

ACTIVITÉ STELLAIRE ET TRANSITS VUS PAR L'INTERFÉROMÉTRIE

Roxanne LIGI
Doctorante sous la direction de Denis MOURARD
Laboratoire Lagrange, OCA.

PLAN

- I. Exoplanètes en transit
 1. Contexte
 2. Echantillon d'étoiles
 3. Variations des paramètres pour les bases limites

- II. Activité stellaire
 1. Origine et caractéristiques
 2. Différences principales avec les modèles d'exoplanètes
 3. Exemples

I. EXOPLANÈTES ET TRANSITS

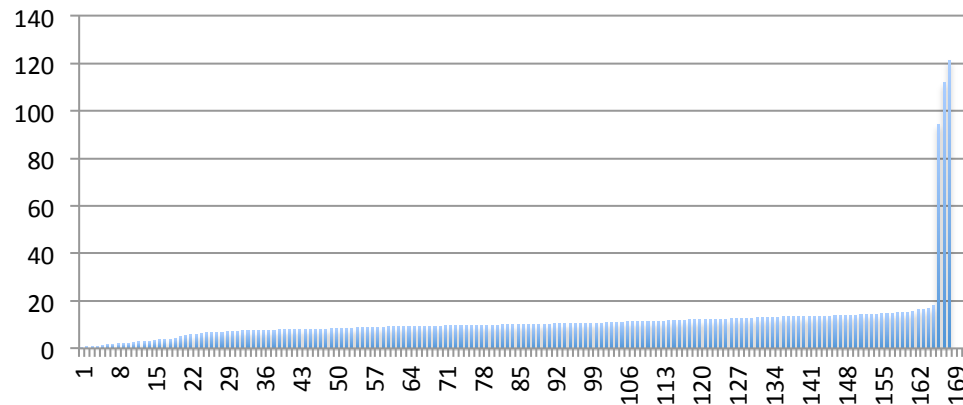
- Aujourd'hui, plus de 800 exoplanètes détectées.
- Plusieurs méthodes :
 - Vitesses radiales (RV) : la plus fructueuse
 - Méthode des transits
 - Astrométrie
 - Microlentille gravitationnelle
- Cependant, beaucoup de difficultés à les caractériser : R_{pl} , $v \sin i$, M_{pl} ...difficiles à obtenir de façon précise. Ceci est du en partie à cause du manque d'information sur les étoiles.
- En combinant l'interférométrie et le méthode des RV, on peut déterminer précisément $M_{pl} \sin i$.
- Peut-on déterminer directement R_{pl} avec l'interférométrie ?



I. EXOPLANÈTES ET TRANSITS

- Quels critères utiliser ?
 - Besoin du diamètre angulaire de l'étoile θ_*
 - Besoin du diamètre angulaire de l'exoplanète θ_{pl}
- Sur 862 planètes, seules 173 ont un rayon et une distance connus.
- Seules 169 ont un rayon, une distance connus et le rayon de l'exoplanète connu aussi.

Rapport entre le diamètre de la Planète et celui de l'étoile en %



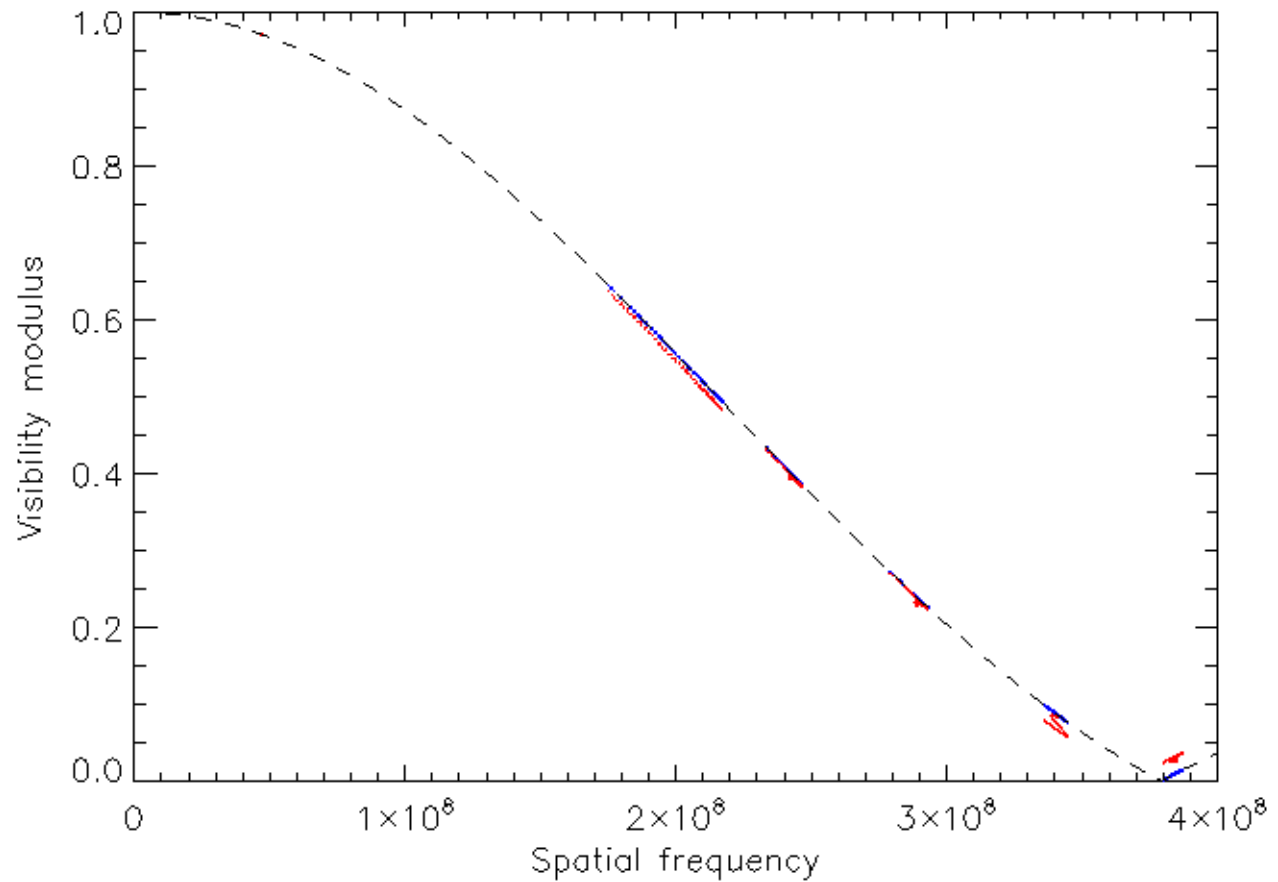
I. EXOPLANÈTES ET TRANSITS

- On veut étudier la variations des différents paramètres pouvant influencer le signal des exoplanètes en interférométrie.
- On fixe $\theta_* = 1$ mas, $I_{pl} = 0$. Variation :
 - De la position de l'exoplanète : entre 0 et 0.5 mas
 - Du diamètre de l'exoplanète : entre 0.04 et 0.24 mas
 - Des coefficients de Claret pour LD : entre 0.44 et 0.75.
- Pour chaque cas, on mesure la différence entre :
 - Le module de visibilité d'une étoile sans exoplanète (bleu) et d'une étoile avec exoplanète en transit (rouge)
 - 1% et 5% de différence
 - La phase d'une étoile sans exoplanète et d'une étoile avec exoplanète en transit
 - 2° et 20° de différence



