

Photométrie & effets atmosphériques

raoul.behrend@unige.ch

Objectifs

- Comprendre les principaux effets atmosphériques sur la photométrie
- Adopter une méthodologie pour pouvoir en tenir compte. Existe-t-il une stratégie optimale ?
- Quelques conseils... sur la partie instrumentale

Photométrie

- Méthode de mesure de l'éclat des objets célestes
- Se passe généralement au sol et dans des conditions variables
- Usage "hors atmosphère" pour faire de la science

Ordres de grandeur

- Etoiles variables
 - 1 mag, 0,1 mag, 0,01 mag
- Astéroïdes
 - 0,05 mag, 0,01 mag
- Transits exoplanétaires
 - 0,01 à 0,001 mag

Chaînage

- De hors atmosphère, les photons traversent
 - ▶ Atmosphère (gaz, aérosols, poussières)
 - ▶ Télescope (lentilles, miroirs, vignettage)
 - ▶ Filtres (poussières)
 - ▶ Caméra (hublot, poussière, givre, obturateur)
- avant d'être traduits en électrons
 - ▶ bruits et signaux thermiques, rémanance
 - ▶ rendement variable en position et longueur d'onde
- numérisés
 - ▶ électronique non-linéaire
 - ▶ gain et bruits sont souvent mal connus
- avant d'être mesurés
 - ▶ méthodes plus ou moins bien adaptées

Principaux effets atmosphériques

- Absorption
- Diffusion
- Polarisation
- Réfraction
- Agitation
- Scintillation

- Dépendance plus ou moins forte
 - de la fréquence
 - de la quantité d'air traversé

Magnitude

- Magnitude et grandeur: calée sur les échelles physiologiques - logarithmiques !
- $m = -2,5 \text{ Log } f/f_0$
 - f_0 initialement définie par Véga

Effets atmosphériques

Extinction - monochromatique

- $m = -2,5 \text{ Log}(f/f_0)$
- Suppression d'une certaine *proportion* des photons et donc des électrons comptabilisés
- $m = -2,5 \text{ Log}(a f/f_0) = -2,5 \text{ Log}(f/f_0) + \alpha$

Effets atmosphériques

Extinction - bande

- $m = -2,5 \text{ Log}(f/f_0) + \alpha$
- Suppression d'une *proportion* différente des photons en fonction de leur fréquence. Il y a donc un effet de couleur.
- $m = -2,5 \text{ Log}(f/f_0) + \alpha + \beta c(f', f_0') + \dots$
- Au premier ordre correctif, après exposition :
 - ▶ $m = -2,5 \text{ Log } i + A + B c$
 - ▶ A et B varient durant la nuit
 - ▶ Effet de B c: plusieurs cmag !

Calibration $m = -2,5 \text{ Log } i + A + B c$

- Catalogues: m et parfois B-R. Gaia: G-R
- Couleur:
 - ▶ Sans : déduire A des (m, i) connus
 - ▶ Avec : déduire A et B des (m, c, i) connus
 - ▶ Toujours rejeter les objets “anormaux”
- Solutions: nombreuses mais pas équivalentes ! Car incertitudes prises en compte ou pas.
 - ▶ Peu de logiciels font une solution complète
 - ▶ Catalogues: incluent des erreurs systématiques

Pour les matheux...

et les développeurs de logiciels

- $(m_1 + 2,5 \text{ Log } i_1) = (1 \text{ } c_1)$
- $(m_2 + 2,5 \text{ Log } i_2) = (1 \text{ } c_2) \text{ (A)}$
- $(m_3 + 2,5 \text{ Log } i_3) = (1 \text{ } c_3) \text{ (B)}$
- $(m_4 + 2,5 \text{ Log } i_4) = (1 \text{ } c_4)$

- Solution de “ $y = M x$ ” : $x = (M^t M)^{-1} M^t y$
- Possibilité aisée de mettre des incertitudes
- $m = -2,5 \text{ Log } i + A + B c$

Méthode de travail pour CdR

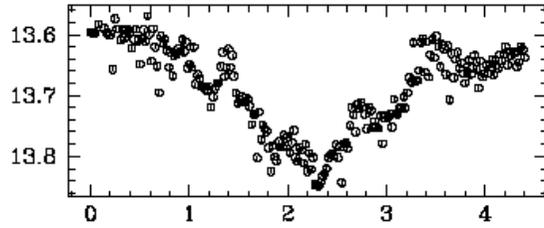
Acquisition

- Habituellement: tout faire en R ou en O, mais avec quelques images faites en V pour avoir une estimation de c
- Parfois, cycler (B) V R (I) - objets dissociés
- Les images en I sont souvent “frangées” et difficiles à réduire proprement
- Réduction
 - ▶ Connaître ses bruits et gain
 - ▶ Pas de recentrage à perte
 - ▶ Traitement “minimaliste” : redphot

