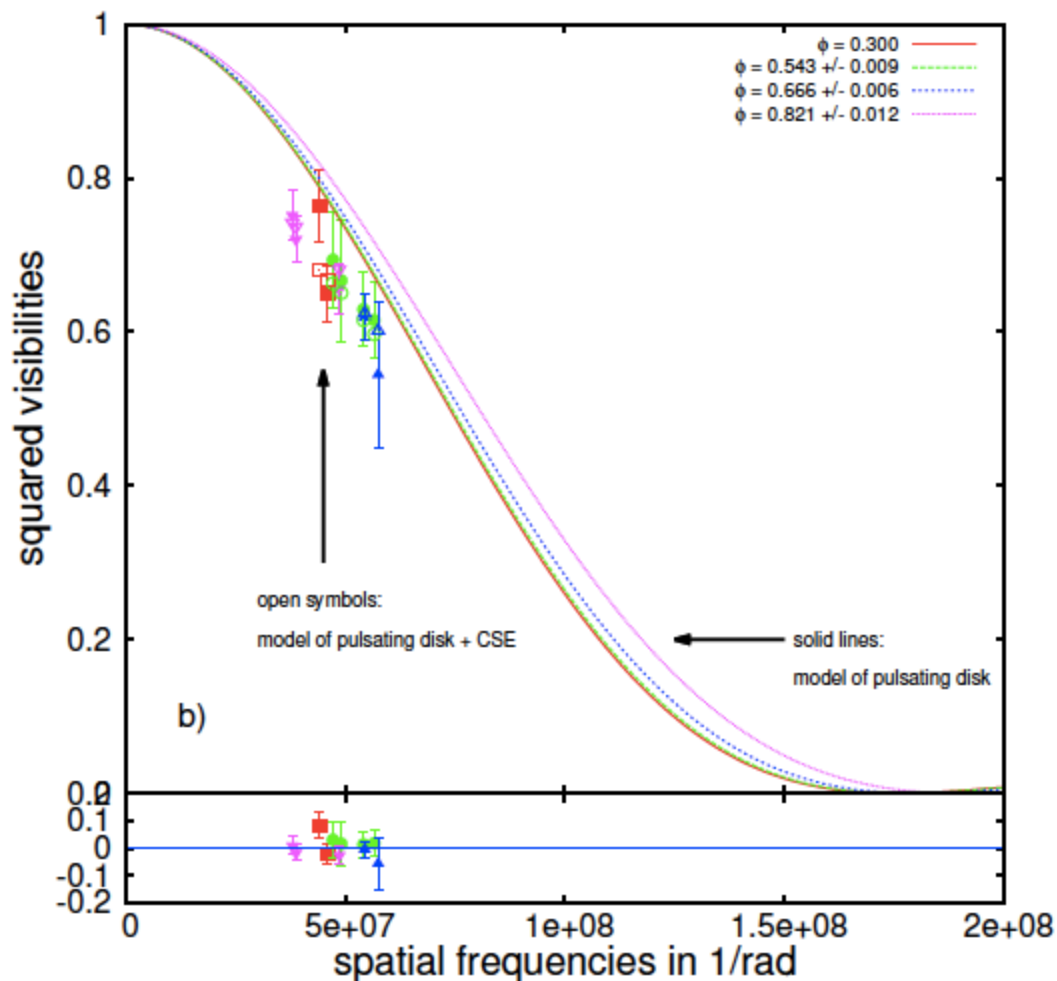
WP3: Effet de l'environnement circumstellaire des Céphéides sur la relation PL dans le contexte du JWST et de l'ELT (N. Nardetto)

Sujet de la Thèse de V. Houdé (co-encadrée par N. Nardetto et E. Lagadec)

VEGA/CHARA interferometric observations of Cepheids

I. A resolved structure around the prototype classical Cepheid δ Cep in the visible spectral range★ A&A, 2016, 593, 45

N. Nardetto¹, A. Mérand², D. Mourard¹, J. Storm³, W. Gieren^{4,5}, P. Fouqué⁶, A. Gallenne^{2,4}, D. Graczyk^{4,5,7}, P. Kervella^{8,9}, H. Neilson¹⁰, G. Pietrzynski⁷, B. Pilecki⁷, J. Breitsfelder⁸, P. Berio¹, M. Challouf^{1,11}, J.-M. Clausse¹, R. Ligi¹, P. Mathias^{12,13}, A. Meilland¹, K. Perraut^{14,15}, E. Poretti¹⁶, M. Rainer¹⁶, A. Spang¹, P. Stee¹, I. Tallon-Bosc¹⁷, and T. ten Brummelaar^{18,19}



Solution 1:

$\theta_{cse} = 8.9 \pm 3.0$ mas

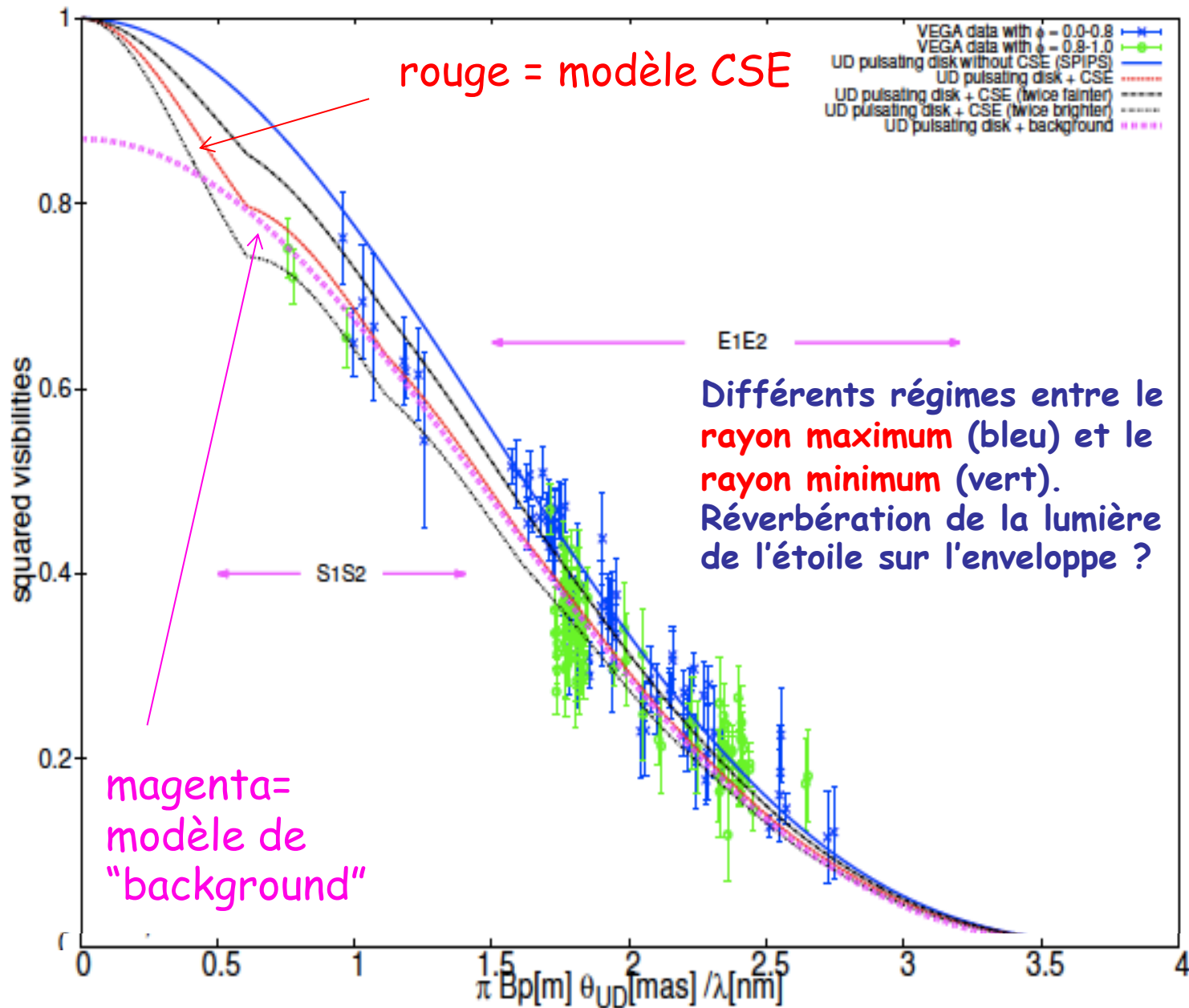
$\text{flux}_{cse} = 0.07 \pm 0.01$

Solution 2:

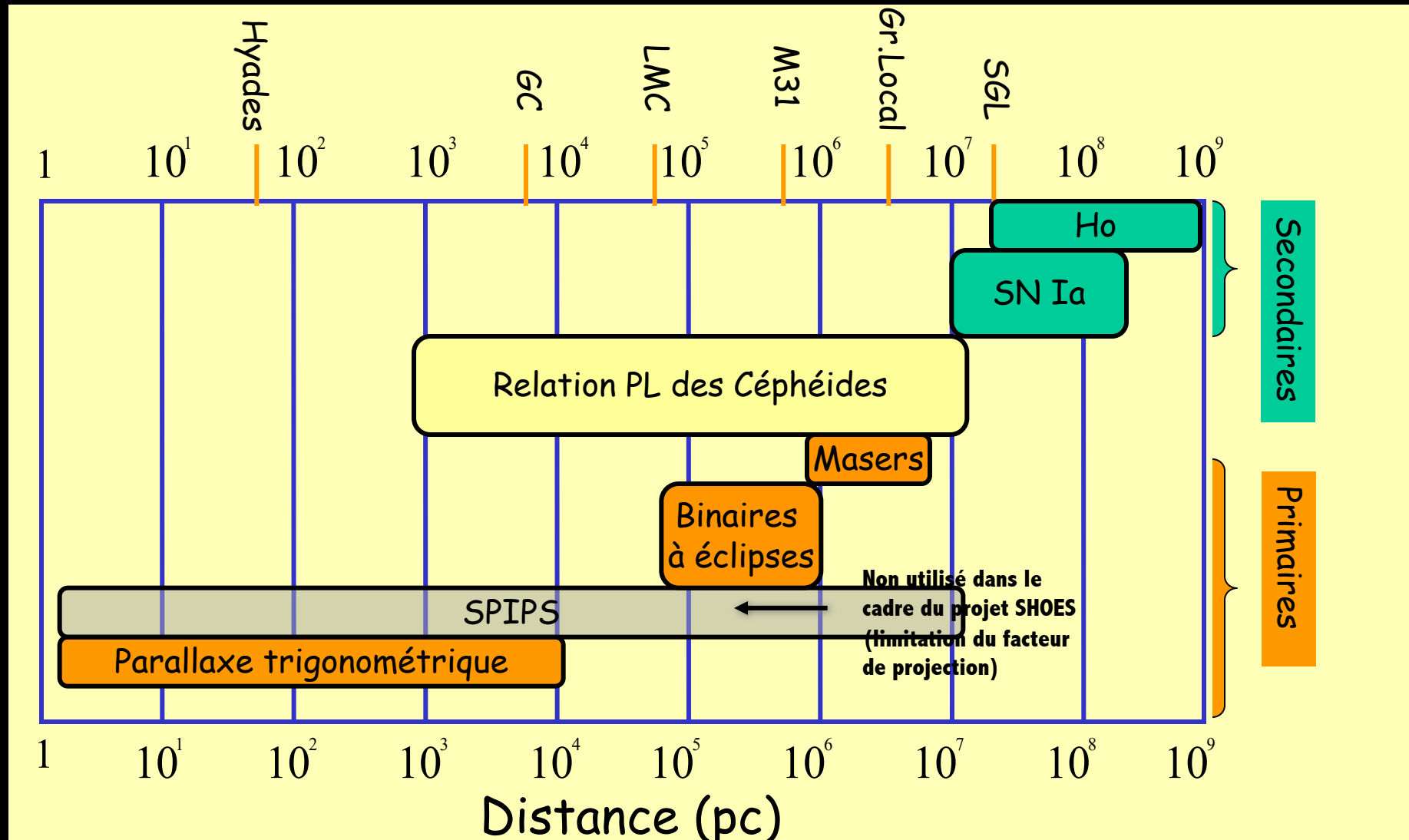
« visible background »

$\text{flux}_{background} =$

0.07 ± 0.01

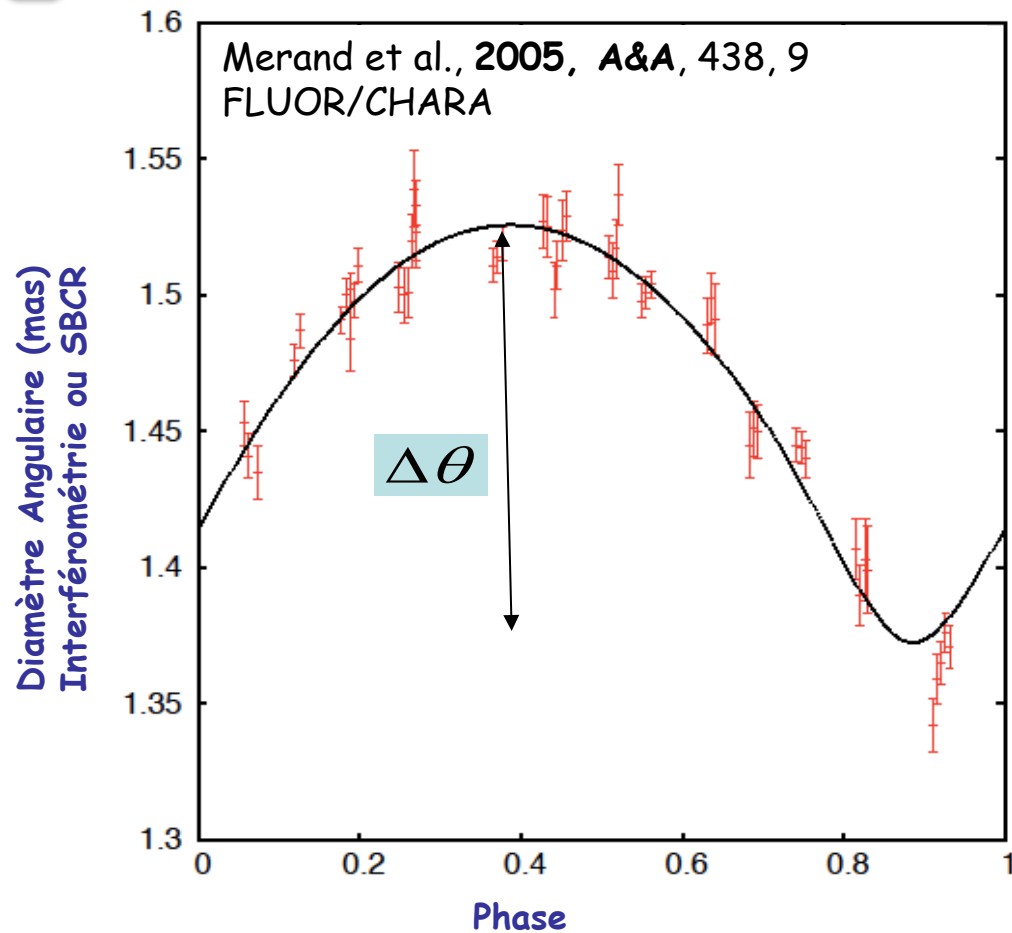


L'échafaudage des échelles de distances dans l'univers



La méthode de la parallaxe de pulsation

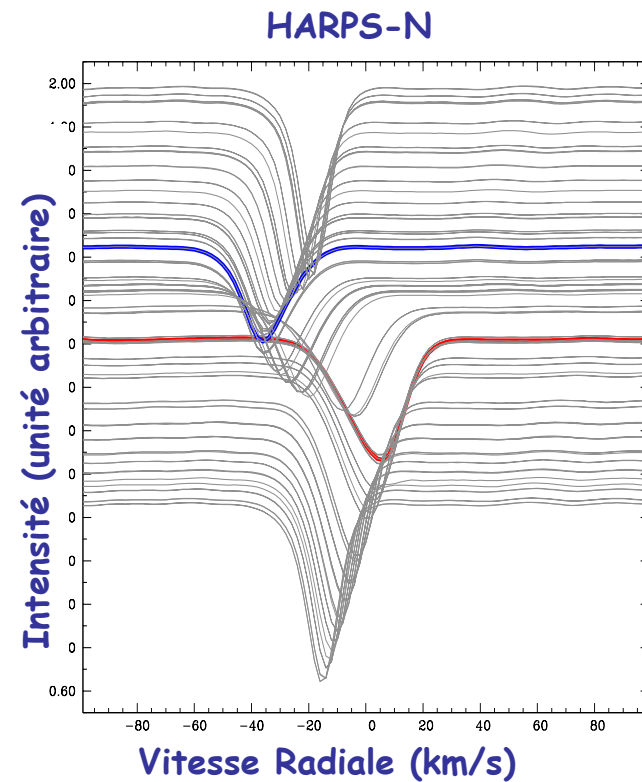
Baade (1926) – Wesselink (1946)