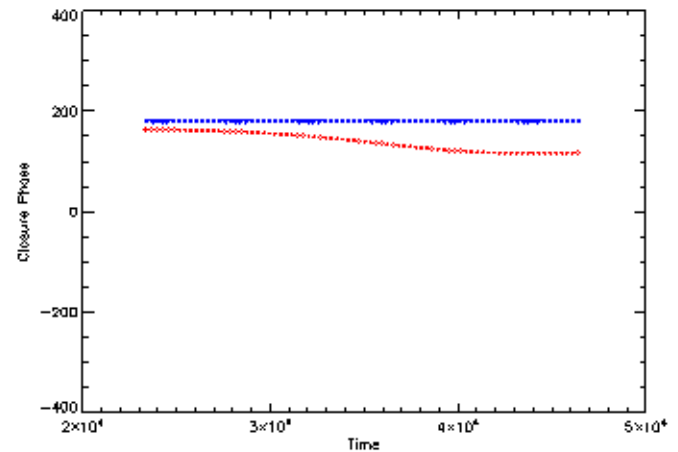
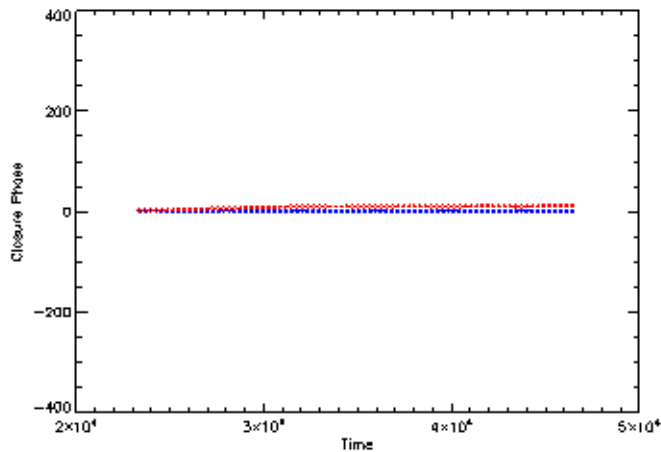
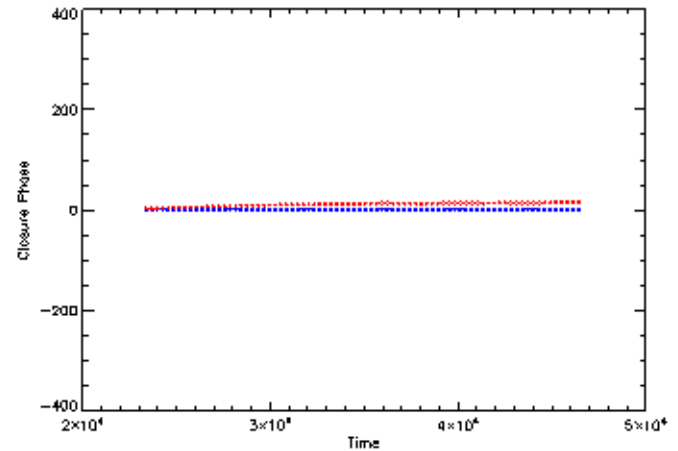
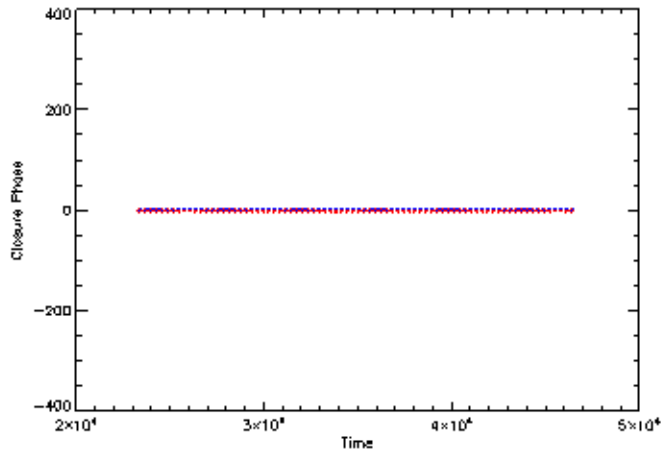
I. EXOPLANÈTES ET TRANSITS

- Exemple : visibilité de 55 Cnc



I. EXOPLANÈTES ET TRANSITS

- Exemple : clôtures de phase de 55 Cnc



I. EXOPLANÈTES ET TRANSITS

Le modèle :

- Modèle analytique
- Etoile : disque assombri
- Planète : disque uniforme

• Formule :

$$DS_*(\vec{u}) = \alpha \frac{J_1(\pi\theta u)}{u} + \pi\theta\beta \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{J_{3/2}(\pi\theta u)}{(\pi\theta u)^{3/2}}$$

$$DS_t(\vec{u}) = \frac{J_1(\pi\theta_t u)}{u} \times N$$

$$DS_5(\vec{u}) = DS_*(u) - \left(1 - \frac{I_t}{I_*}\right) DS_t(u)$$

avec $N = (\cos(2\pi u_x x_t) \cos(2\pi u_y y_t) - \sin(2\pi u_x x_t) \sin(2\pi u_y y_t))$
 $+ i (\cos(2\pi u_x x_t) \sin(2\pi u_y y_t) + \sin(2\pi u_x x_t) \cos(2\pi u_y y_t))$

I. EXOPLANÈTES ET TRANSITS

Le modèle :

- Modèle analytique
- Etoile : disque assombri
- Planète : disque uniforme

• Formule :

$$DS_*(\vec{u}) = \alpha \frac{J_1(\pi\theta u)}{u} + \pi\theta\beta \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{J_{3/2}(\pi\theta u)}{(\pi\theta u)^{3/2}}$$

$$DS_t(\vec{u}) = \frac{J_1(\pi\theta_t u)}{u} \times N$$

$$DS_5(\vec{u}) = DS_*(u) - \left(1 - \frac{I_t}{I_*}\right) DS_t(u)$$

$$VS_5(\vec{u}) = \frac{\left[DS_*(u) - \left(1 - \frac{I_t}{I_*}\right) DS_t(u) \right]}{\left[\pi\theta \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{3} \right) - \left(1 - \frac{I_t}{I_*}\right) \frac{\pi\theta_t}{2} \right]}$$

