

Simulations préliminaires pour HIPIC-CIAO@C2PU

M. Carbillet

September 11, 2015

1 CIAO : budget d'erreur basique

L'erreur de sous-échantillonnage spatial (ou *fitting error*) est l'erreur ultime d'un système d'OA, i.e. celle qui reste même quand on a tout parfaitement mesuré ce que l'on devait mesurer, et que la correction correspondante a été parfaitement effectuée. On peut en avoir une première idée avec, pour CIAO@C2PU :

$$\sigma_{\text{fit.}} = \frac{\lambda}{2\pi} k_{\text{fit.}} \left(\frac{D}{r_0(\lambda)} \right)^{\frac{5}{6}} . \quad (1)$$

En supposant l'hypothèse simplificatrice de géométrie de Fried [2], avec $n \times n$ sous-ouvertures, et donc $(n+1) \times (n+1)$ actionneurs disposés selon une grille orthogonale où les actionneurs sont disposés aux coins des sous-ouvertures. On déduit la formule précédente en utilisant la fameuse formule de Noll [1], avec $(n+1)(n+2)/2 - 1$ modes de Zernike (piston exclu) parfaitement mesurés et corrigés. Ce qui donne donc ici, avec un r_0 de 10 cm à 500 nm : ~ 50 nm dans le cas $n=10$ (65 modes de Zernike, $k_{\text{fit.}}=0.0890$), et ~ 59 nm dans le cas $n=8$ (44 modes de Zernike, $k_{\text{fit.}}=0.0965$).

On peut pousser le bouchon un peu plus loin pour évaluer cette mesure/correction idéale des 65 premiers modes de Zernike de l'atmosphère turbulente au-dessus de C2PU, en simulant l'atmosphère turbulente (modèle de von Karman \Rightarrow on prend en compte \mathcal{L}_0 aussi cette fois-ci) et en calculant le rms sur la pupille de chaque front d'onde (après projection sur les Zernike et soustraction du front d'onde ainsi idéalement mesuré) pour, e.g., une centaine de réalisations indépendantes. Le résultat est montré Fig. 1 (avec un exemple de front d'onde corrigé, et la moyenne de ce rms correspond grosso modo au résultat de l'équation 1 : ~ 49 nm dans le cas $n=10$ (~ 57 nm dans le cas $n=8$).

On peut aussi anticiper que l'on ne corrigera pas tous les modes mesurables pour des magnitudes trop élevées de l'étoile guide utilisée pour nourrir le système (en se plaçant dans le cadre simple pour commencer d'une commande de type "intégrateur pure")... La même simulation pour 6 ordres radiaux (27 modes de Zernike), donne ~ 70 nm.

Le modèle d'atmosphère turbulente utilisé pour cette évaluation et les suivantes est rapporté tableau 1. La modélisation est celle implémentée [8] dans le Software Package CAOS [5], développé au sein de l'homonyme CAOS Problem-Solving Environment [4, 9].