$$d \propto \frac{\Delta R}{\Delta\theta} \text{ with } R(t) = \int V_{\text{puls}} dt$$



$$\Delta R \Leftrightarrow \Delta\theta$$

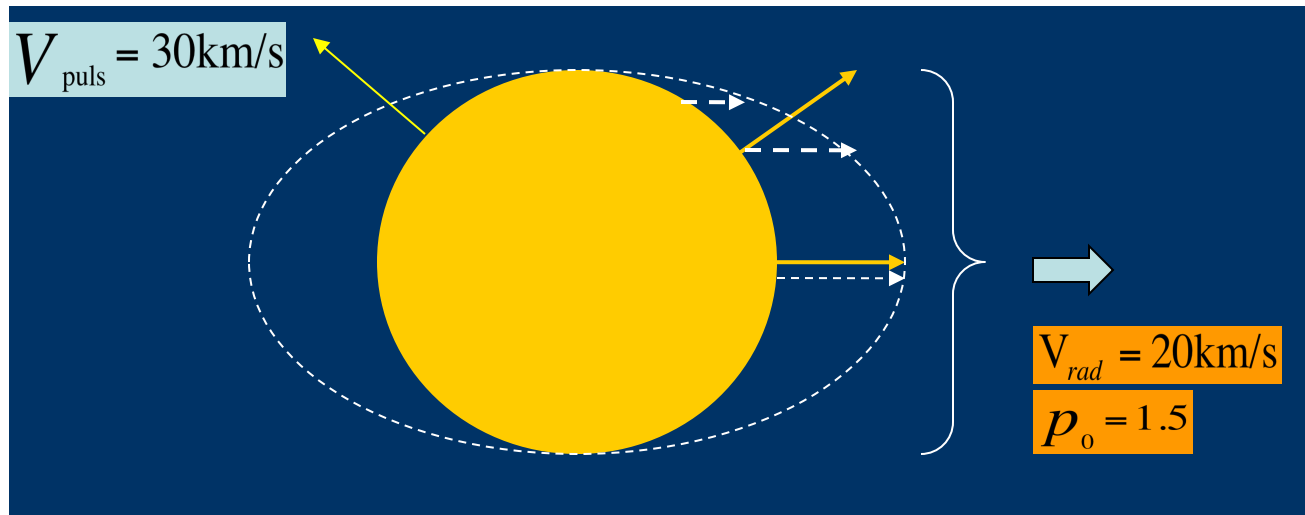


$$V_{\text{puls}} = p V_{\text{rad}}$$

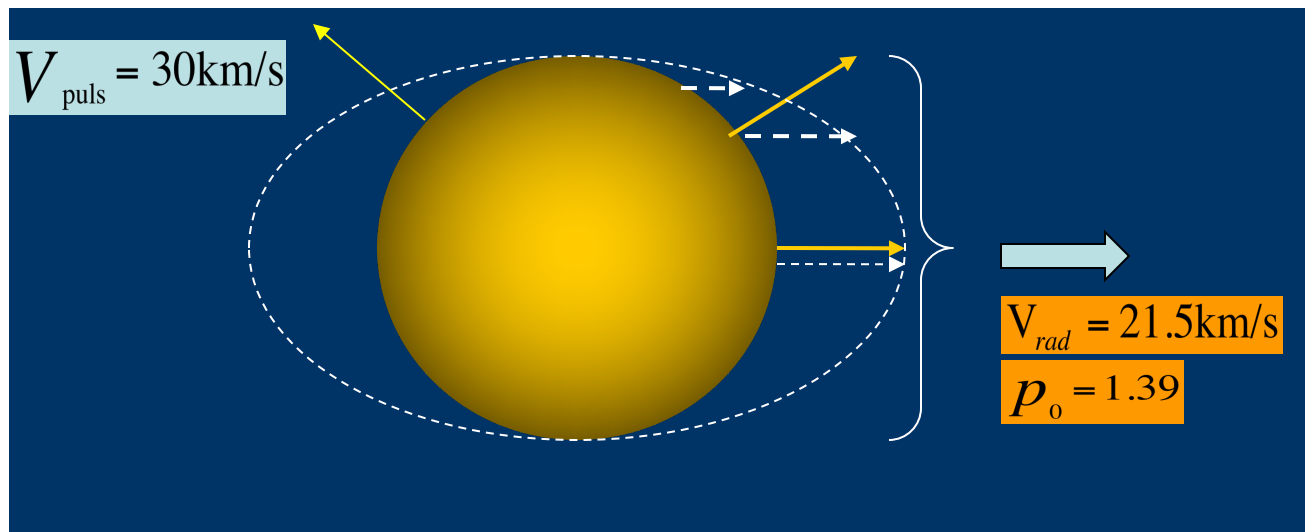
$$V_{\text{rad}}$$

Le facteur de projection

- Un effet géométrique (disque uniforme)



- Un effet d'assombrissement centre-bord

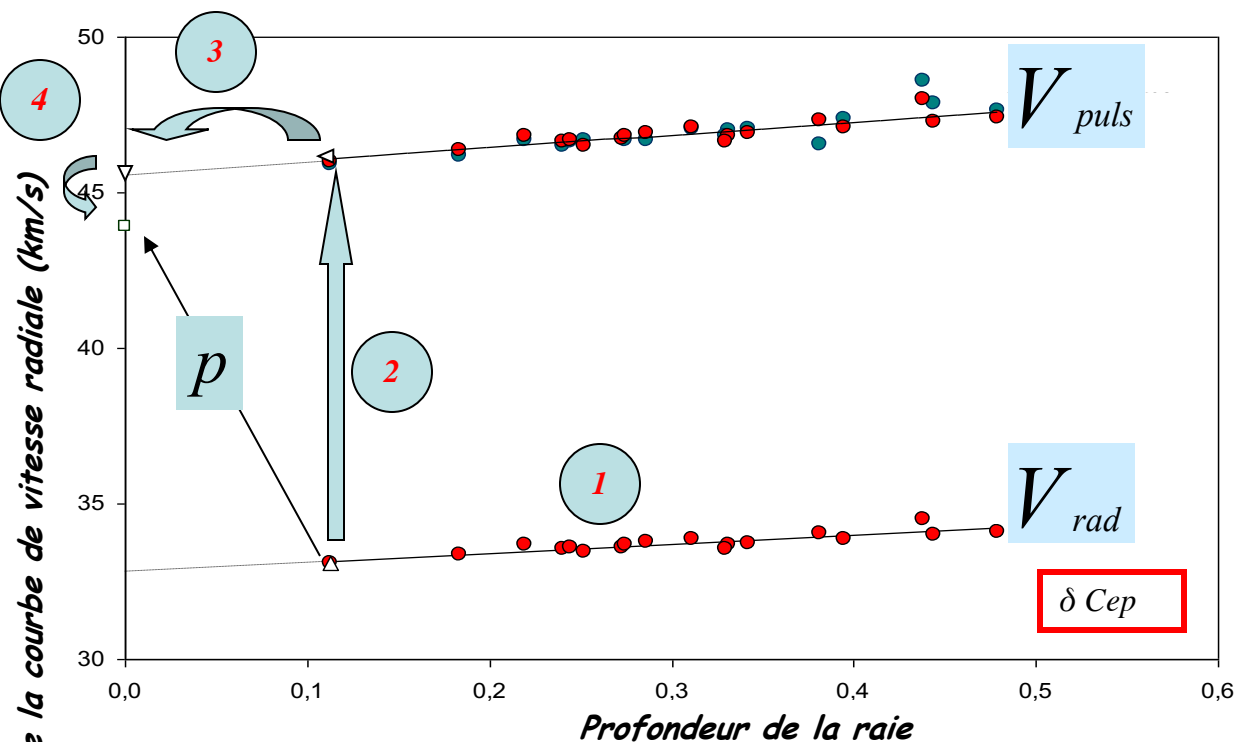


$p_o = 3/2 - uV/6$ (Getting 1934)
 $p_o = 1.36 - 1.39$ pour δ Cep

*Relation de Getting
pertinente
seulement et seulement si
la méthode du premier
moment est utilisée pour
déterminer la vitesse radiale.*