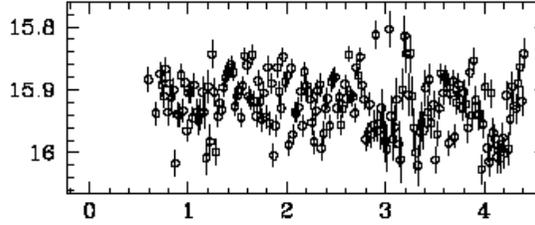
Traitement

- Cibles et références pas toujours mesurable
 - Avions, satellites, “cosmiques”, colonnes mortes, dérive du suivi, saturation, etc.
- Les erreurs systématiques montrent leurs effets ! Par ex. :
 - bandes instrumentales différentes
 - Indice de couleurs pas cohérents
- Solution de choix : construction d'un catalogue local (m et c ou simplement m) à partir d'un petit jeu des meilleures observations

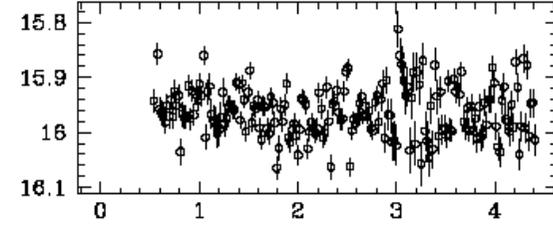
1 RAP 0001=(1139)_ATAMI IC=1.0000



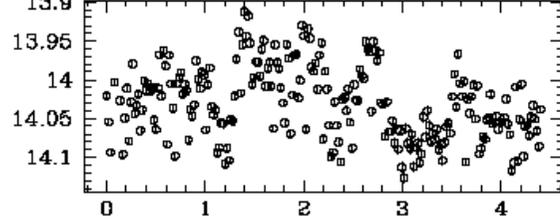
2 RPH 0416=A1600350467 IC=1.1000



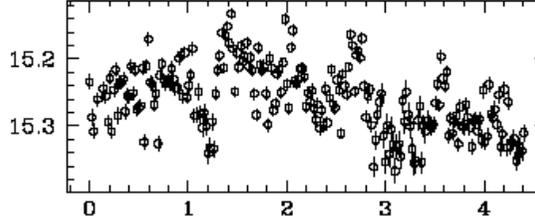
3 RPH 0417=A1600350494 IC=1.3000



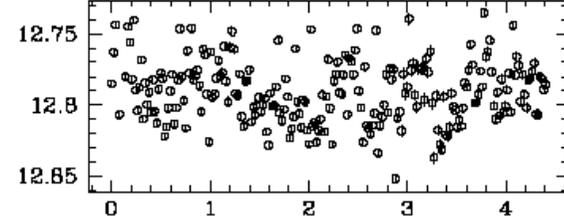
4 RPH 0418=A1600350617 IC=0.7000



