

TEAM ASTROPHOTO - SAR

Les bonnes pratiques et techniques en astrophoto

Qu'est ce qui fait une bonne image en astrophoto ?

Quelles sont les bonnes pratiques et techniques à approfondir en imagerie ?

Une approche globale (1)

Qu'est ce qui fait une bonne image en astrophoto ?

- ❖ *Un objet et/ou évènement céleste, bien cadré avec un champ intéressant, Un évènement rare ou zone peu photographiée, une composition réussie,...*
- ❖ *Une image correctement exposée, avec une bonne dynamique, bien nuancée et bien équilibrée (N&B ou palette de couleurs), une image nette avec du piqué et du contraste*
- ❖ *Une image sans artefacts de traitements,*
 - *une image avec un bon prétraitement et traitement*
 - *hors du scope de cette présentation centrée sur l'acquisition*
- ❖ *Un bon système d'imagerie selon le type de cibles*
 - *Planétaire/Lunaire/solaire/Ciel Profond etc...*
 - *présentation centrée sur le ciel profond*

Gotlib (Rubrique à bras)



Une approche globale (2) : la chaîne d'imagerie en Astrophoto

→ *Ce n'est pas seulement une question de performance de caméra, mais c'est la maîtrise de la configuration globale qu'il faut considérer*



Une approche globale (3)

Quels sont les critères déterminants d'une bonne astrophoto?

- ◆ Site et sa qualité de ciel (*Transparence, Pollution Lumineuse, Amplitude de Turbulence, SQM, Bortle class,....*)
- ◆ Qualité de l'optique et de son réglage sur l'ensemble de la chaîne optique (objectif photo/lunette/télescope + correcteur/réducteur) (*diamètre, focale, rapport F/D, résolution, spot diagram, champ corrigé/champ de pleine lumière, collimation, mise au point, mise en température....*)
- ◆ Mécanique : monture (*alignement polaire, qualité de pointage précis, possibilité de synchronisation via platesolving, qualité de suivi ou erreur périodique, qualité d'autoguidage, charge supportée versus charge max*)
- ◆ Système d'imagerie : caméra de guidage et d'imagerie (*taille du capteur et du pixel, nombre de photosites, sensibilité spectrale, rendement quantique, bruit de lecture, capacité de stockage d'électrons, numérisation/nb de bits, filtres.*)

Une approche globale (4)

toutes les erreurs s'ajoutent (mais ne pèsent pas forcément le même poids):

- Amplitude de la turbulence pendant la pose (1" à 3" en général)
- Mauvaise collimation de l'optique
- Mauvais backfocus du système d'imagerie (distance de focalisation sur le capteur)
- Tilt de la caméra ou du correcteur (défaut d'orthogonalité...)
- Mauvais centrage de la cible et/ou mauvais cadrage
- Erreur de mise au point
- Erreur de suivi et de guidage
- Fatigue et âge du capitaine !!!
- etc...

➤ **Attention notamment à la collimation, au backfocus, à la mise au point et à la qualité du guidage**



Une approche globale (5)

Quelles sont les bonnes pratiques et techniques à approfondir en imagerie ?

- Quel est l'impact de la qualité du site ?
- Quelles cibles choisir ? avec quel champ ?
- Qu'est ce qui impacte la qualité optique de mon télescope ?
- Qu'est ce qui impacte la qualité mécanique de ma monture ?
- Quels sont les équipements d'imagerie ? les techniques associées ?



Qualité du Site (1)



s'éloigner de la pollution lumineuse

- vérifier sur un site comme :
<https://avex-asso.org/dossiers/pl/europe-2016/index.html>
- voir l'échelle de bortle sous Clear outside : c'est une échelle numérique à neuf niveaux qui mesure le niveau de luminosité du ciel nocturne dans un endroit déterminé :
<https://clearoutside.com/forecast/47.89/-1.50>



Qualité du Site (2)

Regarder les prévisions Météo

- consulter les sites comme Meteoblue, Meteociel, Clear Outside, Windy, les cartes satellites comme Sat24

Consulter les éphémérides (lever et coucher du soleil, lever et coucher de lune, voie lactée, autres évènements célestes,...)