La décomposition du facteur de projection

(Nardetto et al. 2004, 2007, basée sur le modèle hydrodynamique d'A. Fokin)



décomposition du facteur de projection à partir du modèle hydrodynamique

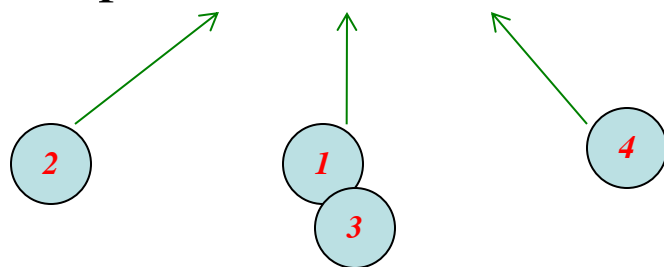
1 - gradient de vitesse atmosphérique

2 - p-facteur géométrique

3 - extrapolation à la photosphère

4 - corrections couches de gaz/optiques

Raie spectrale 1 $\Rightarrow$ $p = 1.39 * 0.99 * 0.96 = 1.33$



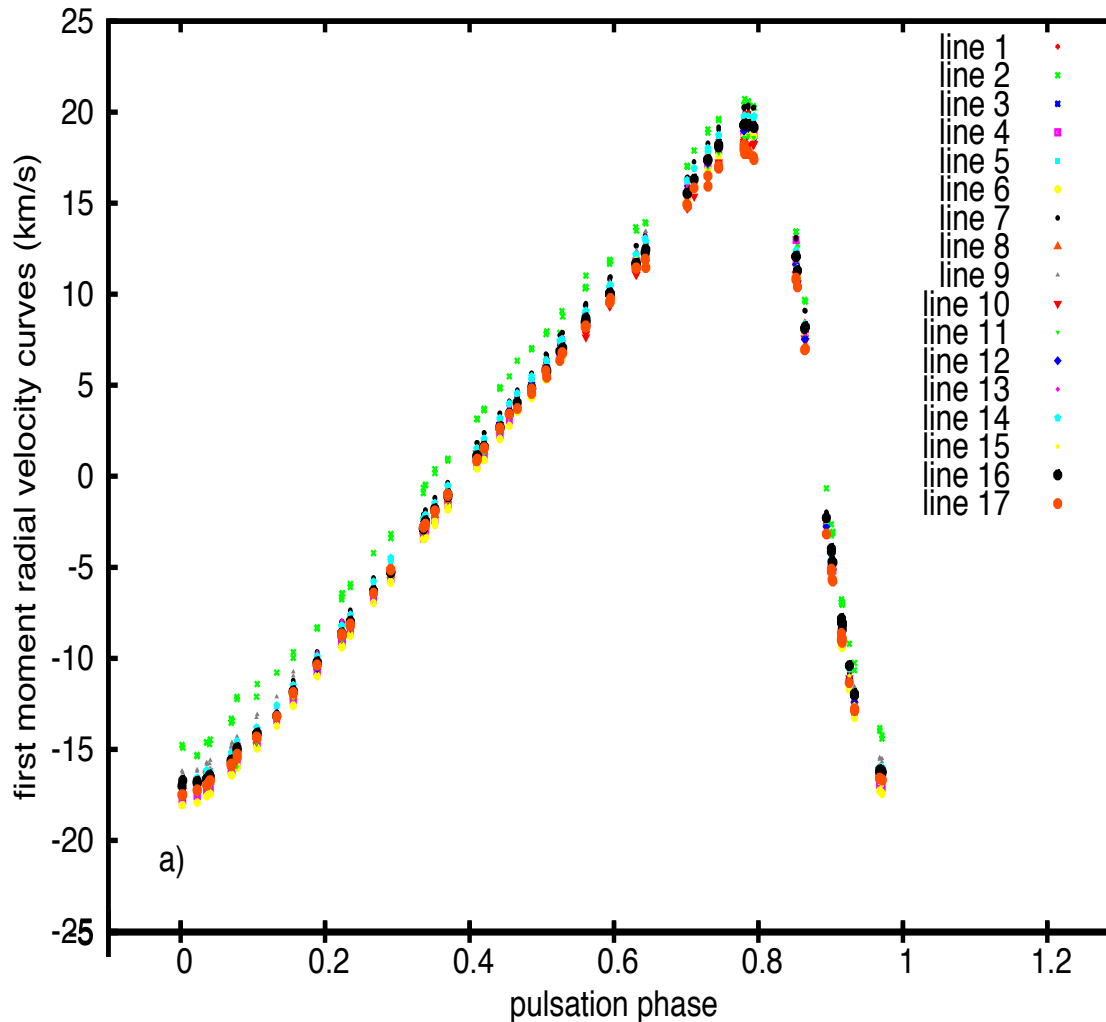
Nous pouvons anticiper les p-facteurs pour toutes les raies sélectionnées dans les spectres HARPS-N...

HARPS-N high spectral resolution observations of Cepheids

I. The Baade-Wesselink projection factor of δ Cep revisited★

N. Nardetto¹, E. Poretti², M. Rainer², A. Fokin³, P. Mathias^{4,5}, R. I. Anderson⁶, A. Gallenne^{7,8}, W. Gieren^{8,9},
D. Graczyk^{8,9,10}, P. Kervella^{11,12}, A. Mérand⁷, D. Mourard¹, H. Neilson¹³, G. Pietrzynski¹⁰,
B. Pilecki¹⁰, and J. Storm¹⁴

A&A, 2017, 597, A73



HARPS-N (TNG, La Palma)

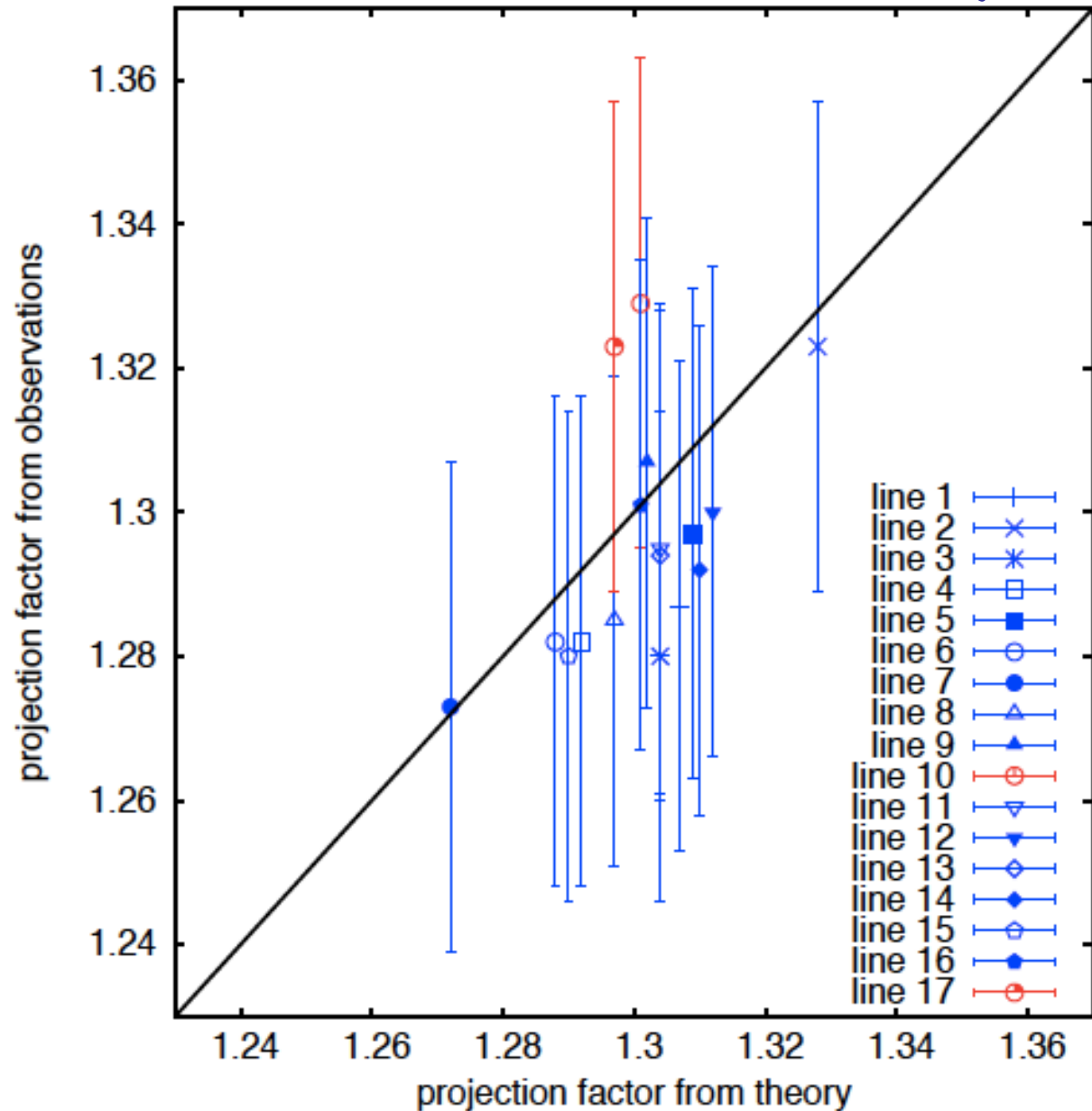
Données d'une qualité
exceptionnelle

R = 100000

103 mesures de δ Cep sur
30 cycles

17 raies spectrales

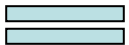
Confronter le modèle aux observations (1/3)