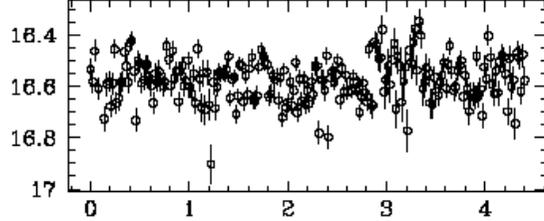
5 RPH 0419=A1600350721 IC=0.7000



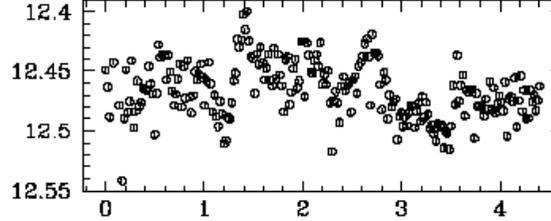
6 RPH 0420=A1600350788 IC=1.8000



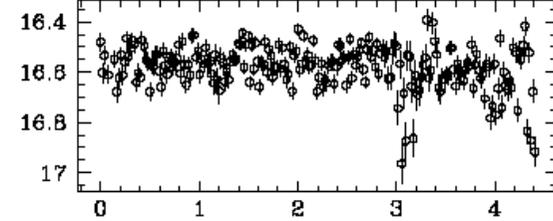
7 RPH 0421=A1600350861 IC=1.6000



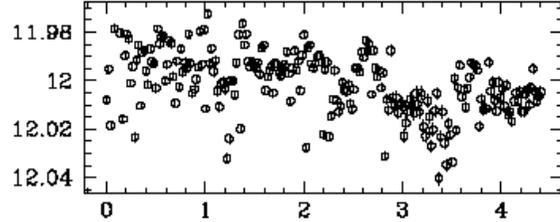
8 RPH 0422=A1600351049 IC=1.1000



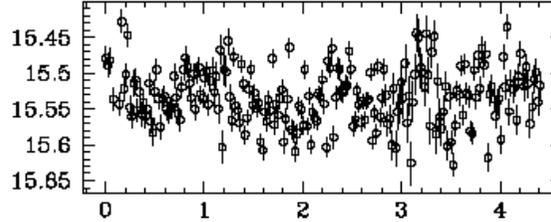
9 RPH 0423=A1600351230 IC=1.0000



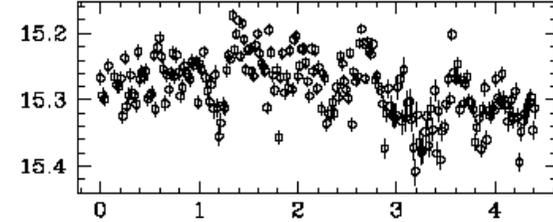
10 RPH 0424=A1600351444 IC=1.3000



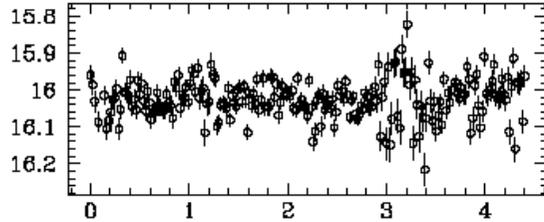
11 RPH 0425=A1600351623 IC=1.6000



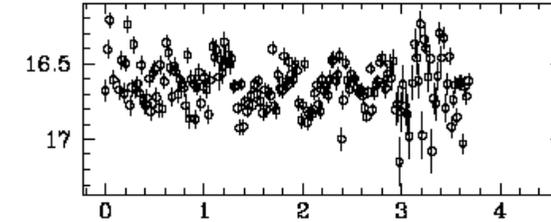
12 RPH 0426=A1600351659 IC=0.8000



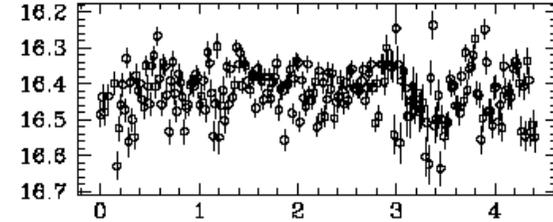
13 RPH 0427=A1600352056 IC=1.8000



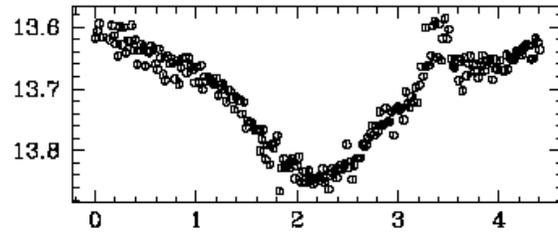
14 RPH 0428=A1600352124 IC=3.0000