- beaucoup de logiciels sur PC de type carte du ciel, stellarium ou petites applications sur smartphone
- Le guide du ciel (mois par mois) de Guillaume Cannat
- Un outil très complet Photopills sur smartphone

Choix de la Cible (1)

- Il n'y a pas de configuration parfaite permettant de photographier tous les types d'objets
- un choix est à faire ou bien il faut pouvoir disposer de plusieurs configurations instrumentales (ce qu'on appelle encore "setup")

- *Quel est le nb d'objets en fonction de leur taille et de leur type ?*
- Les grands objets (>2 degré) sont les moins nombreux
- Il y a un nb significatif d'objets entre 30' et 2 degrés (plutôt destinés aux courtes focales)
- la majorité des objets a un diamètre entre 1' à 30'
- Plus les objets sont petits, plus ils sont assez souvent difficiles à imager.

	Messier	NGC	IC	Arp	Hickson	Abell_GC	PNG	LBN	LDN	Sh	Barnard	VdB
>20°	0	0	0	0	0	0	0	3	0	4	0	1
2° à 20°	6	16	14	1	0	35	0	334	285	59	10	6
30' à 2°	17	89	25	9	0	1379	0	349	443	64	31	17
10' à 30'	81	624	55	95	17	475	30	285	800	94	58	66
1' à 10'	7	6214	3142	233	185	0	227	154	251	92	45	67
<1'	0	394	1248	0	358	0	674	0	0	0	2	0

(source : Axel Vincent-Randonnier de l'asso astro AVEX)

Choix de la cible (2) Champ de l'objet à photographier

Le champ réel (en degré ou minutes d'arc) dépend de la taille du capteur et de la focale de l'objectif utilisé

En fonction de l'objet et du champ à photographier, déterminer le champ approprié et en déduire quelle combinaison focale/capteur choisir



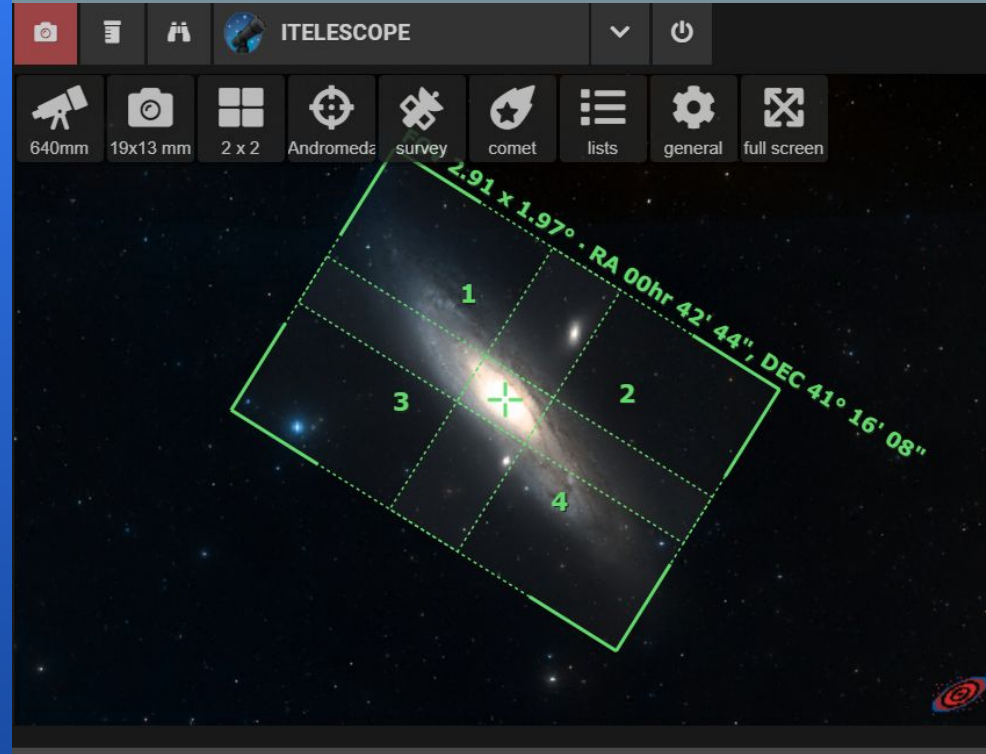
Champ couvert par le capteur en fonction de sa taille et de la focale											
Champ en minutes d'arc = 3438 x dimension en mm/focale en mm											
Champ en degré = 57,3 x dimension en mm/focale en mm											
		Focale mm	Focale mm	Focale mm	Focale mm	Focale mm	Focale mm	Focale mm	Focale mm	Focale mm	Focale mm
Camera	Taille Capteur- mm	135	200	400	600	800	1000	1500	2000	2500	3000
ASI183M/C	13,2	336	227	113	76	57	45	30	23	18	15
	8,8	224	151	76	50	38	30	20	15	12	10
ASI533C	11,31	288	194	97	65	49	39	26	19	16	13
	11,31	288	194	97	65	49	39	26	19	16	13
ASI294C	19,1	486	328	164	109	82	66	44	33	26	22
	13	331	223	112	74	56	45	30	22	18	15
ASI1600M/C	17,7	451	304	152	101	76	61	41	30	24	20
	13,4	341	230	115	77	58	46	31	23	18	15
ASI2600C	23,5	598	404	202	135	101	81	54	40	32	27
	15,7	400	270	135	90	67	54	36	27	22	18
ASI6200M/C	36	917	619	309	206	155	124	83	62	50	41
	24	611	413	206	138	103	83	55	41	33	28
		Champ < 40° pour des objets <30°									
		40°< Champ < 120° pour des objets entre 20 ° et 90°									
		2 degrés <champ pour des objets plus étendusou groupe de 2 objets									

