Monitoring de la transmission des filtres de Megacam avec SNDICE

Augustin Guyonnet

15 septembre 2010

1 Monitoring de la bande passante de Megacam

L'illumination du plan focal de Megacam par SNDICE a pour objectif un monitoring précis au pour mille de la réponse instrumentale. Le contrôle fin de l'illumination repose sur la stabilité du spectre et de l'intensité de l'émission lumineuse des LEDs, sur la cartographie spatiale du cône de lumière et sur la connaissance de la géométrie du télescope. La maîtrise de ces paramètres permet de produire des mesures reproductibles dans le temps et d'assurer un monitoring de Megacam. Le faisceau des LEDs explore l'espace des paramètres d'illumination et permet ainsi une étude unique des réflexions internes de l'optique du télescope qui cause une non-uniformité de l'éclairement au plan focal.

Répétabilité des mesures SNDICE

L'étude de la bande passante des 5 filtres de Megacam consiste à prendre successivement deux images d'une même LED, l'une avec l'un des filtres sur le chemin optique, l'autre sans. La répétabilité des images prisent dépend de plusieurs paramètres : Le temps de pose, le courant dans la LED, la température ambiante et la position relative de SNDICE par rapport au télescope.

La variation du temps de pose permet de déterminer le domaine où la réponse de l'instrument est linéaire. Sur la figure 1 on constate que la réponse de Megacam est linéaire de 2000 à 30 000 ADUs. Pour un temps donné, la dispersion des mesures est diminuée lorsque l'on tient compte de variations du temps de pose de quelques millièmes de secondes (figure 2).

La figure 3 présente une rampe du courant injecté dans la LED GD8. Elle met en évidence une non linéarité de l'illumination à bas et à fort flux. L'étude de la répétabilité des mesures pour une LED donnée doit donc se limiter à la comparaison d'images obtenues avec des intensités lumineuses identiques : Dans le cas de la LED étudiée ici, l'analyse se limite aux valeurs de commande du courant LED compris entre 500 et 2000 (figure 4).

La température à l'intérieure du dôme varie pendant uns série d'images (variation diurne) et la valeur moyenne varie aussi d'une série à l'autre (variation saisonnière). La figure 5 rapporte toute les mesures de température enregistrées à la surface du miroir primaire pendant les *runs* de prise de données. Une variation de température à pour effet de modifier l'amplitude et le spectre d'émission des LEDs : Une hausse de température diminue la largeur du gap de la LED et déplace donc le pic d'émission vers le rouge, elle favorise l'injection d'électrons en bande de conduction à cause de l'agitation thermique, ce qui a pour effet d'élargir la largeur du spectre, enfin, elle augmente le courant d'obscurité ([5]). La dépendance en température est spécifique à une LED donnée, le type de semiconducteur utilisé et le dopage variant avec la couleur de la LED. Dans le cas de GD8, à température constante, la stabilité du courant dans la LED est $\approx 0.5 \times 10^{-4}$ (Barrelet [1]) et pour une variation de température inférieure à 0.1° C, la reproductibilité du spectre reste inférieure à 10^{-4} . La figure 6 montre la variation d'intensité mesurée par Megacam en fonction de la température. Les images sont prisent sans filtre et l'efficacité quantique de la CCD étant quasi constante sur l'intervalle spectrale d'une LED rouge, la réponse varie de 4‰ pour une variation de 0.5 °C.

Le quatrième paramètre à maitriser pour effectuer un monitoring précis au pour mille concerne la position relative de SNDICE par rapport au miroir primaire du télescope. La précision sur le positionnement du dôme, auquel sont attachées les LEDs, est limitée à 0.1° et nécessite une procédure spécifique pour l'alignement. On évalue sa reproductibilité en déterminant le paramètre d'impact qui est définit comme la position du centre du cône lumineux d'une LED sur le miroir principal lorsque les axes optiques des deux instruments sont alignés. Différentes positions du paramètre d'impact sont régulièrement testées pour étudier la variation de l'illumination sur le plan focal en fonction de la zone de miroir éclairée. La figure 7 compare les résidus de la soustraction de deux images prisent avec et sans filtres dans la même position et dans deux positions différentes ¹, c'est à dire avec un paramètre d'impact éloigné de 30cm et tourné de 15°. Dans les cas d'images avec filtres et sans filtres, la répétabilité de la mesure moyenne est dégradée d'un ordre de grandeur mais reste tout de même inférieur au pourcent. Cette mesure met en évidence la non uniformité ² de l'illumination au plan focal à cause (1) des taches de diffraction (2) des réflexions internes (E.Barrelet [3]) qui se déplacent lorsque le paramètre d'impact change.

