# Photométrie

# regard théorique et illustré pour une bonne pratique

#### Raoul Behrend

Observatoire de Genève

Causerie au wetal'15

De quoi parlons-nous ?
– 2 mag : zénith-horizon
– 0,5 mag : WUMa, RRLyr
– 0,5 mag : origine des GSC-ACT, USNO- A2.0, etc.
– 0,1 mag : DSct
– 0,1 mag : vignettage
<ul> <li>– 0,05 mag : effet atmosphérique sur la couleur</li> </ul>
– 0,02 mag : effet de l'obturateur en courte pose
– 0,02 mag : sensibilité variable dans un pixel - 1 mag !
– 0,02 mag : sensibilité pixel à pixel
– 0,01 mag : scintillation pour un 20cm en 10s
– 0,01 mag : transit profond
– 0,01 mag : linéarité d'un ccd/cmos
– 0,01 mag : recalage des bandes
– 0,001 mag : objectif pour un transit
<ul> <li>– 0,001 mag : bruit de grenaille pour 1 million d'électrons</li> </ul>
– 0,0001 mag : limite actuelle au sol





Electronic Telegram No. 4157 Central Bureau for Astronomical Telegrams Mailing address: Hoffman Lab 209; Harvard University; 20 Oxford St.; Cambridge, MA 02138; U.S.A. e-mail: cbatiau@eps.harvard.edu (alternate cbat@iau.org) URL http://www.cbat.eps.harvard.edu/index.html Prepared using the Tamkin Foundation Computer Network (31450) 1999 CU9 D. Pray, Sugarloaf Mountain Observatory, South Deerfield, MA, U.S.A.; P. Pravec, K. Hornoch, J. Vrastil and H. Kucakova, Ondrejov Observatory; V. Benishek, Belgrade Astronomical Observatory, Serbia; R. Roy, Observatoire de Blauvac, France; R. Behrend, Geneva Observatory; D. Romeuf, Chapdes-Beaufort, France; B. Warner, Center for Solar System Studies, Eaton, CO, U.S.A.; A. Scholz and G. Hodosan, Observatory of the University of St. Andrews, U.K.; J. Pollock, Appalachian State University; R. Montaigut and A. Leroy, OPERA Observatory, France; and D. Reichart and J. Haislip, University of North Carolina, Chapel Hill, report that photometric observations obtained during Sept. 5-Oct. 13 reveal that minor planet (31450) is a binary system with an orbital period of 53.47 ± 0.07 hr. The primary shows a period of 3.4116 ± 0.0003 hr, and has a lightcurve amplitude of 0.24 mag at solar phases 5-9 deg. Mutual secondary eclipse/occultation events that are 0.05 magnitude deep indicate a lower limit on the secondary-to-primary mean-diameter ratio of 0.22.

2015 October 26

(C) Copyright 2015 CBAT (CBET 4157)

Daniel W. E. Green

















## Flux, magnitudes, atmosphère

### ■ m=-2,5 log<sub>10</sub>(f/f<sub>ref</sub>)

- m=magnitude observée
- f=flux observé
- ▶ f<sub>ref</sub>=flux de référence

### Effet de l'atmosphère

- M=magnitude hors atmosphère (but !)
- m=M+a si monochromatique
- m=M+a+b C si bande pas trop large
- ► C=indice de couleur



## **Construction du catalogue**

Un bon modèle métrologique modélise les cibles et les références

### VVVVVRRRRR ou VRVRVRVRVR

 Réduire classiquement en refusant les termes de couleur

### Compiler les données

- Valeur et incertitudes
- En déduire les couleurs
- Réduire la série complète avec termes de couleur
- Détection/rejet et retour à la compilation (3x)

## Usage d'un catalogue

### Ramasser les couleurs dans USNO-A2.0

- Erreurs systématiques jusqu'à 1mag
- Impossibilité de "piquer" une étoile de référence de bonne couleur
- couleur des variables pas fiable
- ▶ assigner une couleur plausible à la cible
- Compiler les données
- Réduire la série avec termes de couleur
- Détection/rejet et retour à la compilation (3x)