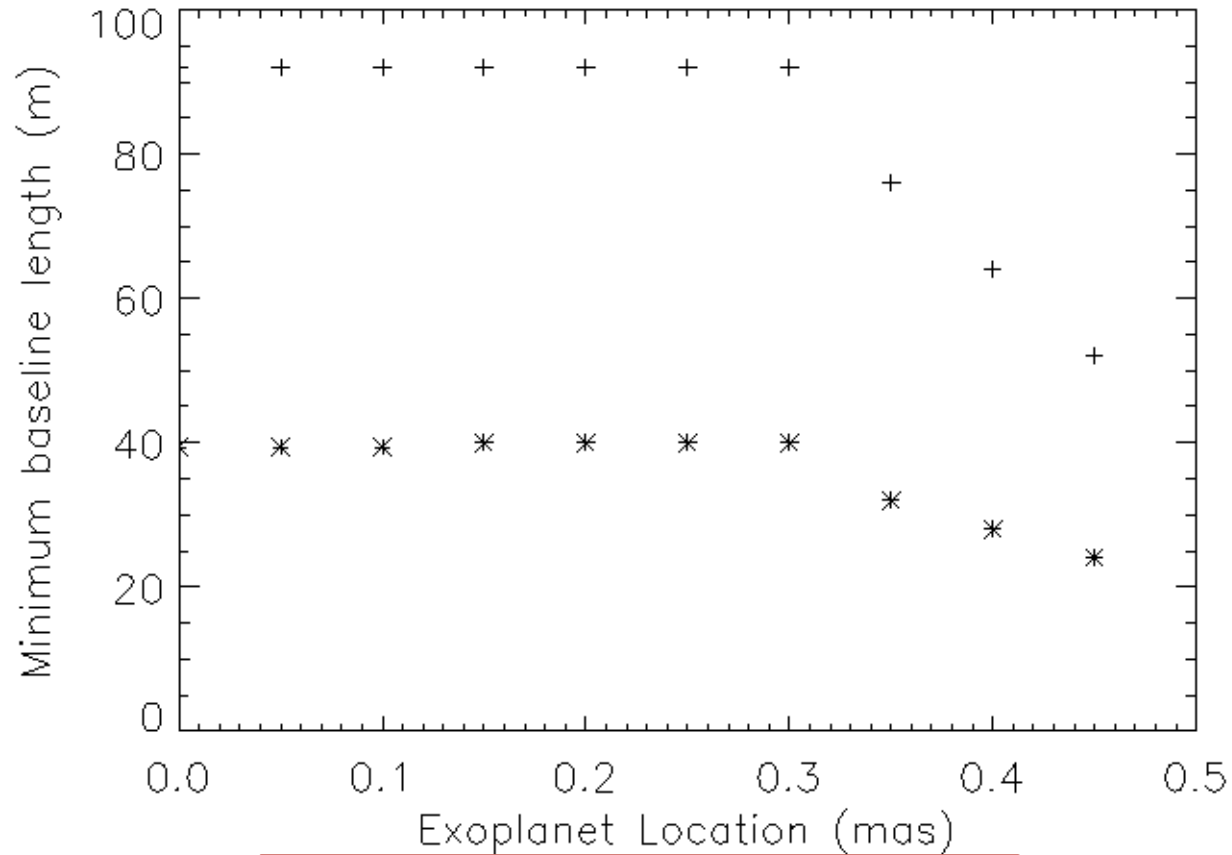
I. EXOPLANÈTES ET TRANSITS

Étude de la longueur de base minimale pour avoir un écart de visibilité donné (1% ou 5%) sur un échantillon statistique :

- Étoiles avec exoplanètes en transit observables par VEGA, soit $0.3 < \theta_* < 3$ mas, $\text{mag}_V < 10$, avec les bases de VEGA.

Planète	1%		5%	
	MBL(m)	Config	MBL(m)	Config
55 CNC e	139	S1E2×0.50	/	/
HD 97658 b	212	S1E2×076	/	/
HD 209458 b	165	S1E1×0.50	351	S1E1 ×1.06
HD 189733 b	126	W1E2×0.50	206	W1E2 ×0.82
HD 149026 b	317	S2E2×1.28	863	S2E2 ×3.48
HD 17156 b	248	E1W1×0.79	615	E1W2 ×1.96
KEPLER-21 b	1421	S2E1×4.70	/	/
WASP-33 b	332	S1E2×1.19	792	S1E2 ×2.84
KELT-2A b	335	S1E2×1.20	842	S1E2 ×3.02
HAT-P-2 b	418	S1E2×1.50	1068	S1E2 ×3.83
HD 80606 b	253	W1S2×0.91	615	W1S2 ×2.21
WASP-38 b	372	E1S2×1.23	907	E1S2 ×3.00
HAT-P-11 b	284	S1E2×1.02	733	S1E2 ×2.63
WASP-14 b	543	W1E2×2.16	1342	W1E2 ×5.34
KELT-3 b	538	W1E2.14	1307	W1E2 ×5.20
XO-3 b	803	E1W1×2.56	1928	E1W2 ×6.15
HAT-P-22 b	304	E1W1×0.97	718	E1W1 ×2.29
HAT-P-14 b	666	W1E2×2.65	1633	W1E2 ×6.50

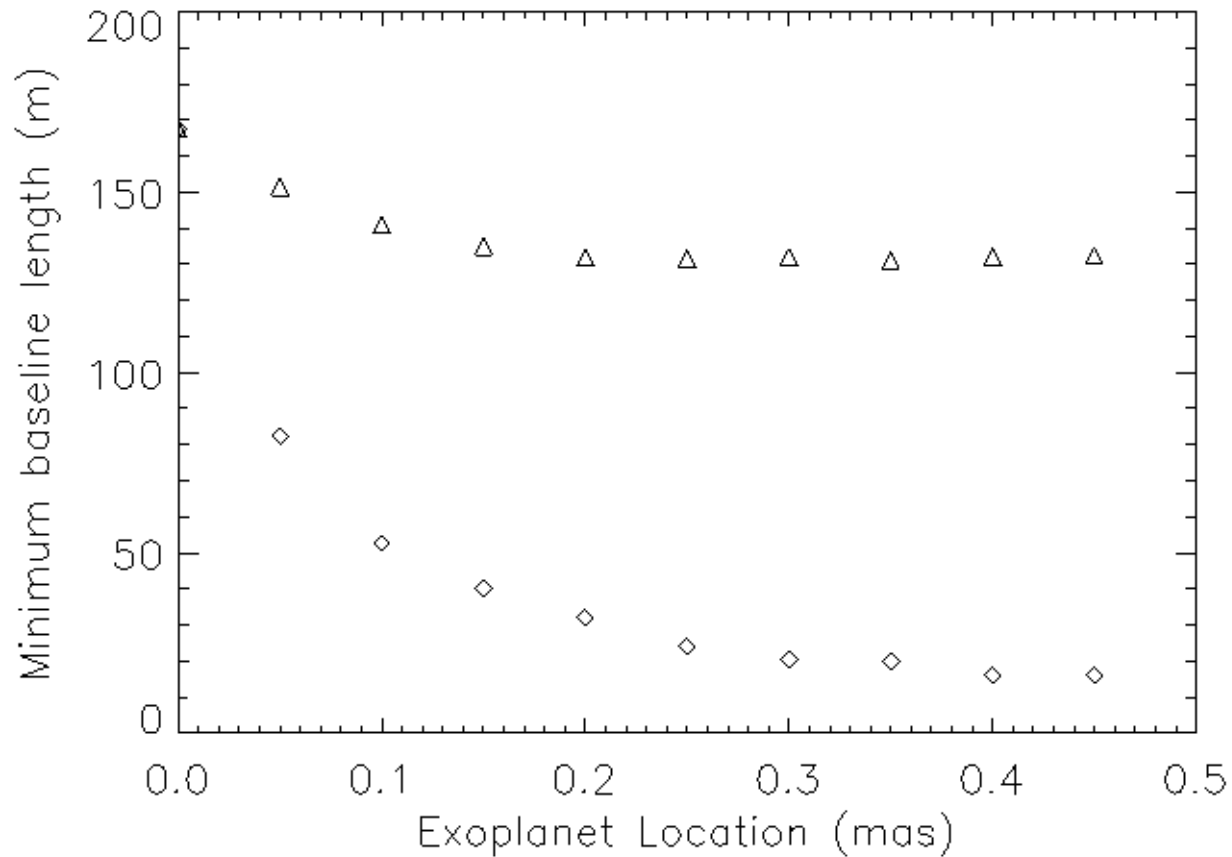
Variation de la position de l'exoplanète



MBL stable jusqu'à 0.3 mas pour les visibilités, et à partir de 0.3 mas pour les phases.