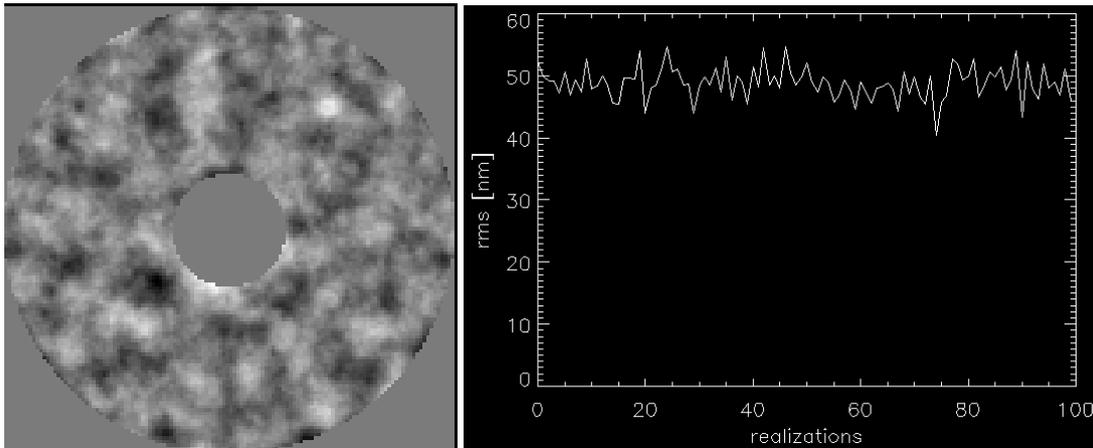


Figure 1: Exemple de front d'onde corrigé (à gauche) et résultat de la simulation Monte-Carlo (à droite) concernant le rms du front d'onde résiduel dû au *fitting error*, tel que décrit dans le paragraphe 1, et pour le cas $n=10$.

Altitude [km]	C_N^2 [%]
0	69
0.5	10
3	4
6	9
10	4
13	2
16.5	2
<hr/>	
r_0 [cm]	10.0
τ_0 [ms]	3.00
\mathcal{L}_0 [m]	27.0

Table 1: Modèles de profil du C_N^2 (tiré à la louche de Voyez et al. [10]), et autres paramètres atmosphériques utilisés dans les simulations.

On peut, tant qu'on y est, évaluer aussi l'erreur temporelle (ou *servo-lag error*) [3]:

$$\sigma_{\Delta t} = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{\Delta t}{\tau_0(\lambda)} \right)^{\frac{5}{6}}. \quad (2)$$

Ce qui donne donc ici, en prenant un Δt de, respectivement, 2 ms, 3 ms et 5 ms : 57 nm, 80 nm et 122 nm.

La somme des erreurs sur le front d'onde étant quadratique, ceci nous donne déjà de 75 nm à 135 nm d'erreur "de base".

2 Simulations semi-analytiques avec PAOLA

On utilise ici PAOLA [6, 7], version 7.3, qui permet de simuler de manière semi-analytique le filtrage dû au système d'OA, et donc des erreurs non-incluses dans ce qui précède (notamment celles liées à l'ASO¹ : l'erreur de repliement de spectre (ou *aliasing error*) et l'erreur de mesure (ou *measurement error*)²), ainsi que l'effet de clôture de la boucle, et ceci avec les caractéristiques supplémentaires (par rapport à celles de l'atmosphère données dans le tableau 1) données dans le tableau 2. On évalue ensuite les performances en axe du système.

vent au sol [m/s]	5
vent en altitude [m/s]	10
$d_{DM} = d_{ASO}$ [cm]	10.4
λ_{ASO} [nm]	709
$\Delta\lambda_{ASO}$ [nm]	158
transmission jusqu'à l'ASO	0.3
retard de la boucle [ms]	0.5
σ_e (RON) [e^-/px]	1

Table 2: Paramètre globaux relatifs au système d'OA standard simulé sous PAOLA.

magnitude en R	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Δt de l'ASO [ms]	0.1	0.26	0.6	1.3	2.6	5.0	9.4	17	30	54	97	179	356
gain intégrateur	0.14	0.26	0.44	0.68	1.0	1.3	1.5	1.7	1.9	2.0	2.1	2.1	2.1
<i>fitting error</i> [nm]	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
<i>aliasing error</i> [nm]	23	23	23	23	22	21	20	18	15	13	10	8	6
<i>servo-lag error</i> [nm]	17	19	22	27	36	50	72	107	158	233	343	500	721
<i>measurement error</i> [nm]	10	14	18	25	35	49	69	99	142	203	287	393	497
⇒ erreur globale [nm]	50	52	54	59	68	84	110	152	217	312	449	637	876
⇒ Strehl en H [%]	97	97	96	96	94	92	87	77	61	40	19	7	2.5

Table 3: Les paramètres du système optimisés par PAOLA en fonction de la magnitude de l'étoile guide : temps d'exposition de l'ASO et gain de l'intégrateur, pour 10×10 sous-ouvertures. Les erreurs résultantes sont également rapportées.