champ calculé dans ce tableau en minutes d'arc

Choix de la cible (3)

Les mosaïques d'images

- pour agrandir le champ photographié, on peut utiliser plusieurs champs avec un recouvrement de 30% entre chaque photo et réaliser des mosaïques grand champ
- outils pour simuler : Telescopius sur le net, ou Sequence Generator Pro (SGP)
- outils pour piloter automatiquement la prise de vue et centrer (SGP : fonction framing and mosaics)



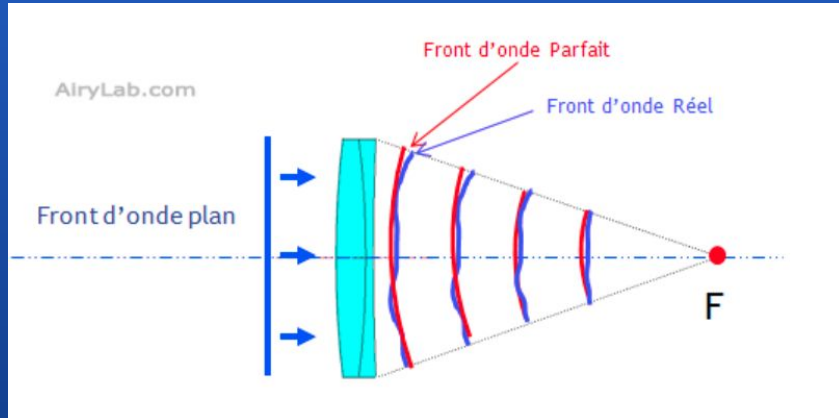
exemple avec Telescopius :

<https://telescopius.com/deep-sky/object/1107/andromeda-galaxy/m-31/galaxy>

Télescope (1)

Qualité optique

- Selon la formule optique, avoir la bonne forme (sphérique ou asphérique) et avoir un bon état de surface à l'échelle microscopique.
- L'optique transforme un front d'onde plan en front d'onde sphérique.
- Les défauts de cette optique seront donc les écarts du front d'onde résultant par rapport à un front d'onde sphérique parfait ayant pour rayon la focale de l'instrument.



(source : AiryLab Thierry Jabet

Comment mesure-t-on ces écarts ?

- par exemple dans le cas d'un défaut de 63 nm pour une onde rouge à la longueur d'onde de 632 nm, on dira que l'onde est en retard ou en avance de 1/10 d'onde. ou que le défaut est de $\Lambda/10$ ($L/10$).
- La mesure est très dépendante de la longueur d'onde. pour une longueur d'onde de 532nm, ce même défaut est de $L/8,5$ ce qui sera moins bon. Plus petit est le diviseur, plus mauvais sera le résultat.
- **ecart RMS, ou Root Mean Square** : c'est un lissage de toutes les erreurs du front d'onde qui donne une valeur moyenne de l'erreur sur toute la surface du miroir
- **rapport de strehl** : caractérise la répartition de l'énergie entre la tâche centrale de diffraction et les anneaux périphériques. c'est donc un reflet de la qualité de l'optique.