Les défauts de l'optique du télescope entrainent une distorsion du frond d'onde de l'illumination par SNDICE de l'ordre de 4% (voir Barrelet [2]). Elle est causée par le scattering ou le back – scattering de la lumière sur les poussières et les impuretés présentent sur les lentilles et sur le miroir. Cela produit des anneaux de diffraction, qui, selon leur taille et leur position sur une CCD, conserve ou non le flux lumineux. Le flux est conservé lorsque la tache est petite et entièrement contenue dans une CCD. La seconde cause de non-uniformité est la réflexion spéculaire de la lumière sur les éléments optiques. Les reflets sont visibles sur le plan focal. Pour le monitoring, il est essentiel de positionner SNDICE

^{1.} Le paramètre d'impact (provisoire) passe de (x,y)=(-0.10m, -0.75m) à (x,y)=(0.16m, -1.10m)

^{2.} Une étude faite au CFHT a porté sur la variation de l'angle solide vu par une pixel situé au bord de la mosaïque par rapport au centre : L'étude faite par CFHT. [cfht] constate que la non-uniformité de l'éclairement au plan focal est causé par (1) les reflets sur le baffling et le bord du miroir (2) une diminution d'intensité au bord à cause de l'ombre du baffling projeté sur le plan focal.



FIGURE 1 - linéarité de la réponse de Megacam : ADU de la CCD0 en fonction du temps de pose. En haut, toutes les mesures ensembles. Au centre, une seule date. En bas, zoom sur un temps de pose de 5 secondes : l'instrument est sensible à une variation de quelques ms.



FIGURE 2 – Diminution de la dispersion des mesures au cours d'un run lorsque l'on tient compte du temps de pose.

de manière reproductible afin que les taches de diffractions et les reflets se superposent et soient éliminés par la division pixel à pixel d'une image avec filtre et d'une image sans filtre (figure 9). La répétabilité de la mesure de la bande passante de référence est de 3‰, c'est la référence utilisé pour le monitoring (figure 8). Dans le cadre d'une calibration de la réponse instrumentale, il est développé un ray tracer afin de donner une évaluation quantitative des effets qui cause une non-uniformité de la réponse.

monitoring de la bande passante des filtres

La liste de tout les *runs* SNDICE est reproduite dans la table 1. Le monitoring s'appuie sur une quinzaine de dates en 2008 et 2010. L'étude de l'évolution de la bande passante au cours du temps s'effectue en comparant la répétabilité à court terme par rapport à celle à long terme dans des conditions d'illuminations similaires. Le filtre [r] est sondé par la LED GD8 dont le pic d'intensité est au centre de la bande passante du filtre ce qui rend la mesure de la transmission moins sensible à une variation de température que dans le cas d'une LED située en bord de bande passante. La corrélation entre la mesure et la température ressort néanmoins sur la figure 10. Un ajustement linéaire est fait sur les images des runs du 18/02/10 et du 07/08/10 puis extrapolé à toutes les mesures afin de déterminer l'évolution de la réponse de megacam (figure 11) : La dispersion des mesures à une date donnée est causée par les différences de courant LED et de positions. La variation d'une date à l'autre présente des offsets qui restent à être expliqués.



FIGURE 3 – run 08/07/10. Mesure du flux lumineux des photodiodes de contrôles en fonction du courant dans la LED (haut) et Réponse de la CCD0 de Megacam en fonction du courant dans la LED (bas). CCD0 versus photodiode : pas de déviation à la linéarité la déviation à la linéarité, la non-linéarité doit provenir des LEDs.



FIGURE 4 – variation non linéaire de l'intensité en fonction du courant LED : le temps de pose est de 2 secondes et le DAC des leds varie.

La division d'une image avec filtre par une image sans filtre donne la transmission du filtre. Le RMS/mean de la mesure est autour de $4\%_0$ ce qui est un ordre de grandeur inférieur à celui d'une image seule. Cette dispersion provient principalement de la variation radiale de la transmission. Lorsque l'on compare la transmission pour des illuminations de SNDICE spatialement proche, la variation radiale s'annule et la reproductibilité est inférieure à $2\%_0$. Lorsque cette variation de $2\%_0$ est comparée à la variation d'une période à l'autre aucune dégradation de la transmission du filtre n'est observée (figure 13).