+ 1% de precision
* 5% de précision

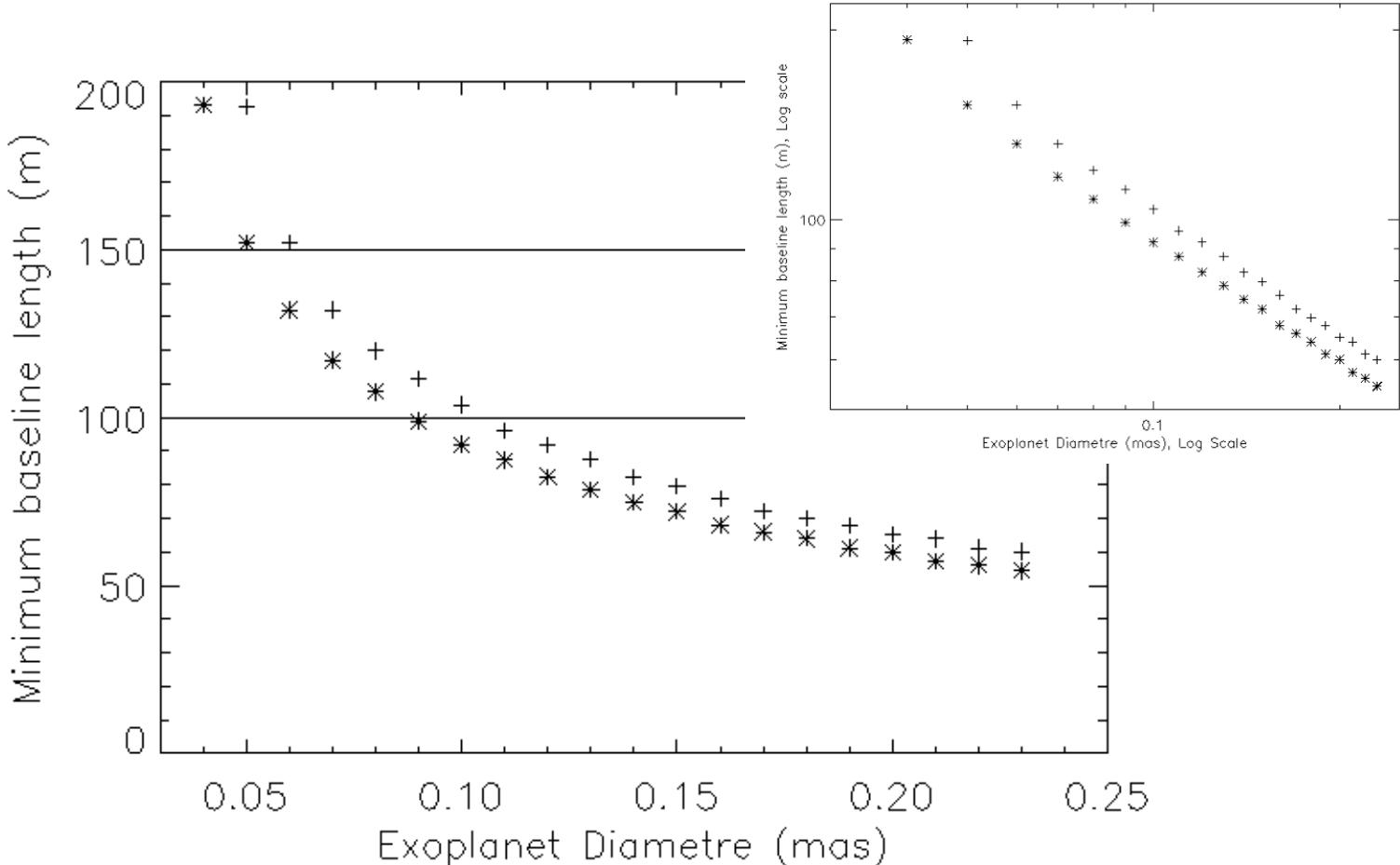
Variation de la position de l'exoplanète



MBL stable jusqu'à 0.3 mas pour les visibilités, et à partir de 0.3 mas pour les phases.

△ 2° de précision
◇ 20° de précision

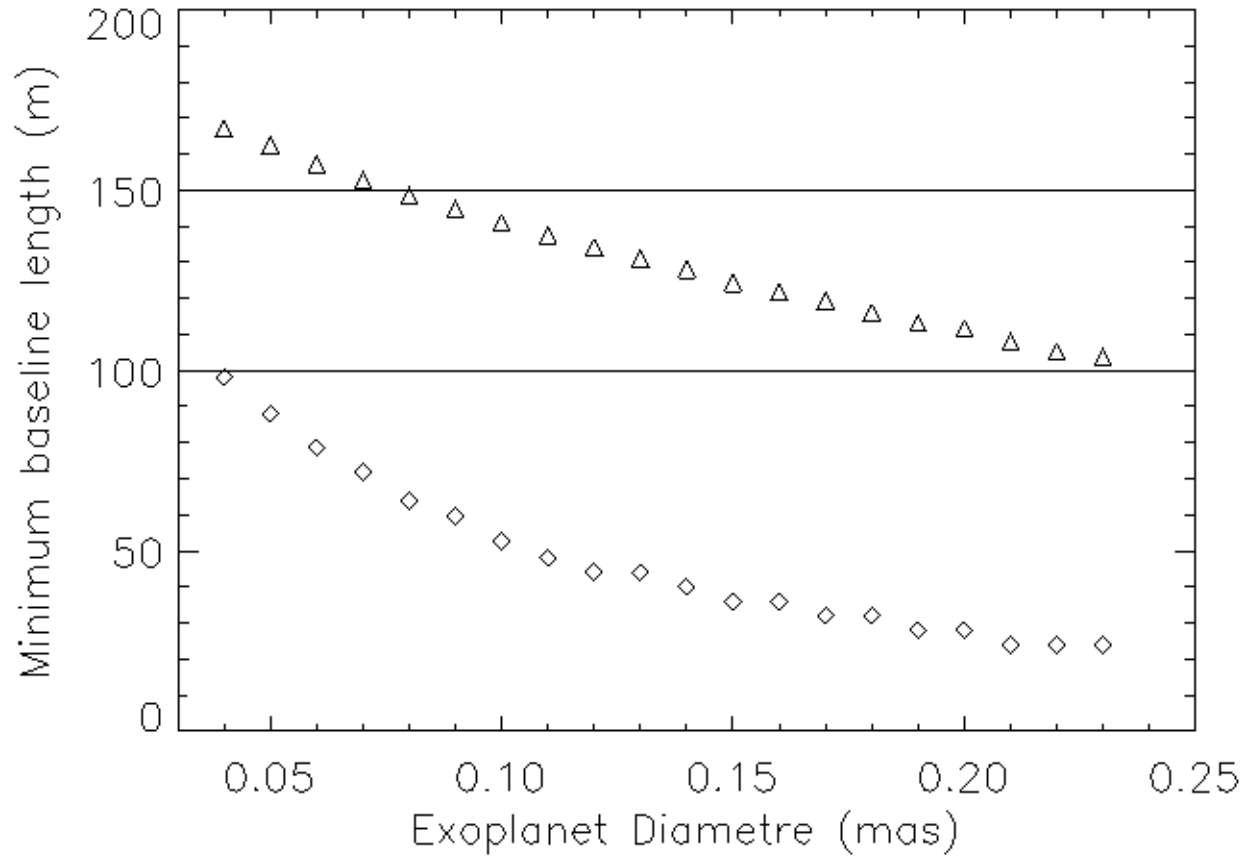
Variation du diamètre de l'exoplanète



MBL semble suivre une loi de puissance pour les visibilité.