$d=272 \pm 3 \pm 5 \text{ pc}$
(Majaess et al. 2012)

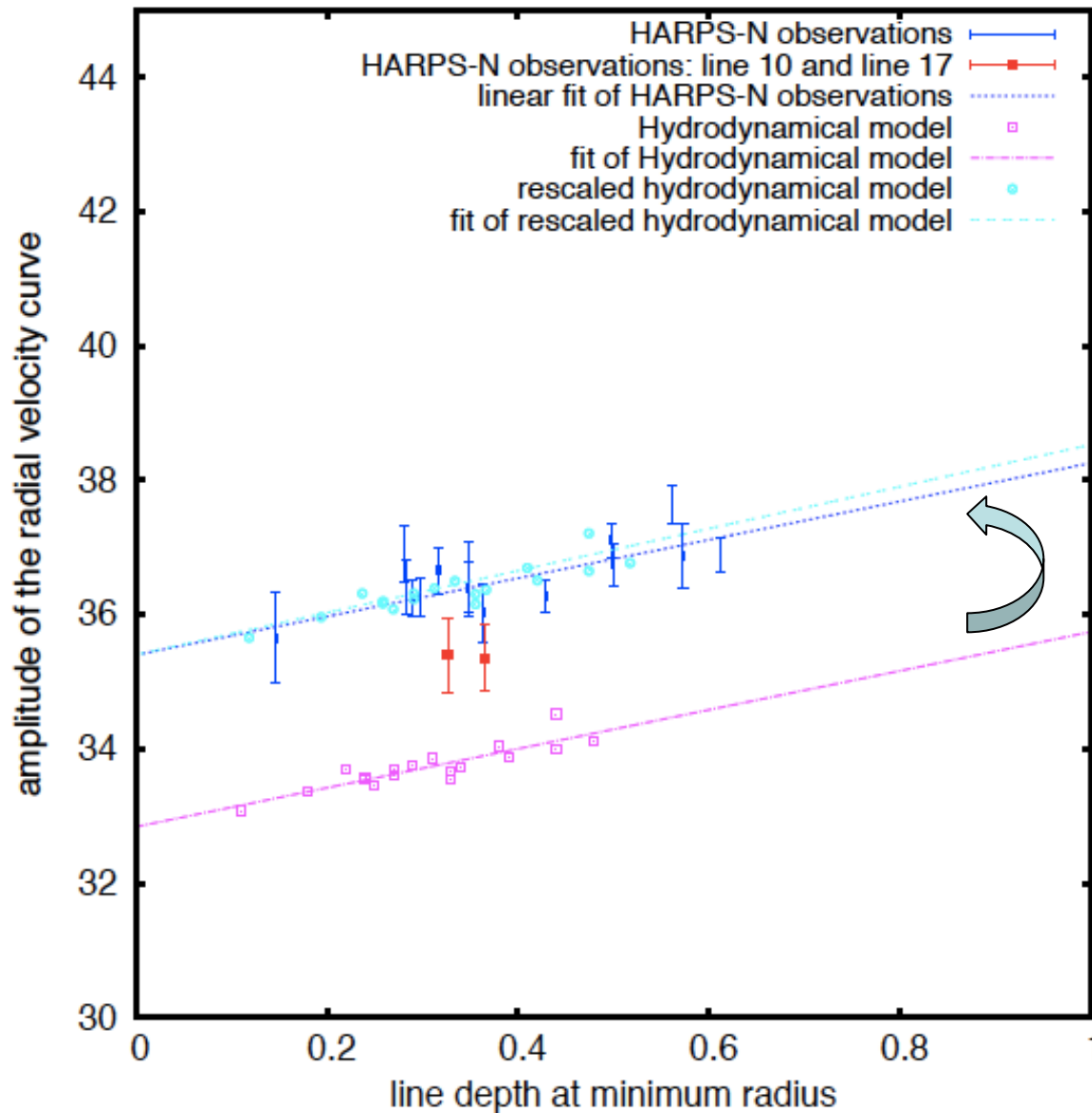


FLUOR/CHARA
HARPS-N
17 raies spectrales



facteurs de projection
observationnels

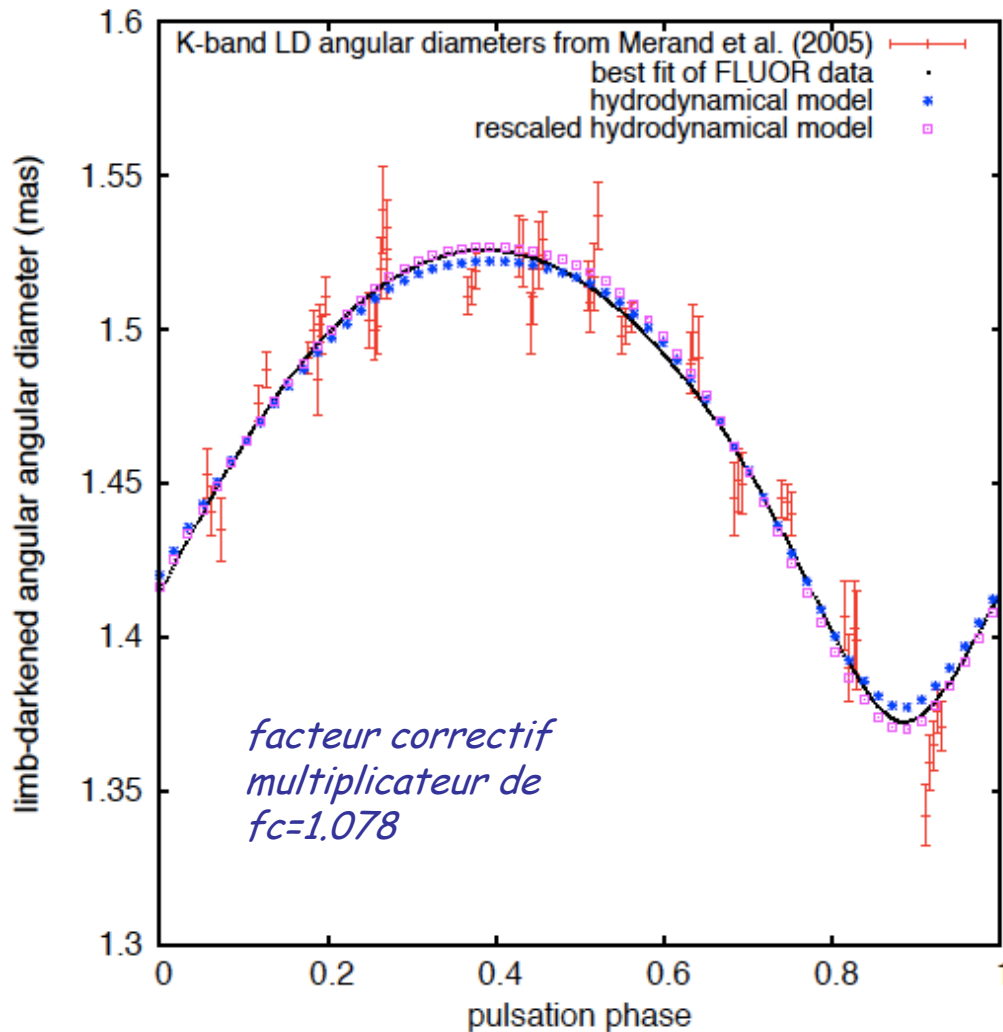
Confronter le modèle aux observations (2/3)



*facteur correctif
multiplicateur de
 $fc=1.078$
(du fait de manque de
convection)*

*Le p-facteur du
modèle 2D récent
avec convection de
Vasilyev+17 est
cohérent avec le
modèle 1D
hydrodynamique sans
convection*

Confronter le modèle aux observations (3/3)



→ Le modèle de δ Cep remis à l'échelle permet de reproduire:

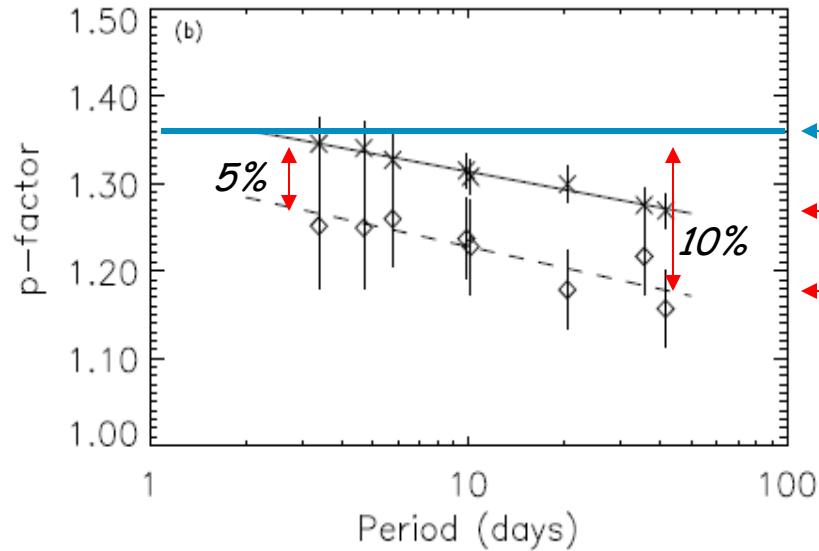
- 1 - les p-facteurs individuels
- 2 - le gradient de vitesse atmosphérique
- 3 - l'amplitude et la forme de la courbe de diamètre

La décomposition du facteur de projection semble correcte !

High-resolution spectroscopy for Cepheids distance determination

V. Impact of the cross-correlation method on the p-factor and the γ -velocities^{*, **} *2009, A&A, 502, 951*

N. Nardetto¹, W. Gieren¹, P. Kervella², P. Fouqué³, J. Storm⁴, G. Pietrzynski^{1,5}, D. Mourard⁶, and D. Queloz⁷



← valeur du facteur de projection géométrique
($p=1.36$ - Burki et al. 1982)

← méthode du premier moment de la raie (raie spectrale 1)

← méthode de la cross-corrélation + ajustement Gaussien

$$p = -[0.08 \pm 0.05] \log P + [1.31 \pm 0.06]$$



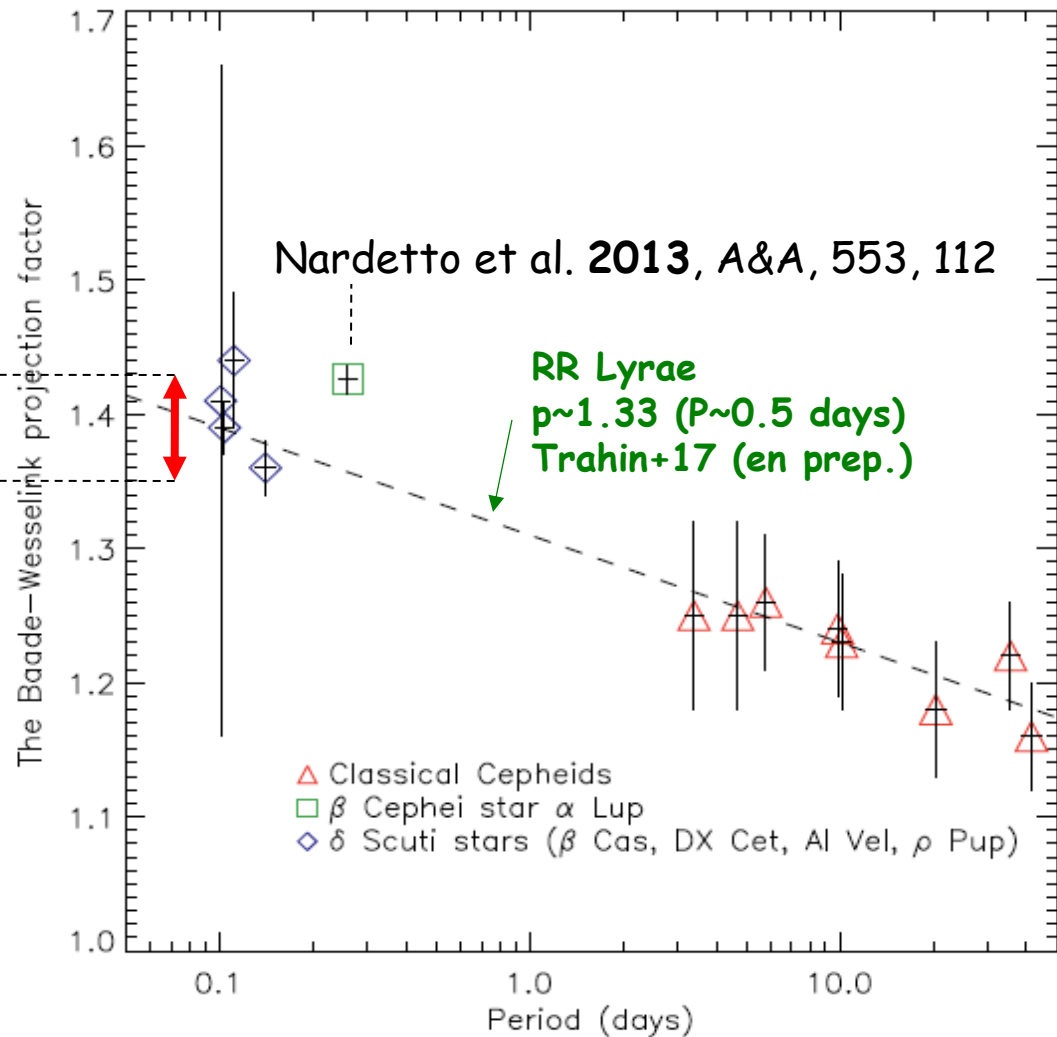
p[cc-g] δ Cep 1.25 +/- 0.05 (stat)

p[cc-g] méthode BW inverse 1.239 +/- 0.034 (stat.) +/- 0.023 (syst.)

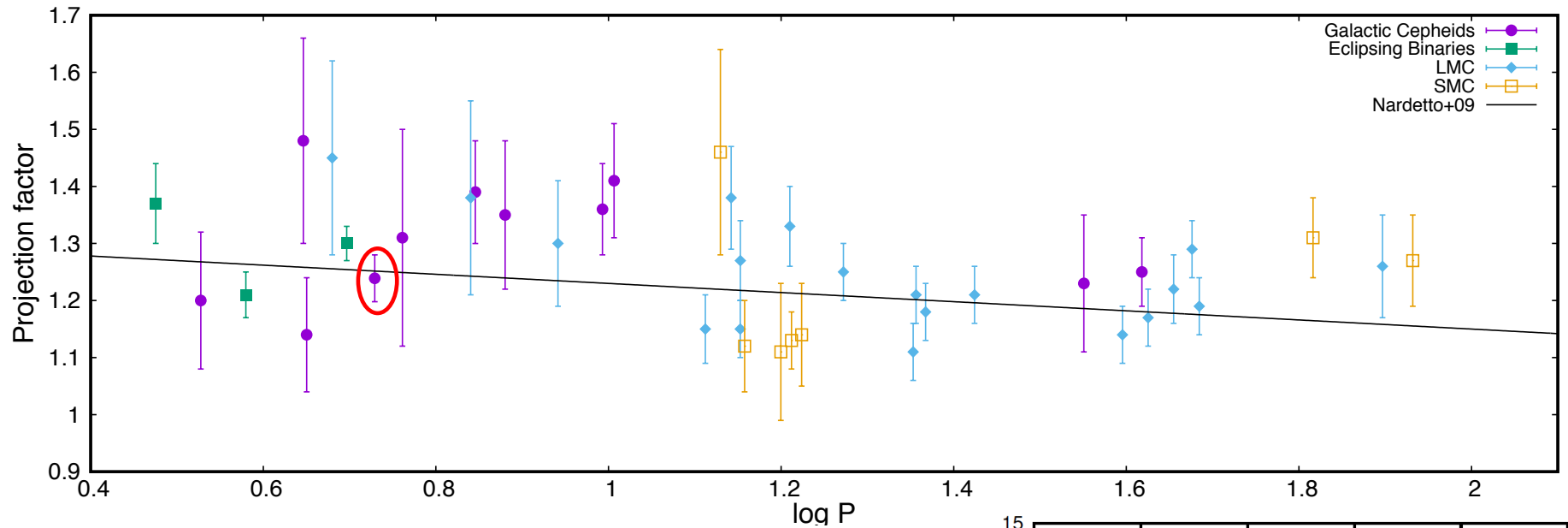
Le facteur de projection pour d'autres types d'étoiles pulsantes