Le monitoring peut aussi être exploité pour l'analyse des images de sciences : Par exemple, il est possible de créer un indicateur de texture en cataloguant les défauts présents sur les éléments optiques proches du plan focal (ceux-ci se retrouvent sur toutes les images et peuvent être identifiés en sélectionnant les pixels à plus de 2σ de la moyenne). L'utilité pour une image de science étant de mesurer ce qui est perdu de la lumière d'une étoile en sachant quelle pixel est concernée par quel défaut et reconstruire les photons d'une étoile qui arrivent loin de son image à cause de la diffraction. En déplaçant SNDICE de sorte à éclairer successivement toutes les parties du miroir il est aussi possible de réaliser un *flatfield*.

Les reflets sur les différentes surfaces sont utilisés pour ajuster la géométrie d'une modélisation du télescope avec une précision supérieure à ce que permet les mesures de distances *in situ*.



 $\ensuremath{\mathsf{FIGURE}}\xspace 5 - \ensuremath{\mathsf{Figure}}\xspace du haut : \ensuremath{\mathsf{e}}\xspace value of the set of$



 ${\rm FIGURE}\ 6$ – Variation de la réponse de Megacam en fonction de la température ambiante. Toute les images sont prisent avec le même temps de pose, le même courant LED, la même position de SNDICE.



FIGURE 7 – La répétabilité de deux images successives prisent avec une même illumination et normalisée par le temps d'exposition. En haut à gauche : (Alt 63° , Az 0.5°), en bas à gauche (Alt 64.5° , Az -3.0°). A droite : deux positions différentes (63.0° , 0.5° ; 64.5° , -3.0°).



residu entre deux transmissions prisent dans deux positions differentes

FIGURE 8 – Répétabilité de la mesure de transmission du filtre [r] éclairé par gd8 : Deux paires d'images prisent dans deux positions différentes et normalisées par le temps d'exposition (Alt 63° , Az 0.5°) et (Alt 64.5° , Az -3.0°).



FIGURE 9 - Images prisent avec filtres et sans filtre de la LED gd8, les taches de diffractions sont superposées et disparaissent lorsque l'on divise une image par l'autre.

| Run ID | Date | Dome Az | Temperature moyenne | Comments |
|--------|-------------|---------------|---------------------|-------------------------|
| | | (North/South) | (Celcius $)$ | |
| I1 | 2008-02-06 | 258.0 (N) | 1.0 | installation $(\#5)$ |
| I2 | 2008-02-07 | 258.0 (N) | 1.0 | installation $(\#6)$ |
| I3 | 2008-02-08 | 78.0~(S) | 1.0 | installation $(\#1)$ |
| I4 | 2008-02-09 | 78.1 (S) | — | installation $(#2-3-4)$ |
| 02 | 2008-06-05 | 257.9 (N) | - | (#7) |
| 03 | 2008-06-10 | 258.0 (N) | — | (#8) |
| _ | Summer 2008 | _ | - | MegaCam upgrade. |
| | | | | CLAP installation. |
| — | 2008-10-09 | — | - | SNDice motors changed |
| 04 | 2008-10-28 | 257.9 (N) | - | (#9) |
| 05 | 2008-11-05 | 257.9 (N) | - | (#10) |
| 06 | 2010-02-18 | 258.0 (N) | -0.6 | (#11) |
| 07 | 2010-03-17 | 257.9 (N) | -0.5 | (#12) |
| 08 | 2010-03-19 | 257.9 (N) | -0.9 | (#13) |
| 09 | 2010-04-16 | 258.0 (N) | -1.3 | (#14) |
| _ | 2010-05-10 | — | — | SNDice motors changed |
| 11 | 2010-05-14 | 257.7 (N) | 2.3 | (#15) |
| 12 | 2010-07-08 | 257.9 (N) | 3.9 | (#16) |

TABLE 1 – SNDice runs / SNDice upgrade log.



FIGURE 10 – En haut, réponse de Megacam à une image sans filtre en fonction de la température. En bas : Deux ajustements linéaires à deux dates différentes.



FIGURE 11 – En haut figure toutes les images sans filtre de tout les runs SNDICE (croix rouges). Les croix vertes sont le résultat de la soustraction de l'ajustement aux mesures du 18/02/10(croix vertes). Au milieu, sous ensemble de mesures ayant des paramètres d'impact proches(figure 12) et des DAC LED identiques ajusté sur les mesures du corrélation en température du 08/07/10. On constate un offset de la réponse de Megacam entre 2008 et 2010. En bas, zoom sur les runs de 2010, je ne constate pas de tendance nette.