FMT DPFVv						
NOM (939) ISBERGA						
MES Etienne Morelle,	Raoul Behrend 0-09					
MER Sirene						
; La=7 Lp=35 boîte ago	randie a:libre b:=1	1.000 k:libre				
; 0001 RAP 0001=(939)	ISBERGA IC=1.0000					
; 0002 RAP 2000=A14003	38591 IC=0.9000					
; 0003 MES 2024=A14003	38209 IC=0.9000					
; 0004 RPH 2001=A14003	36258 IC=0.9000					
; 0005 RPH 2002=A14003	36259 IC=0.8000					
; 0006 RPH 2003=A14003	36282 IC=0.8000					
[]						
; 0041 RPH 2039=A14003	39227 IC=0.9000					
; JD TU Tpose	Fr C00001 c00001	C02000 c02000	C02024 c02024	R02001 r02001	R02002 r02002	
2455855.487094 20.000	- 13,4425 0,0043	12.0861 0.0025	17.5243 0.0827	12.9697 0.0034	15.9229 0.0211 1	
2455855.487521 20.000	- 13.4440 0.0042	12.0885 0.0025	17.4572 0.0774	12.9640 0.0034	15.8594 0.0200 1	
2455855.487949 20.000	- 13.4525 0.0042	12.0957 0.0025	17.3297 0.0690	12.9545 0.0033	15.8704 0.0200 1	
2455855.488377 20.000	- 13,4561 0,0042	12.0927 0.0025	17.6368 0.0906	12.9597 0.0034	15.8731 0.0201 1	
2455855.488806 20.000	- 13,4409 0,0042	12.0859 0.0025	17.6945 0.0961	12.9629 0.0034	15.8751 0.0203 1	
2455855.489233 20.000	- 13,4428 0,0042	12.0895 0.0025	17.6399 0.0911	12.9608 0.0034	15.8757 0.0202 1	
2455855.489661 20.000	- 13.4405 0.0042	12.0837 0.0025	17.5417 0.0832	12.9735 0.0034	15.9143 0.0207 1	
2455855.490086 20.000	- 13.4426 0.0042	12.0999 0.0025	17.5905 0.0869	12.9509 0.0033	15.8867 0.0203 1	
2455855.490513 20.000	- 13.4594 0.0042	12.0874 0.0025	17.5059 0.0807	12.9648 0.0034	15.8447 0.0197 1	
2455855.490941 20.000	- 13.4447 0.0042	12.0952 0.0025	17.4723 0.0789	12.9476 0.0033	15.8693 0.0202 1	
2455855.491369 20.000	- 13.4554 0.0042	12.0968 0.0025	17.7316 0.0987	12.9501 0.0033	15.8343 0.0195 1	
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						
; Colonne	1	2	3	4	5	
;						
; Filtre: -						
;						
; Objet	RAP 0001	RAP 2000	MES 2024	RPH 2001	RPH 2002	
; Identité	(939) ISBERGA	A1400338591	A1400338209	A1400336258	A1400336259	
; Nombre	694	400	342	366	363	
; Moyenne brute	13.3397	12.0942	17.4876	12.9671	15.8715	
; Disp. brute	0.0656	0.0076	0.1129	0.0098	0.0305	
; Valeur min.	13.1914	12.0779	16.9168	12.9358	15.6722	
; Valeur max.	13.4784	12.1810	17.9196	12.9919	15.9564	
; Fourchette	0.2870	0.1031	1.0028	0.0561	0.2842	
;						
; Moyenne pond.	13.3393	12.0937	17.4634	12.9663	15.8703	
; Incertitude	0.0002	0.0002	0.0052	0.0002	0.0012	
; Disp. pond.	0.0656	0.0076	0.1155	0.0099	0.0306	
; Facteur disp.	13.1510	2.3018	1.2262	2.6635	1.2829	
; Anormalité	0.7288	2.2714	1.4803	0.9513	1.5515	
; Anormalité +	0.7064	3.8474	1.3469	0.8676	0.9405	
; Anormalité -	0.7512	0.6953	1.6138	1.0349	2.1625	

## **Effets instrumentaux**

Du rêve à la réalité



- ► L=F t+Z+C
- ► L=P F t+Z+C

Limage Flux temps

- Zéro=bias Cosmiques
- Plat=flat

Noir=dark

- ► L=P F t+Z+N t+C
- $\blacktriangleright$  L=P F (t<sub>i</sub>-t<sub>o</sub>)+Z+N t<sub>c</sub>+C
- ► L=P F  $(t_i-t_o)$ +Z+N  $t_c$ +C+ $\Delta$ L : thermocouplage
- ► L=P F  $(t_i-t_o)$ +Z+N  $t_c$ +C+ $\Delta$ L+S : paraSites
- Dérive selon la température :  $X := X + \Delta X(T)$
- temps t<sub>o</sub> d'oburateur : une carte t<sub>o</sub> aussi
- convolution avec les vibrations, le suivi, diffraction, mise au point, les aberrations, etc.
- certains parasites radioélectriques

## Prétraitement

Capteur supposé linéaire

- $\blacksquare L = P F (t_i t_o) + Z + N t_c + C + \Delta L + S$
- Remonter à F n'est pas possible... à cause de C et la normalisation de P
- Combiner des images "identiques" permet de s'affranchir en partie de C
- AL peut parfois être mesuré avec les lignes et colonnes de bord !
- Si S est régulier, firltrage dans l'espace de Fourier