Effet de la rotation rapide et de l'inclinaison sur le facteur de projection des δ Scuti

Nardetto et al. 2013, A&A, 561, 151



Perspectives sur le facteur de projection

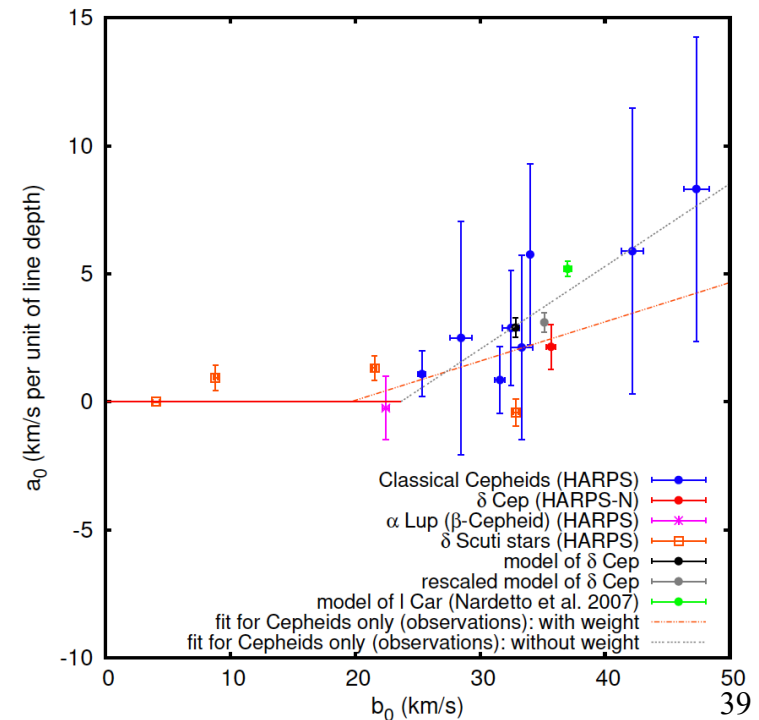


. p-facteurs de 300 Céphéides avec Gaia (ANR WP1)

. p-facteurs pour les RR Lyrae et les δ Scuti

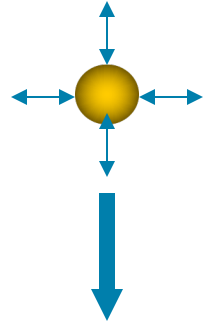
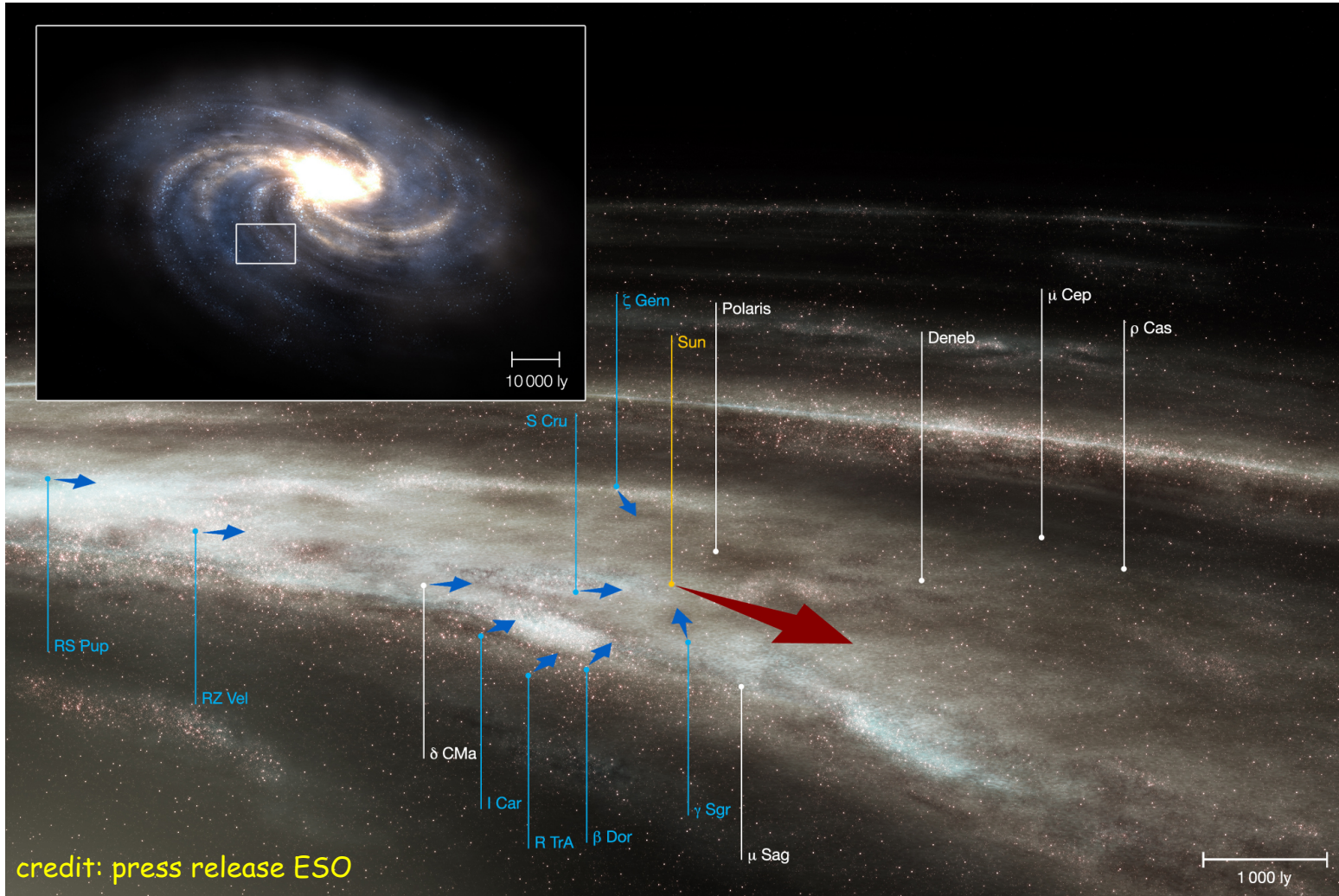
. utilisation de la décomposition du p-facteur pour l'interprétation

. point clef: utilisation de la relation entre le gradient de vitesse et l'amplitude de la courbe de vitesse des étoiles pulsantes