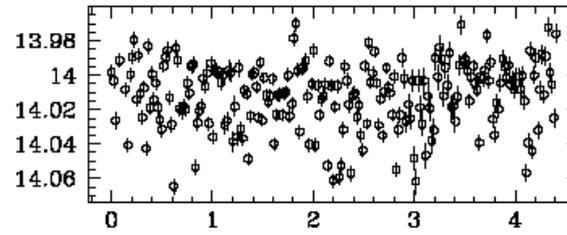
15 RPH 0429=A1600352125 IC=1.1000



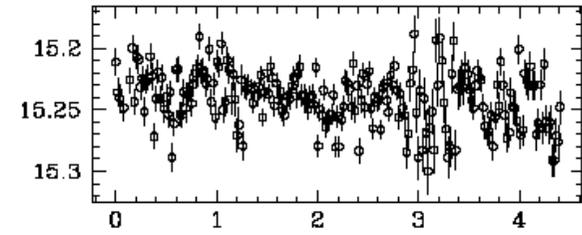
1 RAP 0001=(1199)_ATAMI IC=1.0000



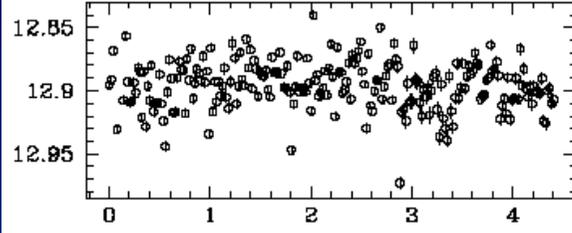
2 RPH 0403=A1600350617 IC=0.7000



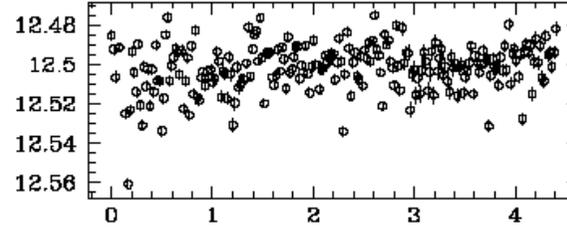
3 RPH 0404=A1600350721 IC=0.7000



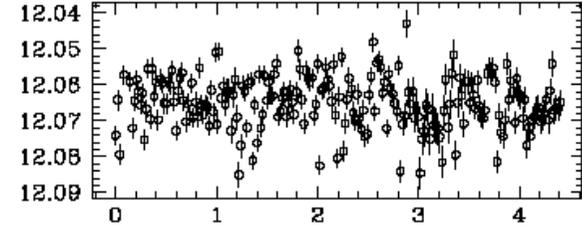
4 RPH 0405=A1600350788 IC=1.6000



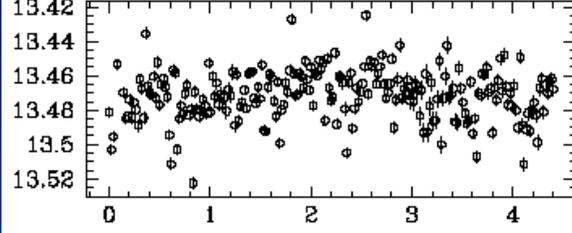
5 RPH 0406=A1600351049 IC=1.1000



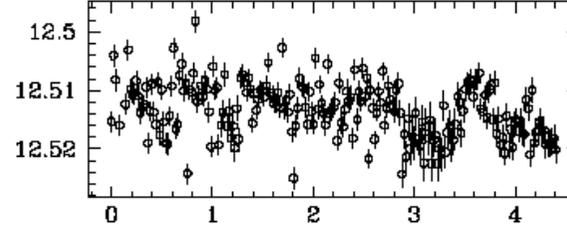
6 RPH 0407=A1600351444 IC=1.3000



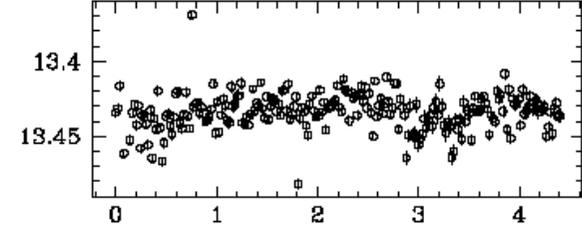
7 RPH 0410=A1600352904 IC=0.8000



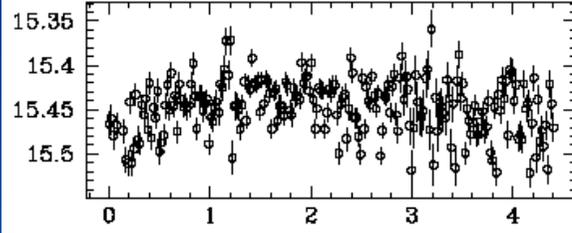
8 RPH 0413=A1600353429 IC=0.5000



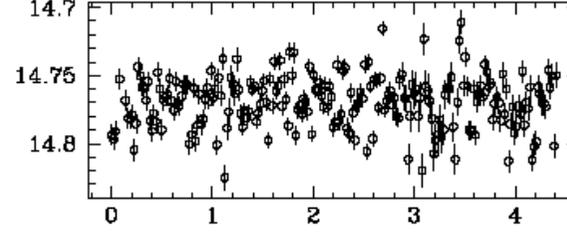
9 RPH 0414=A1600353452 IC=0.8000