¹Analyseur de surface d'onde, ou *wavefront sensor*.

²Composée principalement de l'erreur due au bruit de photon, en $\frac{1}{N_{\text{phot}}}$, et de celle due au RON (*read-out noise*), en $\frac{\sigma_e^2}{N_{\text{phot}}^2}$.

magnitude en R	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Δt de l'ASO [ms]	0.06	0.15	0.35	1.3	2.6	3.4	6.6	12	22	40	71	127	234
gain intégrateur	0.09	0.17	0.30	0.68	1.0	1.1	1.4	1.6	1.8	1.9	2.0	2.1	2.1
<i>fitting error</i> [nm]	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
<i>aliasing error</i> [nm]	28	27	27	27	27	27	26	24	21	18	15	12	10
<i>servo-lag error</i> [nm]	18	19	22	25	31	42	59	86	128	190	281	413	602
<i>measurement error</i> [nm]	9	12	16	21	29	41	58	82	118	170	243	342	466
⇒ erreur globale [nm]	59	60	62	65	70	80	99	131	182	260	375	539	763
⇒ Strehl en H [%]	95	95	95	95	94	92	89	82	70	51	29	12	4

Table 4: Même chose que pour le tableau 3, mais pour 8×8 sous-ouvertures.

On constate des tableaux 3 et 4 que le *fitting error* calculé par PAOLA est plus optimiste que pour la simulation purement atmosphérique précédente : 40 nm au lieu de 49 nm dans le cas $n=10$. Il en va de même pour le *servo-lag error* : 27 nm pour un Δt optimisé par PAOLA de 1.8 ms pour la magnitude 7 (1.3 ms de temps d'exposition, 0.5 ms de retard global de la boucle). Les temps d'exposition optimisés par PAOLA paraissent également extrêmement élevés, en particulier pour les magnitude supérieures à 10–11 (d'où également une erreur temporelle qui croît fortement).

En attendant confirmation par des simulations *end-to-end* détaillées, on peut déjà avoir une idée globale, a priori optimiste cependant, des performances de CIAO en termes de rms du front d'onde et de rapport de Strehl en bande H (particulièrement intéressant pour HIPIC) en fonction de la magnitude de l'étoile guide. Notons que la configuration $n=8$ permet de gagner une demi-magnitude environ pour les magnitudes plus élevées, tout en ne faisant perdre que très peu en régime de fort flux (du moins en terme de Strehl en H).

Même en considérant une centaine de nm d'aberrations supplémentaires non-corrigées dans le budget global (et l'approximation de Maréchal valable), le Strehl en H ne baisse que de $\sim 15\%$.

References

- [1] Noll, R. 1976, J. Opt. Soc. Am., 66, 207
- [2] Fried, D. L., 1977, J. Opt. Soc. Am., 67, 370
- [3] Sandler, D. G., Stahl, S., Angel, et al. 1994, J. Opt. Soc. Am. A, 11 (2), 925
- [4] Carbillet, M., Vérinaud, C., Guarracino, M., et al. 2004, SPIE Proc., 5490, 550
- [5] Carbillet, M., Vérinaud, C., Femenía, B., et al. 2005, MNRAS, 356 (4), 1263
- [6] Jolissaint, L., Véran, J.-P., Conan, R. 2006, JOSA A 23, 2, 382
- [7] Jolissaint, L. 2010, Journal of the European Opt. Soc.: Rapid Pub., 5
- [8] Carbillet, M., & Riccardi, A. 2010, App. Optics, 49 (31), G47
- [9] Carbillet, M., Desiderà, G., Augier, E., et al. 2010, SPIE Proc., 7736, 773644
- [10] Voyez, J., Robert, C., Conan, J.-M., et al. 2014, Opt. Express, 22 (9), 10948