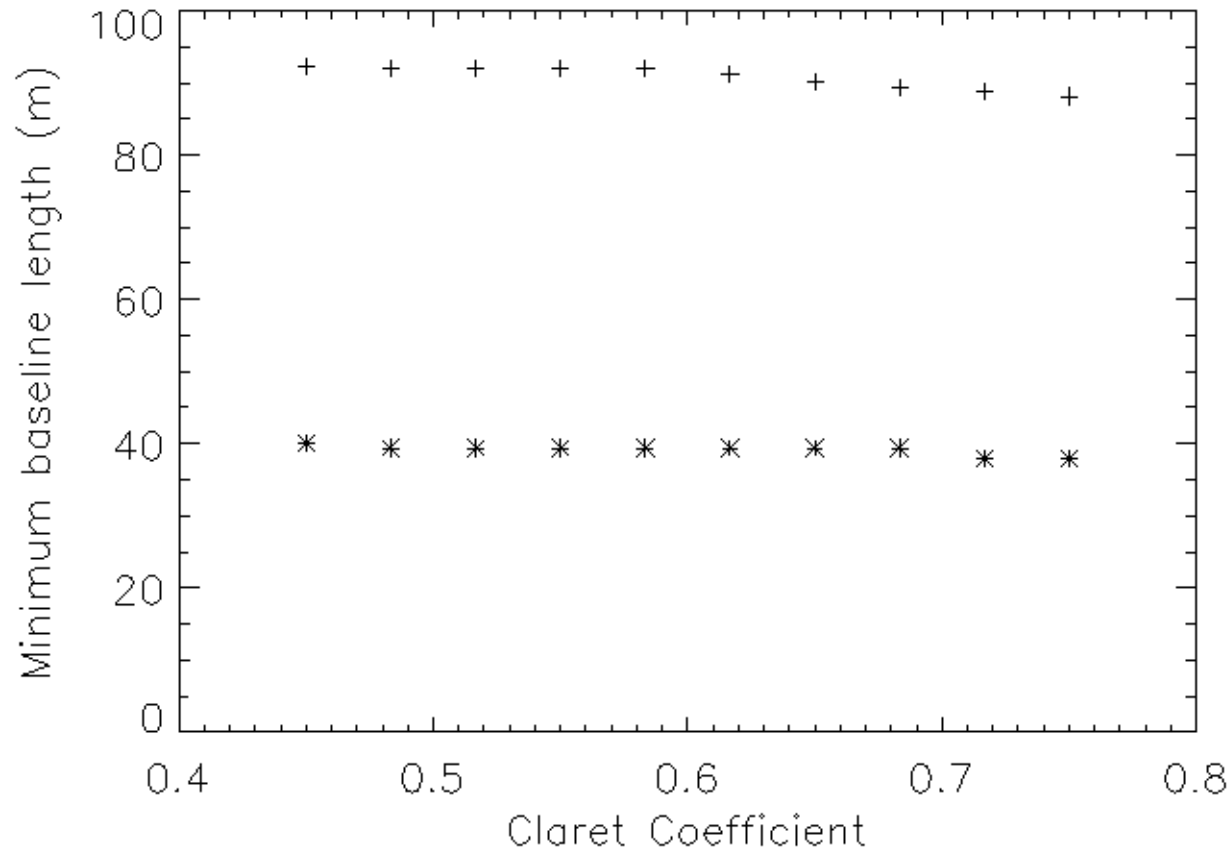
+ 1% de précision
* 5% de précision

Variation du diamètre de l'exoplanète



- △ 2° de précision
- ◇ 20° de précision

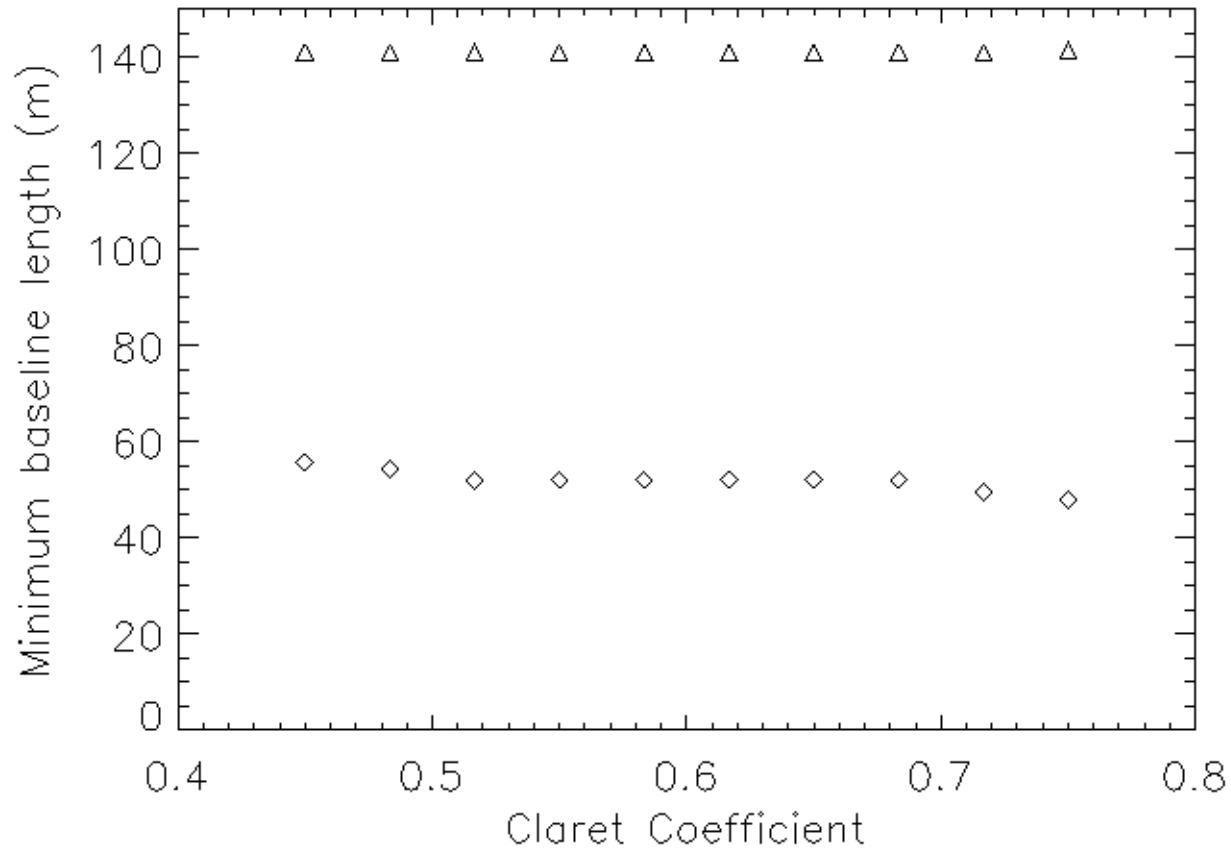
Variation des coefficients de Claret



Indépendant des coefficients de Claret

+ 1% de precision
* 5% de précision

Variation des coefficients de Claret



Indépendant des coefficients de Claret

- △ 2° de précision
- ◇ 20° de précision

I. EXOPLANÈTES ET TRANSITS

Conclusion :

- La précision nécessaire dépend surtout de la position de l'exoplanète sur le disque stellaire et de son diamètre.
- Les bases nécessaires existent dans certains cas : bonne nouvelle ! (θ_{pl} suffisamment grands et 1% de différence dans les visibilitées...)
- Détermination d'une loi de puissance pour connaître la longueur de base nécessaire en fonction de θ_*/θ_{pl} et du seuil de précision.