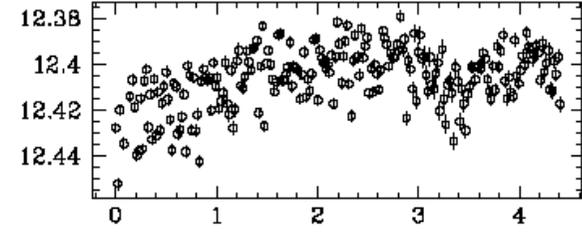
10 RPH 0415=A1600353790 IC=1.1000



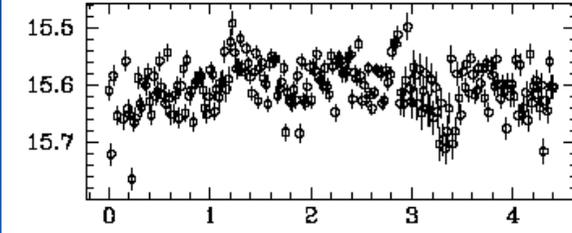
11 RPH 0417=A1600353924 IC=0.6000



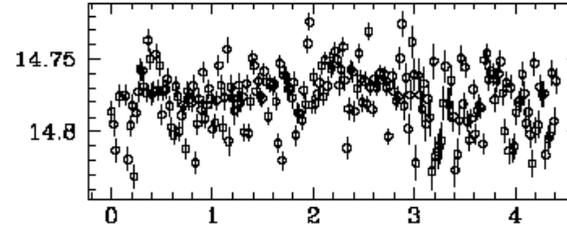
12 RPH 0418=A1600354711 IC=1.0000



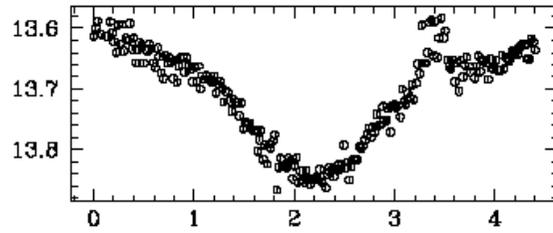
13 RPH 0419=A1600355482 IC=1.9000



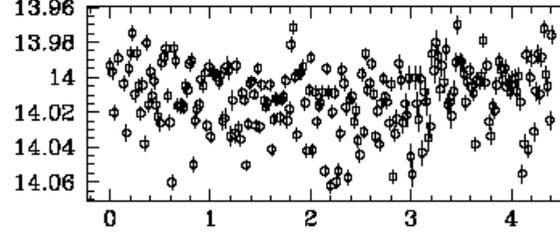
14 RPH 0421=A1600355586 IC=0.7000



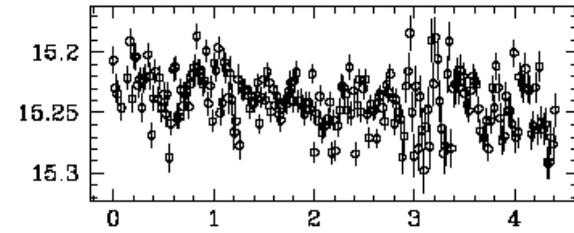
1 RAP 0001=(1139) ATAMI IC=1.0000



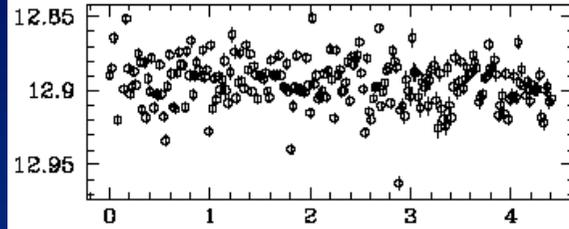
2 RPH 0403=A1600350617 IC=0.7000



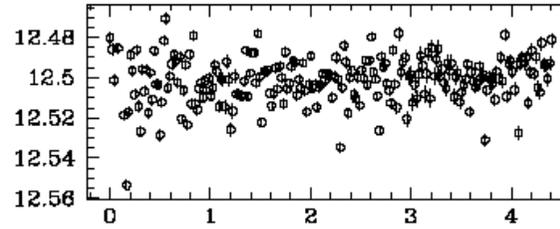
3 RPH 0404=A1600350721 IC=0.7000



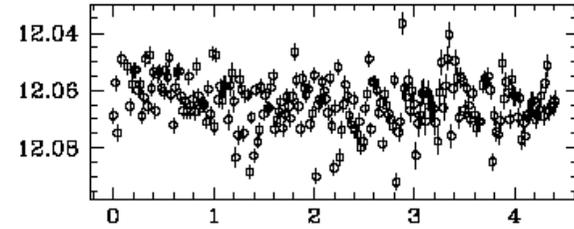
4 RPH 0405=A1600350788 IC=1.6000



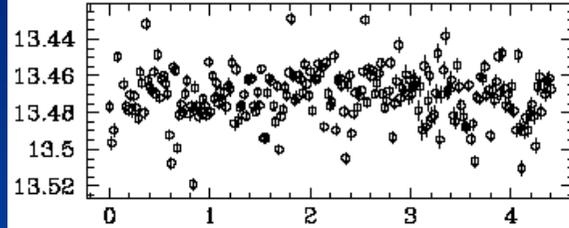
5 RPH 0406=A1600351049 IC=1.1000