La rotation de la Voie Lactée

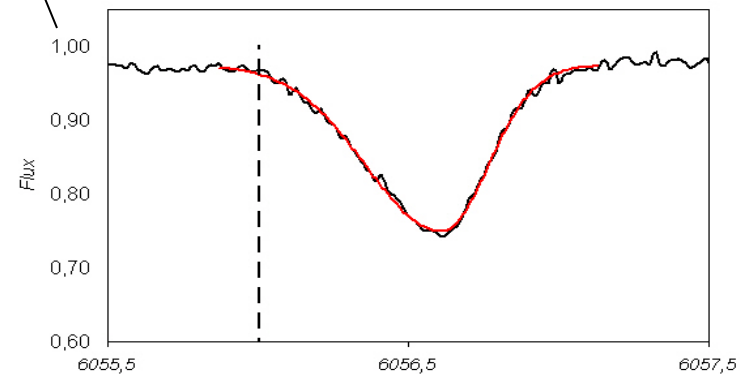
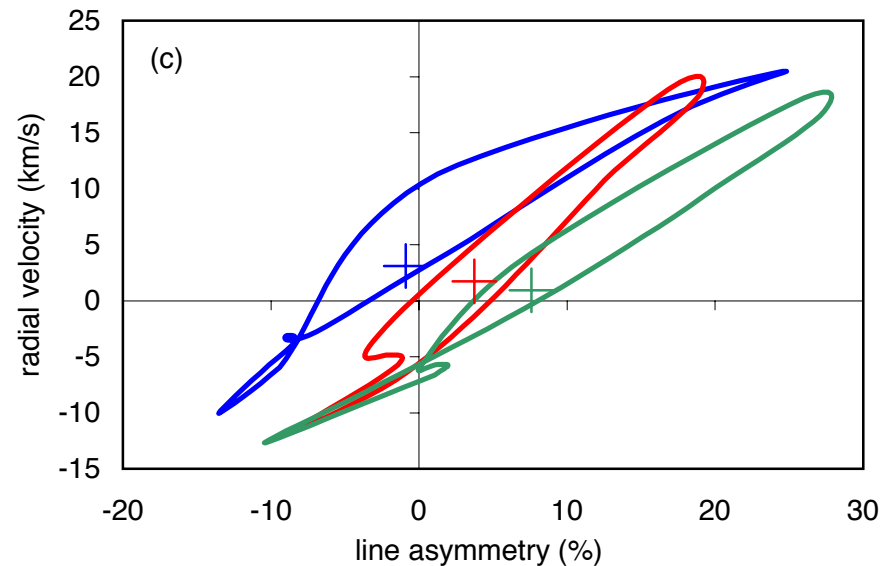
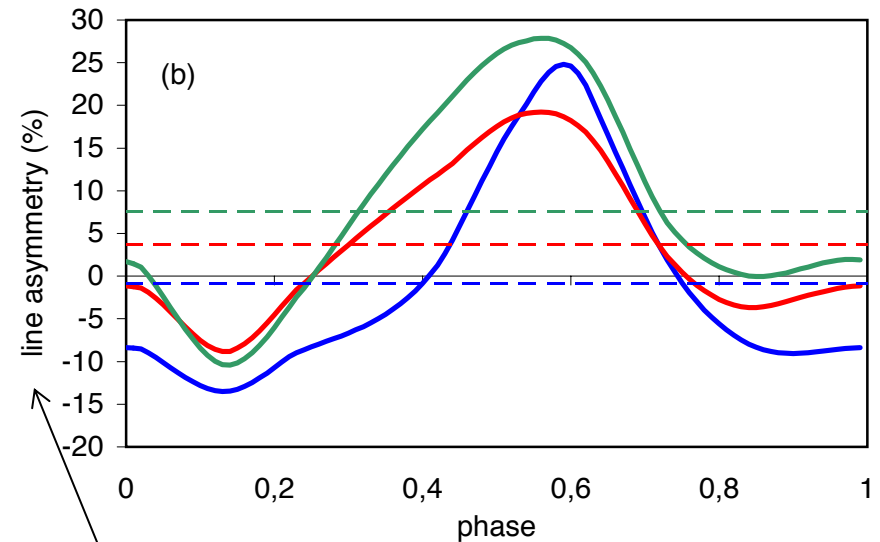
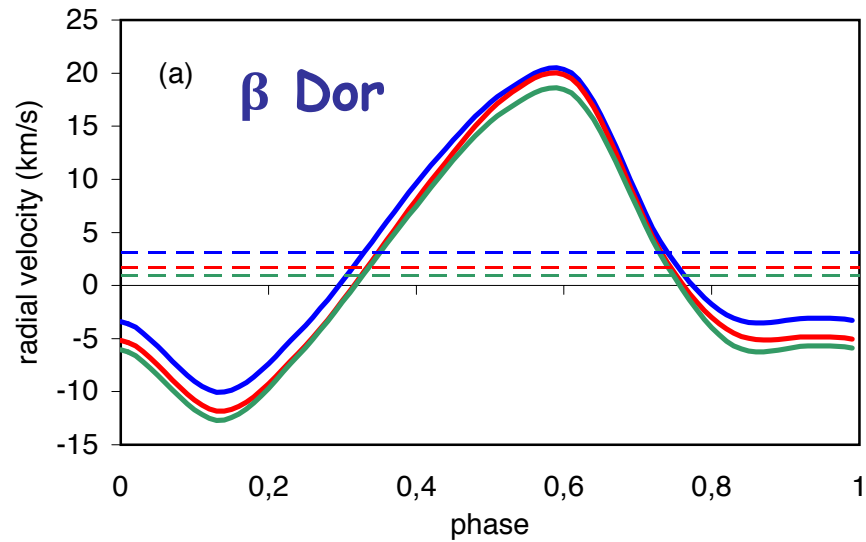
L'énigme du « K-term » des Céphéides : Joy (1939)



Un débat de 70 ans : Parenago (1945), Stibbs (1956), Wielen (1974), Caldwell & Coulson (1987), Moffett & Barnes (1987), Wilson et al. (1991), Pont, Mayor & Burki (1994)

dynamique atmosphérique OU structure
vélocimétrique de la Voie Lactée?

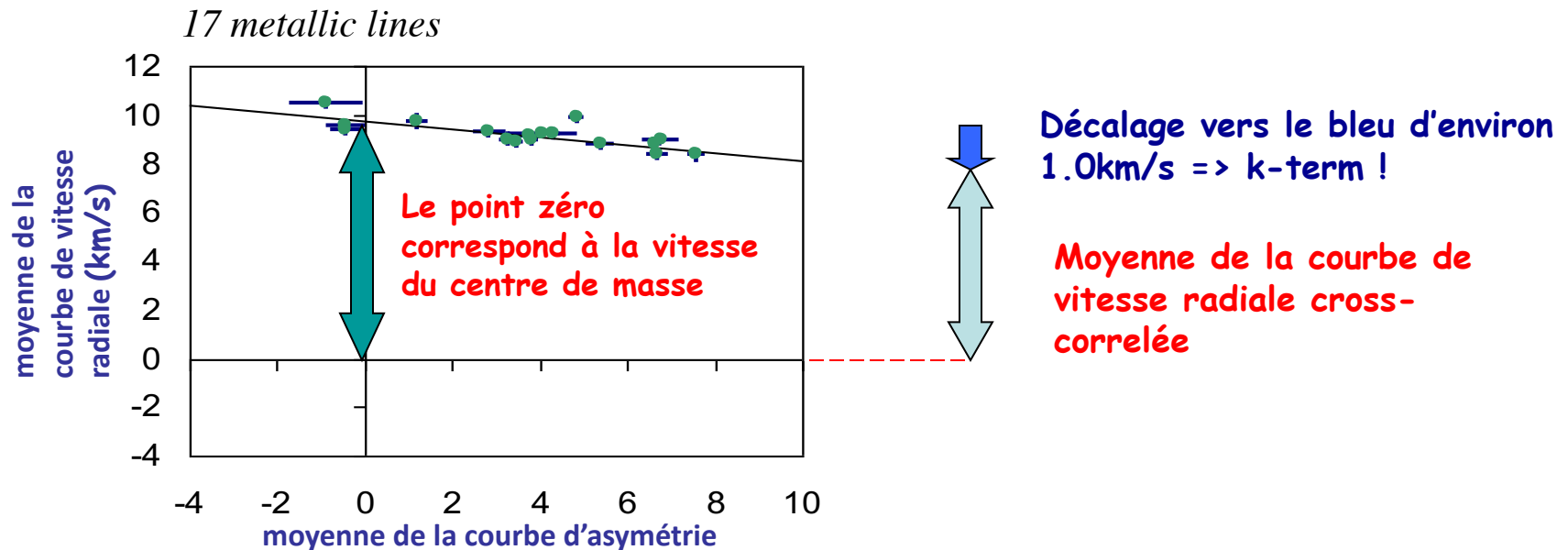
Comment séparer la vitesse du centre-de-masse et la vitesse intrinsèque liée à la pulsation de l'étoile ?



High-resolution spectroscopy for Cepheids distance determination★,★★ 2008, A&A, 489, 1255

III. A relation between γ -velocities and γ -asymmetries

N. Nardetto¹, A. Stoekl², D. Bersier³, and T. G. Barnes^{4,5}



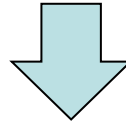
Conclusion:

1. le k-term est une propriété intrinsèque des Céphéides !
2. L'origine du k-term est démontrée par Vasilyev+17 => Granulation !
NB: il y a une part de « p-facteur » dans le « k-facteur »
3. Il reste à quantifier l'impact du k-facteur sur la distance de BW...

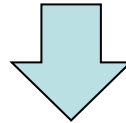
Résumé des perspectives

Physique des étoiles pulsantes (Gaia)
et de leur environnement (MATISSE/VLTI)

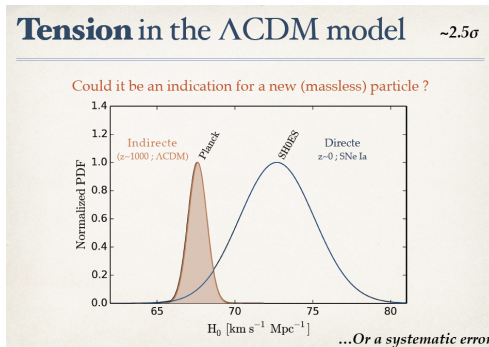
Relation brillance de surface - couleur + activité stellaire
(SPICA/CHARA + PLATO)
et méthode des binaires à éclipses



Relation période-luminosité des Céphéides dans le groupe local
Implications pour le JWST et l'ELT



Projet SHOES. La constante de Hubble à 1-2 %.



« Le silence éternel de ces espaces infinis m'effraie » Pascal

Millennium Simulation

10.077.696.000 particles

Merci à tous...