FIGURE 12 – Image du filtre[r] avec GD8 au cours de de 2010. En haut, la réponse de Megacam est représentée en fonction du paramètre d'impact : celui-ci est toujours dans la même zone du mirroir à une exception près. En bas, les points sont corrigés de la variation de température.



FIGURE 13 – En bas à droite, transmission du filtre[r] en mars, mai et juillet 2010. La variaition ne dépasse pas celle de référence (en haut à gauche).

1.1 modélisation des images SNDICE

Transmission des filtres

La caractérisation de la transmission des filtres interférométriques de MegaPrime par le fabriquant et par l'équipe du CFHT mesure la variation spatiale de la courbe de transmission ³. La transmission d'un filtre interférométrique varie avec l'angle d'attaque du faisceau incident : Elle est approximée par $T(\lambda, \theta) = T(\lambda(1 - \frac{\sin^2\theta}{n^2})^{-1/2}, \theta = 0)$ où n est l'indice de réfraction du filtre et θ l'angle d'incidence ([4]). L'angle moyen sur le filtre d'une image prise avec SNDICE est du même ordre de grandeur que celui fait par la lumière d'une étoile (de l'ordre de 4 degrés) et cause donc un blueshift de la bande passante. La variation de l'angle sur les bords extrèmes de la mosaïque est de l'ordre de 5 degrés ,ce qui nettement supérieure à celui du faisceau de science qui n'est que de 10 milliradians entre le centre et le bord de la mosaïque.

Modèlisation de la mesure

La bande passante effective comprend (1) l'efficacité quantique des CCDs (2) la transmission des filtres en tenant compte de la variation spatiale et de la variation de l'angle d'incidence (3) la transmission du miroir, des quatres lentilles, de l'ISU, de la fenêtre du cryostat et du Wide Field Corrector.

Pour le spectre d'une LED donnée, la modélisation correspond donc à :

$$\frac{I_{filter}}{I_{nofilter}} = \frac{\int [S_{led}(\lambda) \ QE(\lambda) \ T_{filtre}(\lambda^*, \overrightarrow{r}, \theta = 0) \ T_{optique}(\lambda)] d\lambda}{\int [S_{led}(\lambda) \ QE(\lambda) \ T_{optique}(\lambda)] d\lambda}$$
(1)

Ce qui donne pour les LEDs utilisée pour sonder le filtre [g] les transmissions spatiales reproduitent en bas de la figure 14 (comparées aux mesures, au dessus). Pour les LEDs au centre du filtre l'accord est de quelques pourcent, il se dégrade pour les LEDs située au bord de la bande passante.

Une modélisation plus fine doit tenir compte de :

- La courbe de transmission du monochromateur.
- La mesure exacte du pedestal : Une mesure de précision des faibles flux lumineux est d'autant plus critique que le pic d'émission de la LED est proche de la limite de la bande passante d'un filtre car alors la contribution des queux de spectre est importante. (Ce qui justifie une étude de la calibration photovoltaique versus photoconductif.) figure 15.
- La dépendance en température du spectre de chaque LED.
- L'effet des réflexions internes sur la distribution spatiale de l'intensité lumineuse au plan focal (à venir avec le ray tracer).

Je crois aussi que la cartographie spatiale du cône de lumière de SNDICE doit être intégrée dans l'équation (1).

plain

^{3.} Le fabriquant fournit dix points de mesures de la transmission à incidence normale de 0 à 21 cm du centre de chaque filtre en suivant un rayon.



FIGURE 14 – Mesures versus modelisation de la bande passante des LEDs utilisées sur le filtre [g].



 $\ensuremath{\mathsf{Figure}}\xspace 15$ – Influence de la mesure du pedestal sur la modelisation de la bande passante.

Références

- [1] E. Barrelet. Spectral calibration of sndice. LPNHE2009₀1, *janvier*2009.2
- [2] E. Barrelet. Testing megacam with sndice. 01 2010. [2]
- [3] E.Barrelet. Angular alignment and control of sndice with the canada-france-hawaii telescope. LPNHE 2008-01, 2008. 2
- [4] Regnault et Al. Photometric calibration of the supernova legacy survey field. Astronomy Astrophysics, 12446, August 2009. [2]
- [5] F. Reifegerste. Modelling of the temperature and current dependance of led spectra. J.Light 1 Vis. Env., Vol.32(No3), 2008. 2
- [cfht] cfht website cfht.hawaii.edu/Instruments/Imaging/Megaprime/pinehole.html. [2] 17