II. ACTIVITÉ STELLAIRE

- Origine des taches magnétiques :
 - Champ magnétique dipolaire dans les étoiles
 - Rotation différentielle
 - Convection
- Caractéristiques :
 - Se trouvent souvent par paires
 - Entre 200K et 2000K plus froides que l'étoile (suivant le type d'étoile)
 - Taille : entre 0.1 et 11% de la surface du disque solaire, et jusqu'à 30%. Record de 60%.
 - Emission du triplet du CaII (Gaia)
- Se trouvent sur des étoiles actives généralement.
(Berdyugina 2005, 2009).



II. ACTIVITÉ STELLAIRE

Différences avec les transits :

- Représentées par des disques assombris
 - Besoin de coefficients de Claret aussi pour les tache
- Paramètres (taille,..) et surtout l'intensité : elle varie suivant la température de la tache :

$$T_{\text{eff},t} = \left(\frac{I_t}{\sigma} \right)^{1/4} = \left(\frac{nI_*}{\sigma} \right)^{1/4} = n^{1/4} T_{\text{eff},*}$$

$$n = x\% \text{ tel que } I_t = nI_*$$

Le fait d'avoir une diamètre assombri ne change pas significativement les résultats, c'est surtout l'intensité de la tache I_t qui est importante. On considère donc que les MBL varient de la même manière que pour les exoplanètes.

II. ACTIVITÉ STELLAIRE

Différences avec les transits :

- Nouvelle formule :

$$DS_*(\vec{u}) = \alpha \frac{J_1(\pi\theta u)}{u} + \pi\theta\beta \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{J_{3/2}(\pi\theta u)}{(\pi\theta u)^{3/2}}$$

$$DS_t(\vec{u}) = \left[\alpha_t \frac{J_1(\pi\theta_t u)}{u} + \pi\theta_t\beta_t \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{J_{3/2}(\pi\theta_t u)}{(\pi\theta_t u)^{3/2}} \right] \times N$$

$$DS_4(\vec{u}) = DS_*(u) - \left(1 - \frac{I_t}{I_*} \right) DS_t(u)$$

$$N = (\cos(2\pi u_x x_t) \cos(2\pi u_y y_t) - \sin(2\pi u_x x_t) \sin(2\pi u_y y_t)) \\ + i (\cos(2\pi u_x x_t) \sin(2\pi u_y y_t) + \sin(2\pi u_x x_t) \cos(2\pi u_y y_t))$$

II. ACTIVITÉ STELLAIRE

Différences avec les transits :

- Nouvelle formule :

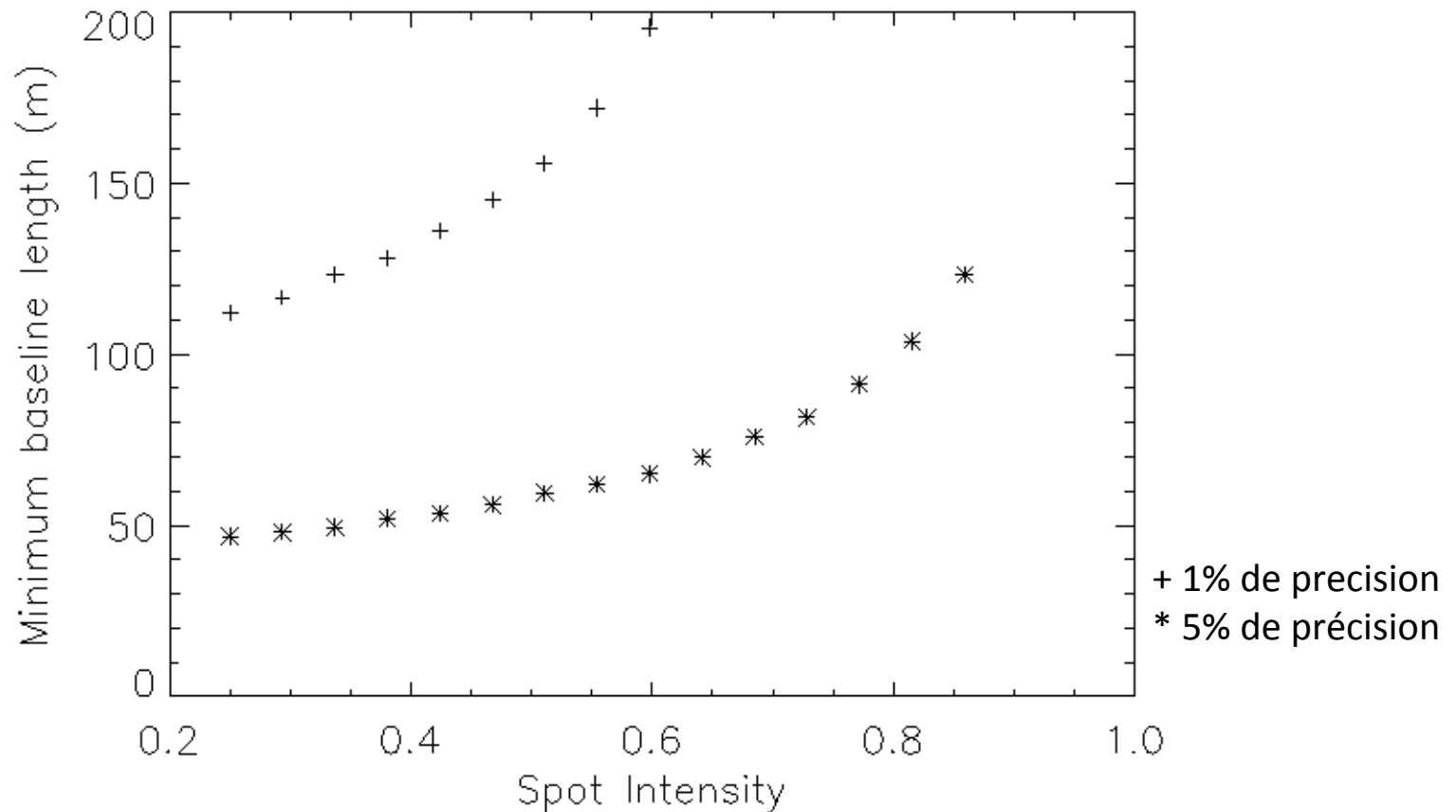
$$DS_*(\vec{u}) = \alpha \frac{J_1(\pi\theta u)}{u} + \pi\theta\beta \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{J_{3/2}(\pi\theta u)}{(\pi\theta u)^{3/2}}$$

$$DS_t(\vec{u}) = \left[\alpha_t \frac{J_1(\pi\theta_t u)}{u} + \pi\theta_t\beta_t \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{J_{3/2}(\pi\theta_t u)}{(\pi\theta_t u)^{3/2}} \right] \times N$$