## Non linéarité du capteur

### Origines

- chaîne de sortie avec l'amplificateur
- convertisseur analogique/numérique
- Fuites internes des pixels
- défauts de transfert

### Principes métrologiques généraux

- on n'utilise pas un capteur linéaire à plus que 2/3 de sa dynamique (si anti-bave : 1/2)
- le comportement dans le premier tiers de la pleine échelle est souvent très bien linéaire

## **Recette pour la haute précision**

#### Application au transits exoplanétaires

- >5 pixels dans le coeur (flou, vibreur), >30s
- Guidage parfait, caméra thermorégulée
- Images de calibration :
  - ▶ même nuit, même logiciel, même configuration
- Pas bons : altazim : avec araignée en champ dense, on rejette; sans : grande méfiance, car dérotateur ! Cécédé "TV"
- Bons : lunettes, Schmid-Cassegrain
- Mesure et usage des couleurs

## **Trois méthodes**

- Ouverture 5 mmag
  - "ciel+étoile" dans un disque
  - "ciel" dans un anneau
  - combinaison pour n'avoir qu'"étoile"
- Ajustement 10 mmag
  - "ciel", "ciel+gradient" dans un disque par une constante ou un plan
  - "étoile" par profil calé dans un disque, yc. le fond
- Soustraction d'image 1mmag
  - Recalage des images (rotation, translation, échelles, déformations)
  - Noyau de convolution inter-image (égalisation du flou)
  - Soustraction optimale
  - Mesure des résidus : ajustement contraint en position
  - Attention à la normalisation

### **Pourquoi la soustraction ?**

- A mesurer: signal=(signal+fond)-fond
- Zone de fond contient :
  - du rien (défauts de correction du capteur)
  - des objets diffus (araignées, galaxie)
  - des étoiles faibles
  - ▶ le pied de l'étoile centrale
- Recette pour le fond (3 médiane-2 moyenne) ne marche pas !
- Zone de signal contient :
   Pareil en plus de l'objet à mesurer

## Exemple



Fig. 4.8: Exemple de soustraction pendant la campagne I au CFHT en octobre 1999. A gauche, l'image co-additionnée de toutes les images référence, au milieu, l'image co-additionnée de toutes les images de recherche, et à droite, la soustraction. Le cercle est centrée sur une supernova identifiée par la suite à z = 0.87.

Sébastien Fabbro, Photométrie de supernovae et applications cosmologiques, thèse, 2001
 Voir aussi Swarp, Terapix, Isis

## Photométrie d'ouverture

Mesure de l'intensité dans un disque centré sur la cible...

### Avantage

- Boîte allongée pour le suivi à mi-vitesse des géovoisineurs
- Difficultés
  - Disque
  - Centré
  - Rayon
  - Solution de choix : intégration de l'interpolant

## Photométrie par ajustement

Ajustement d'une fonction idoine sur le profil de la cible...

### Avantage

- mesure le signal là où il y a de l'énergie
- en principe moins de bruit
- Difficultés
  - comas et aberrations hors du noyau font que l'ajustement n'est pas toujours parfait
  - dérives durant la nuit
  - auto-guidage fortement recommandé

# En résumé

- Difficulté\*Incertitude≥1
- Pas de catalogue général profond tribande
  - USNO-A2.0 en attendant Gaïa

### Mesure isolée

- catalogue spécialisé
- photométrie absolue (Landolt, Genève)
- Grappes de mesures
  - catalogue personnel propre à un champ
  - Iarge bande pour CdR+CdL classiques
  - bande standard pour transits (plutôt dans le rouge)























- Berna
  - ▶ ρ=1,1 kg/l r=27 km
- Debussy
  - ▶ ρ=0,8 kg/l r=14 km
- Frostia
  - ▶ ρ=0,75 kg/l r=27 km
- Atami
  - ▶ ρ=1,3 kg/l r=21 km



## Epicerie...

### Densité de rangement des sphères

- ▶ en vrac : 60%
- ▶ secouées dans une boîte : 64%
- empilement d'oranges : 74%











Astronomy & Astrophysics manuscript no. hanus\_2015\_models\_AA\_final October 21, 2015