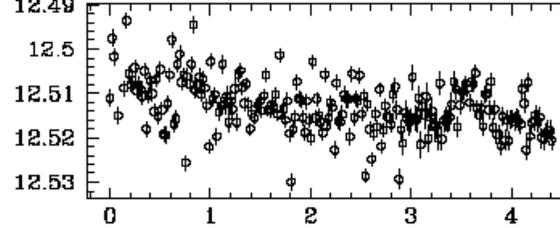
6 RPH 0407=A1600351444 IC=1.3000



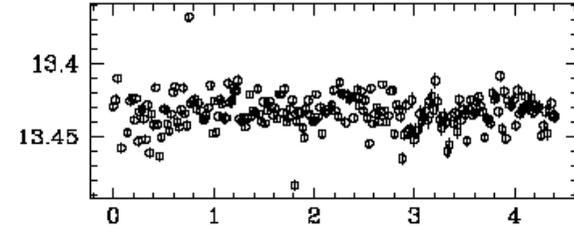
7 RPH 0410=A1600352904 IC=0.8000



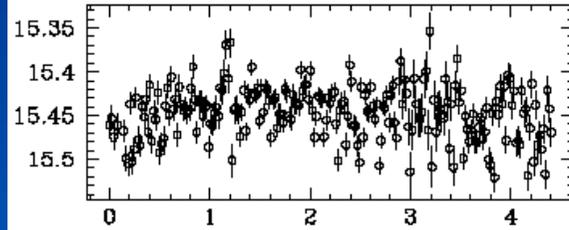
8 RPH 0413=A1600353429 IC=0.5000



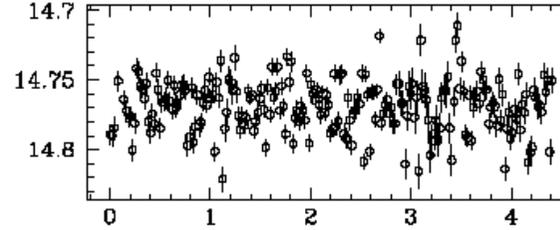
9 RPH 0414=A1600353452 IC=0.8000



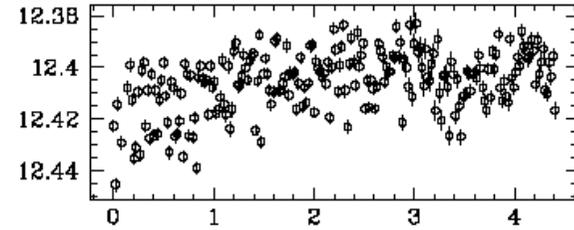
10 RPH 0415=A1600353790 IC=1.1000



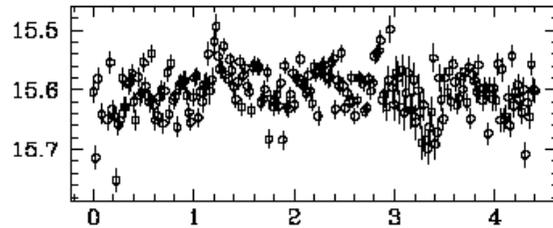
11 RPH 0417=A1600353924 IC=0.6000



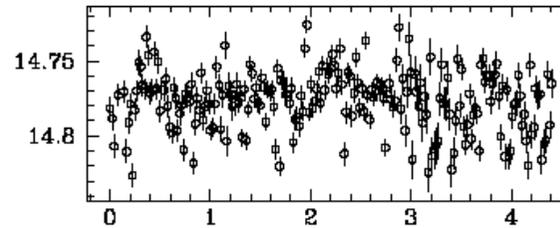
12 RPH 0418=A1600354711 IC=1.0000



13 RPH 0419=A1600355482 IC=1.9000



14 RPH 0421=A1600355586 IC=0.7000



Scintillation

- Lié à l'agitation, la quantité d'air traversé, la stabilité de l'atmosphère
- “Typiquement” avec un 20cm: 0,01 mag en 60s