$$DS_4(\vec{u}) = DS_*(u) - \left(1 - \frac{I_t}{I_*} \right) DS_t(u)$$

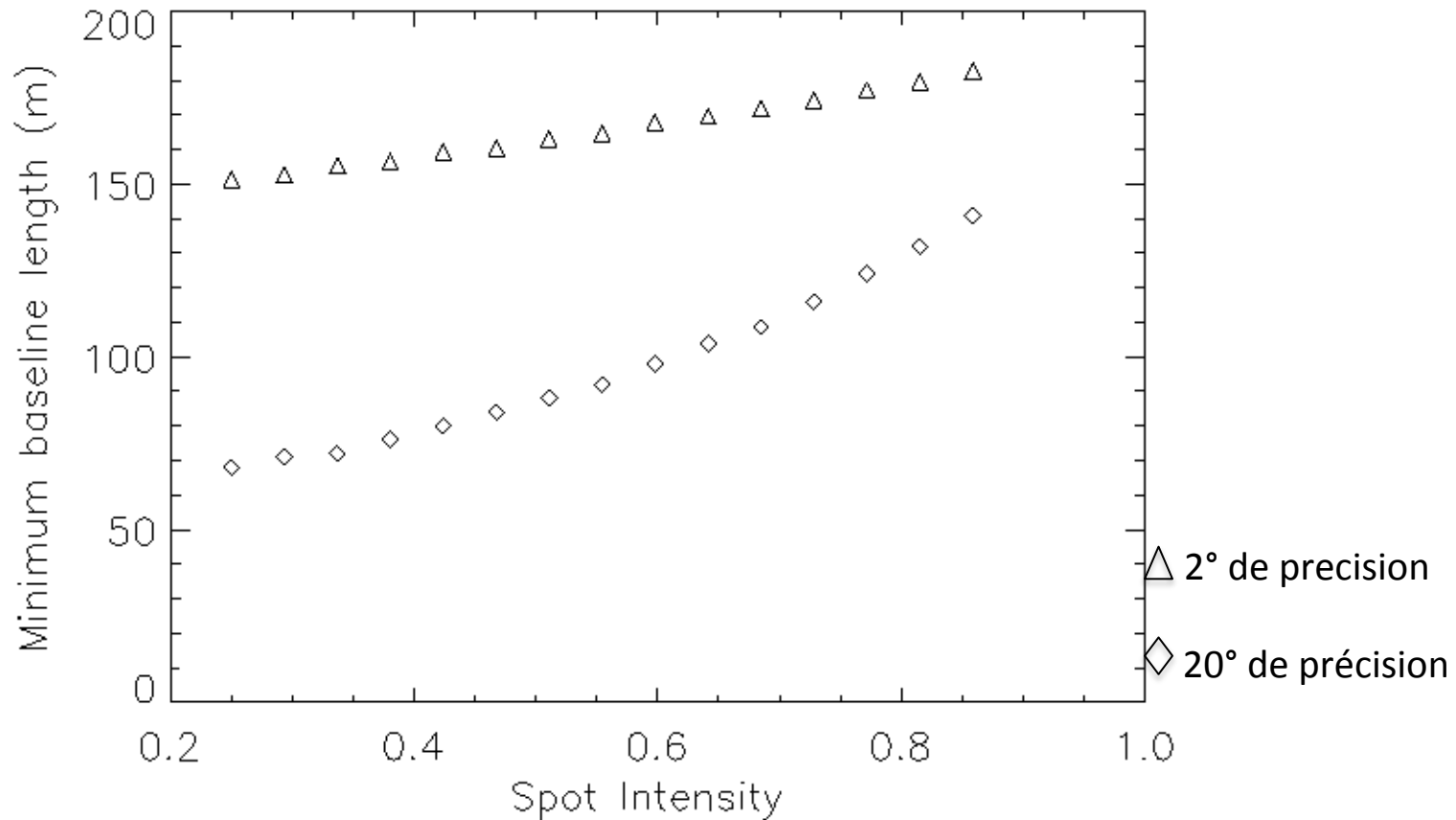
$$VS_4(\vec{u}) = \left[DS_*(u) - \left(1 - \frac{I_t}{I_*} \right) DS_t(u) \right] / \left[\pi\theta \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{3} \right) - \left(1 - \frac{I_t}{I_*} \right) \pi\theta_t \left(\frac{\alpha_t}{2} + \frac{\beta_t}{3} \right) \right]$$

Variation de l'intensité de la tache



Plus I_t est grande, plus la base nécessaire est grande. Ceci s'explique par le contraste qui devient plus petit.

Variation de l'intensité de la tache



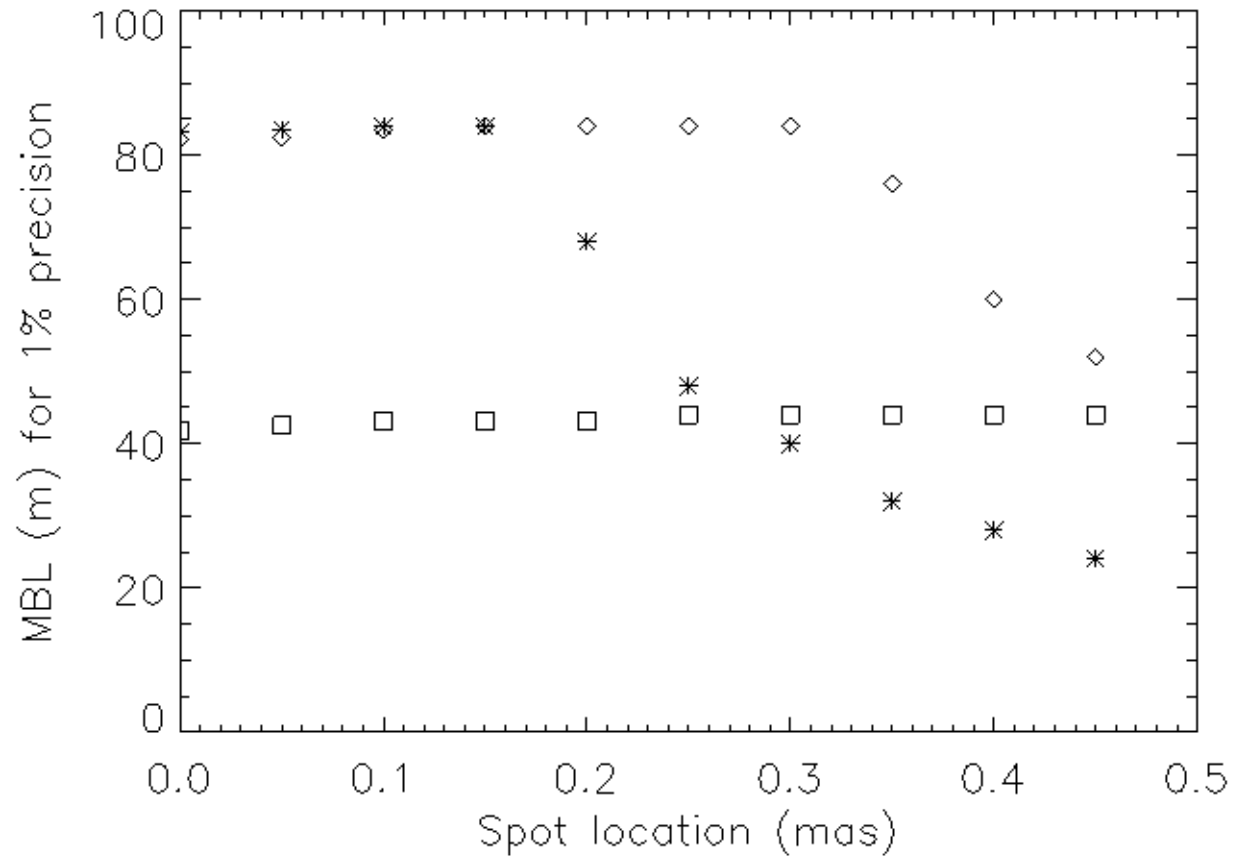
Plus I_t est grande, plus la base nécessaire est grande. Ceci s'explique par le contraste qui devient plus petit.