#### © ESO 2015

## New and updated convex shape models of asteroids based on optical data from a large collaboration network

J. Hanuš<sup>1,2,\*</sup>, J. Ďurech<sup>3</sup>, D.A. Oszkiewicz<sup>4</sup>, R. Behrend<sup>5</sup>, B. Carry<sup>2</sup>, M. Delbo<sup>2</sup>, O. Adam<sup>6</sup>, V. Afonina<sup>7</sup>,
R. Anquetin<sup>8</sup>, P. Antonini<sup>9</sup>, L. Arnold<sup>6</sup>, M. Audejean<sup>10</sup>, P. Aurard<sup>6</sup>, M. Bachschmidt<sup>6</sup>, B. Baduel<sup>6</sup>, E. Barbotin<sup>11</sup>,
P. Barroy<sup>8</sup>, P. Baudouin<sup>12</sup>, L. Berard<sup>6</sup>, N. Berger<sup>13</sup>, L. Bernasconi<sup>14</sup>, J-G. Bosch<sup>15</sup>, S. Bouley<sup>8</sup>, I. Bozhinova<sup>16</sup>,
J. Brinsfield<sup>17</sup>, L. Brunetto<sup>18</sup>, G. Canaud<sup>8</sup>, J. Caron<sup>19,20</sup>, F. Carrier<sup>21</sup>, G. Casalnuovo<sup>22</sup>, S. Casulli<sup>23</sup>, M. Cerda<sup>24</sup>,
S. Charbonnel<sup>25</sup>, B. Chinaglia<sup>22</sup>, A. Cikota<sup>26</sup>, F. Colas<sup>8</sup>, J-F. Coliac<sup>27</sup>, A. Collet<sup>6</sup>, J. Coloma<sup>28,29</sup>, M. Conjat<sup>2</sup>,
E. Conseil<sup>30</sup>, R. Costa<sup>28,31</sup>, R. Crippa<sup>32</sup>, M. Cristofanelli<sup>33</sup>, Y. Darmedji<sup>34</sup>, A. Debackere<sup>35</sup>, A. Decock<sup>34</sup>, Q. Déhais<sup>36</sup>,
T. Déléage<sup>35</sup>, S. Delmelle<sup>34</sup>, C. Demeautis<sup>37</sup>, M. Drozdz<sup>38</sup>, G. Dubos<sup>8</sup>, T. Dulcamar<sup>6</sup>, M. Gillon<sup>34</sup>, R. Gurkee<sup>39</sup>,
R. Dymock<sup>40</sup>, N. Esseiva<sup>41</sup>, R. Esseiva<sup>41</sup>, M. Esteban<sup>24,42</sup>, T. Fauchez<sup>34</sup>, M. Fauerbach<sup>43</sup>, M. Fauvaud<sup>44,45</sup>,
S. Fauvaud<sup>44,45,8</sup>, E. Forné<sup>28,46</sup>, D. Fradel<sup>8</sup>, J. Garlitz<sup>47</sup>, O. Gerteis<sup>6</sup>, C. Gillier<sup>48</sup>, M. Gillon<sup>34</sup>, R. Giraud<sup>34</sup>,
J-P. Godard<sup>8</sup>, R. Goncalves<sup>49</sup>, H. Hamanowa<sup>50</sup>, H. Hamanowa<sup>50</sup>, K. Hay<sup>16</sup>, S. Hellmich<sup>51</sup>, S. Heterier<sup>52,53</sup>,
D. Higgins<sup>54</sup>, R. Hirsch<sup>4</sup>, G. Hodosan<sup>16</sup>, M. Hren<sup>26</sup>, A. Hygate<sup>16</sup>, N. Innocenf<sup>6</sup>, H. Jacquinot<sup>55</sup>, S. Jawahar<sup>56</sup>,
E. Jehin<sup>34</sup>, L. Jerosimic<sup>26</sup>, A. Klotz<sup>57,58,6</sup>, W. Koff<sup>59</sup>, P. Korlevic<sup>26</sup>, E. Kosturkiewicz<sup>38</sup>, P. Krafft<sup>6</sup>, Y. Krugly<sup>60</sup>,
F. Kugel<sup>19</sup>, O. Labrevoir<sup>6</sup>, J. Lecacheux<sup>8</sup>, M. Lehky<sup>61</sup>, A. Leroy<sup>8,62,63</sup>, B. Lesquerbault<sup>6</sup>, M.J. Lopez-Gonzales<sup>64</sup>,
M. Lutz<sup>6</sup>, B. Mallecot<sup>8</sup>, J. Manfroid<sup>34</sup>, F. Manzini<sup>32</sup>, A. Marciniak<sup>4</sup>, A. Martin<sup>65,66</sup>, B. Modave<sup>6</sup>, R. Montaigut<sup>8,48,63</sup>,
J. Montier<sup>52,53</sup>, E. Morelle<sup>27</sup>, B. Morton<sup>16</sup>, S. Suotlo<sup>31</sup>, R. Naves<sup>67</sup>, J. Nomen<sup>26</sup>, J. Oey<sup>68</sup>, W. Ogloza<sup>38</sup>, M. Paiella<sup>33</sup>,</l

(Affiliations can be found after the references)

