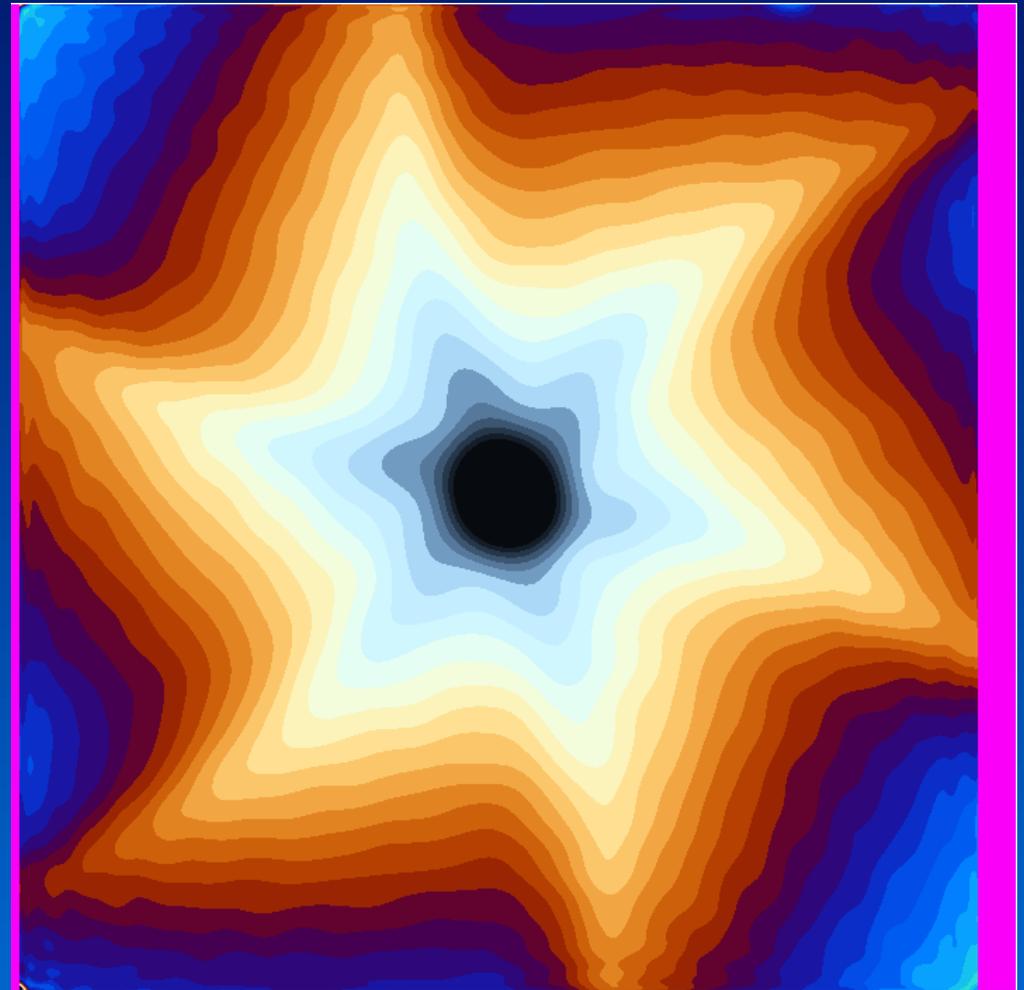
Effet d'obturateur

Principalement obturateur à iris

- Problème : le temps de pose effectif est variable sur l'image
- Problème si dérive de l'image ou si changement de temps de pose
- Technique : établir la carte du temps de travail de l'obturateur

Obturbateur à iris

- $T_o = 0,05s$ au bord
- $T_o = 0,10s$ au centre
- Attention au puits central dû au recouvrement des lamelles: c'est là que l'obturbateur est le plus instable 📌



Gain et bruit de lecture

Ici : $[g] = e/NL$

- $n_e = g n_{NL}$
- $\sigma_e = g \sigma_{NL} = n_e^{1/2}$
- $g = n_{NL} / \sigma_{nl}^2$

- Procédé : traitement complet des zéros, noirs et plats (disons 11 de chaque)
- $g = n_{NL,plats} / (\sigma_{NL,plats}^2 - \sigma_{NL,noirs}^2)$

A propos de la caméra

- Caméra 16 binons
- Gain de 0,3 e/NL
- Bruits de lecture de 10 e
- Bon ou pas ?