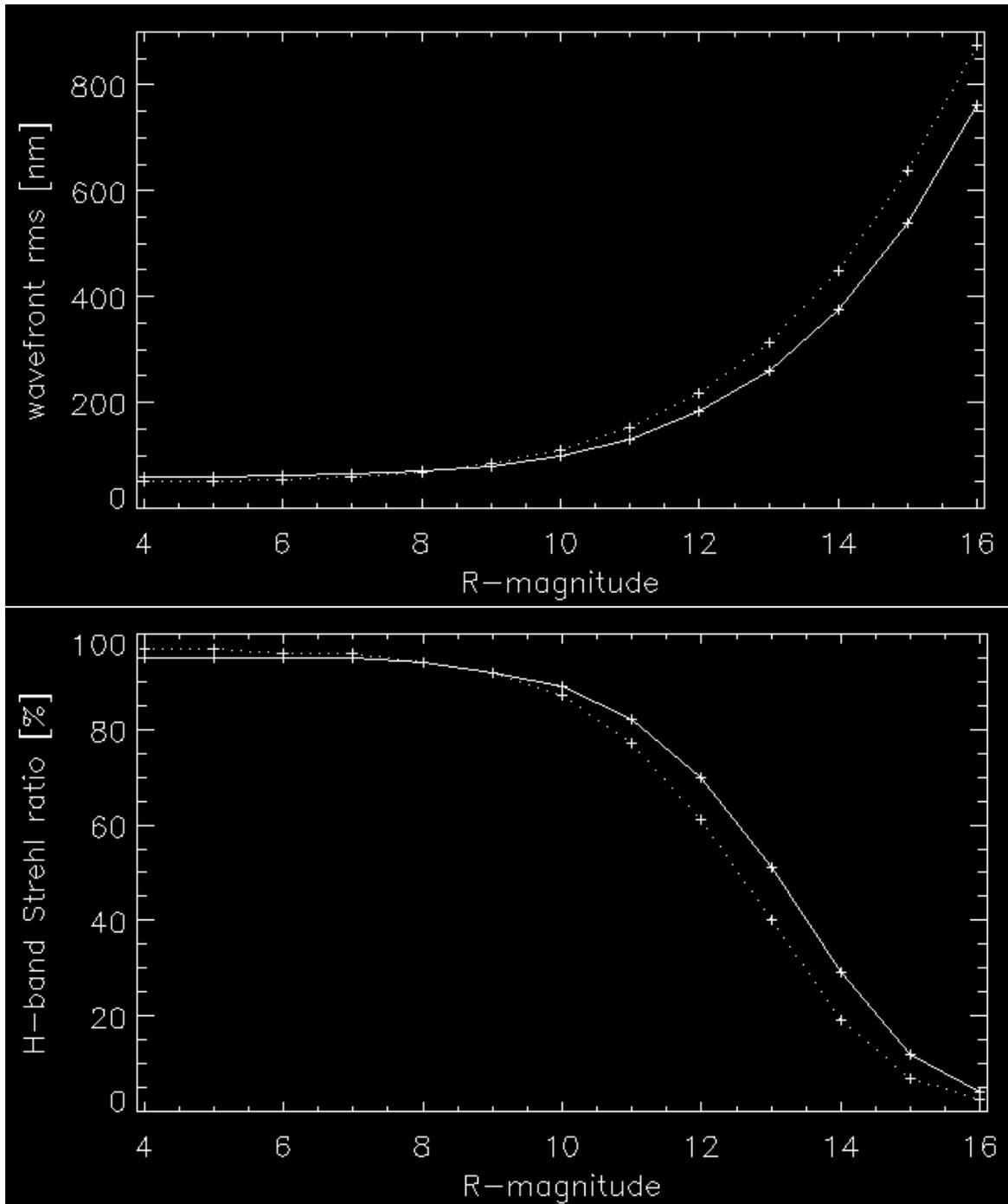


Figure 2: Performance de CIAO évaluées avec le code PAOLA, en termes de rms du front d'onde résiduel (en haut) et du rapport de Strehl en bande H (en bas), et pour le cas $n=10$ (pointillés), et $n=8$ (trait plein).