II. ACTIVITÉ STELLAIRE

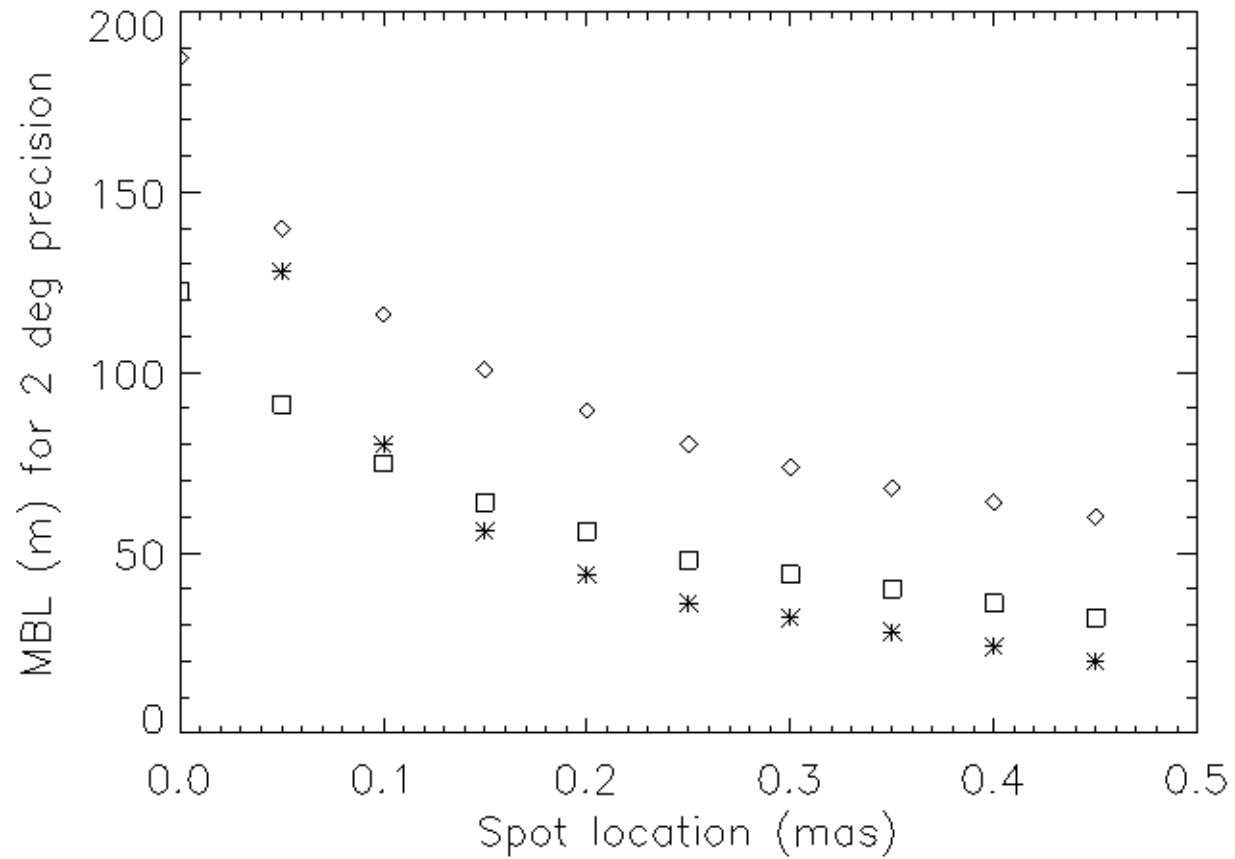
Exemples

- Trois cas différents que l'on pourrait rencontrer.
 - Type solaire : G2V, $T_{\text{eff}}=5780$ K, $T_{\text{eff,t}} = 5230$ K, $I_t = 0.67$ (◇)
 - TX Pic : K2III, $T_{\text{eff}}=5000$ K, $T_{\text{eff,t}} = 3500$, $I_t = 0.24$ (□)
 - Exemple intermédiaire, $T_{\text{eff}}=7364$ K, $T_{\text{eff,t}} = 6192$, $I_t = 0.5$ (*)

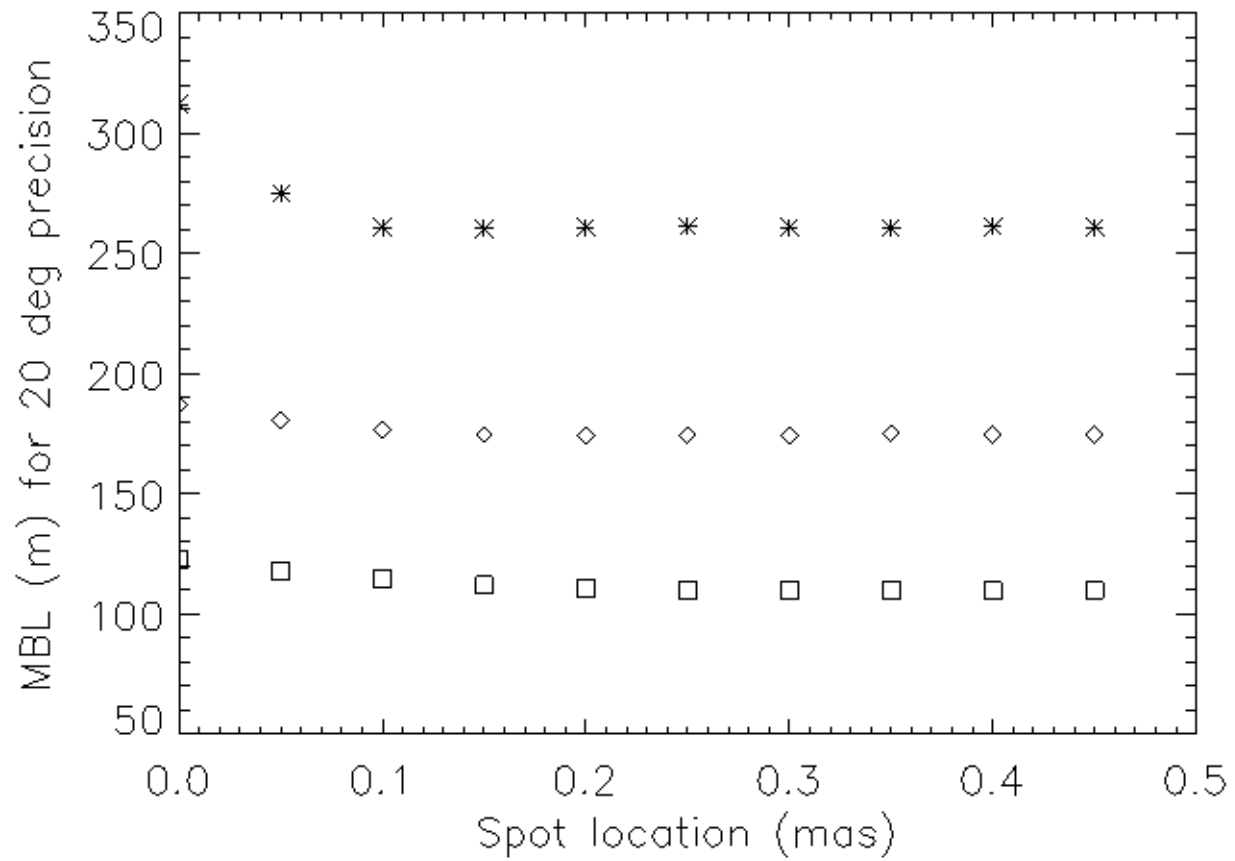
Variation de la position de la tache



Variation de la position de la tache



Variation de la position de la tache



II. ACTIVITÉ STELLAIRE

Conclusion :

- Variations d'autres paramètres : longueur d'onde, précision...
- Quels interféromètres peuvent être utilisés ? VEGA ? MIRC ? ...
- Plusieurs taches ?
- Injection des fichiers oifits créés par ASPRO 2 dans LITpro pour obtenir les observables.

- Besoin d'observer des magnitudes élevées ($V > 10$) pour les transits.
- Ajout de la convection ? (modèle numérique)



Merci !