A propos de la caméra

- Caméra 16 binons
- Gain de 0,3 e/NL
- Bruits de lecture de 10 e
- Bon ou pas ?
- $\log_2 65536 - \log_2(10/0,3) = 11$ binons

Les petits plus

- Ne pas dépasser la moitié de la dynamique
- Largeur caractéristique: 3-4 pixels à mi-hauteur
- Régulation en température plutôt qu'en puissance
- Refroidir assez tôt (10 à 60 min)
- Prévoir les effets thermiques sur la focalisation

Les petits plus

- Pécé à l'heure
- 1x1
- Entêtes bien remplies - et boîte noir papier
- Sauvegarder *toutes* les images individuelles
 - Dans le format d'acquisition
 - Faire attention aux retournement
- Zéros, noirs et plats si possible dans la foulée. 2x les plats si retournement

Les petits plus

- Optimiser le séquençement
 - ▶ RRR...RVVVR...RRR
 - ▶ OOO...OVRVRVRO...OOO
 - ▶ Profiter du passage au méridien, du retournement
 - ▶ Couleurs sondables avec un autre instrument, un autre jour - sauf si mobile
- Se méfier de tout (y compris de réglages en cours de route)

Les petits plus

- Choix d'un bloc cohérent pour déterminer les couleurs
- Où mettre la balances erreurs fortuites/systematiques ?
- Visualiser (courbe, indicateurs, dessin animé) cible et références
- Arbres, cimier/volets...

Les petits plus

- Ajustement préférable à l'ouverture
 - ▶ si super-qualité
- Voir aussi la soustraction optimale d'images (SN, AG...) et mesures par ajustement contraint

Redphot

Marche à suivre

- Régler filtre et lampe pour atteindre 3/4 de la saturation en 10 secondes, coupole fermée
- Laisser se stabiliser la lampe (5 minutes)
 - ▶ Profiter de faire des zéros M_z et des noirs M_n
- Faire une série de poses
MCCLCLMLCLCCM avec $t_l=10s$, $t_m=3s$,
 $t_c=1s$ pour $T_o \approx 0,5s$
- Faire l'analyse
- Recommencer, si besoin, avec $t_c \approx 3 T_o$
moyen

Les opérations...

Logiciels spécialisés

- A résoudre pour T_o :
 - ▶ $K_l = L - Z - N t_l = P S_l (t_l - T_o)$ et
 - ▶ $K_c = C - Z - N t_c = P S_c (t_c - T_o)$
- Si S **constant** ($S_l = S_c$): $T_o = (K_l t_c - K_c t_l) / (K_l - K_c)$
- P vaut $(M_p - Z - N t_p) / (t_p - T_o)$ après normalisation à 1
- Prétraitement des images à obturateur ouvert: $S_x = (M_x - Z - N t_x) / P / (1 - T_o / t_x) / t_x$

Les opérations...

Pour utiliser les logiciels communs...

- $P' = P (1 - T_o/t_x)$ s'utilise avec la méthode classique: $M_x = Z + N t_x + o P' S_x t_x$
- Attention: P' n'est pas M_p , même à un facteur près
- L'«image» $1 - T_o/t_x$ est le «plat d'obturateur». Il y en a une par temps de pose nominal t_x
- Obturateur ouvert: $S_x = (M_x - Z - N t_x) / P' / t_x$

Remarques

- Plusieurs images avec temps d'intégration variable: résoudre par moindres carrés 😊😊😊
- Diminution du bruit résiduel:
 - ▶ par lissage local
 - ▶ par «projection» sur une base de fonctions (p.ex. polynômes de Legendre)
- T_0 devrait être indépendant du filtre et stable, mais peut dépendre de l'élévation et de l'orientation

Remarques

- Mettre T_o à 0 dans les colonnes et lignes hors-cadre (pré- et sur-lecture)
- Toujours contrôler le prétraitement en l'appliquant aussi aux images M_p , M_l , M_c , M_m ; et aussi à M_z et M_n (cas spéciaux)
- Plats-coupole:
 - ▶ déterminer simultanément T_o et P (donc aussi P')
 - ▶ faciles, répétables, pratiques, rapides, précis, peu contraignants (météo, heure), permettent le traitement des couleurs (choix de l'éclairage)
 - ▶ **pourquoi** faire autrement, rarement et difficilement ?