Télescope (2)

Taille et forme de la tâche de diffraction d'une étoile

en théorie

- pour une lunette de 72mm F6, la tâche de diffraction d'une étoile a un diamètre de 8 microns
- pour une lunette de 100mm F5, la tâche d'airy a un diamètre de 6.7 microns
- pour un télescope de 200mm F4,, la tâche d'airy a un diamètre de 5.3 microns

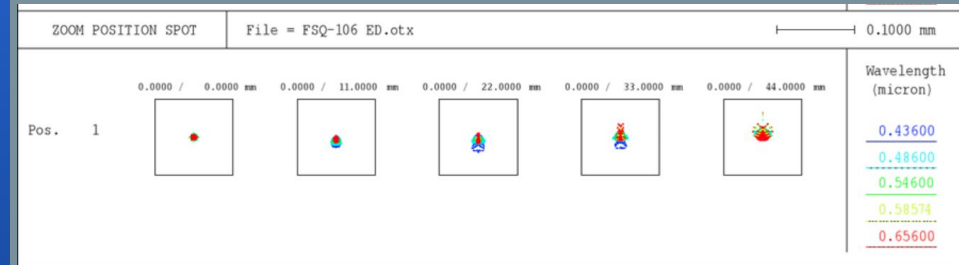
Pour une optique excellente et sur l'axe optique on pourra atteindre ces valeurs

Plus on s'éloigne du centre, plus la tâche s'allonge et nécessite l'ajout de correcteurs optiques...

en pratique, on mesure la taille et la forme de la tâche de diffraction sur tout le champ à différentes distances du centre et selon différentes longueurs d'onde.

on obtient un spot diagram permettant d'illustrer concrètement à quoi s'attendre sur tout le champ, par exemple pour une Takahashi 106mm

- au centre quasi parfait autour de 6 à 7 microns
- à 11mm du centre environ 10 à 12 microns ..



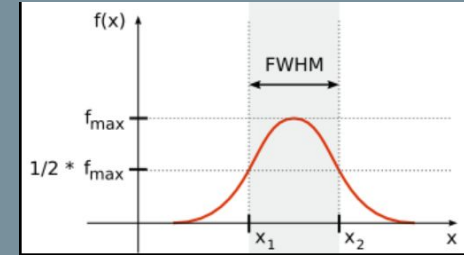
La taille de cette tâche est à mettre en relation avec la taille du pixel et l'échantillonnage choisi...c'est un des paramètres du graal astro qu'est le fameux piqué de l'image !!!

Télescope (3)

Résolution et Turbulence

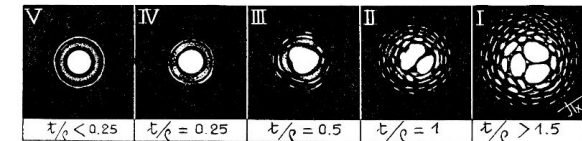
- **La résolution ou pouvoir séparateur d'un télescope est la capacité à séparer une étoile double**
- Résolution en secondes d'arc = $0,252 \cdot \frac{\text{Longueur d'onde en nm}}{\text{diametre en mm}}$
- lunette de 72mm dans le vert-jaune (550nm), $R = 1.93''$
- lunette de 100mm, $R = 1.39''$
- télescope de 200mm, $R = 0.69''$
- élescope de 300mm, $R = 0,46''$
- **sans turbulence, le pouvoir séparateur d'un télescope est limité par sa résolution**
- **avec la turbulence, à partir d'une certain diamètre, tout se passe comme si votre télescope avait un diamètre moins important, car la tâche image va être étalée**

- Comment la visualiser et mesurer ? par la mesure à mi hauteur du pic de lumière d'une étoile (appelée FWHM - Full Width at Half Maximum)



- La plupart du temps et sur la plupart des sites, l'amplitude de la turbulence sur une durée de quelques secondes à quelques minutes est largement supérieure à la résolution de l'instrument

COTE	t	DESCRIPTION (voir fig. 149)
V	$t < 0,25 \rho$	Images parfaites, sans déformation sensible et à peine agitées.
IV	$t = 0,25 \rho$	Anneaux complets, parcourus par des condensations mobiles.
III	$t = 0,5 \rho$	Agitation moyenne, anneaux de diffraction brisés, taches centrales à bords ondulants.
II	$t = \rho$	Agitation vive, anneaux évanouissants ou absents.
I	$t > 1,5 \rho$	Image tendant vers l'aspect planétaire.



Télescope (4)

Champ de pleine lumière et champ corrigé

à mesure que l'on s'éloigne de l'axe optique de l'instrument

- la luminosité ou valeur captée par un pixel (ADU) se dégrade >>> Vignettage augmente
- la qualité d'image se dégrade (forme et taille des étoiles) >>> FWHM diminue
- plus le capteur est grand, plus il exige une optique avec un champ bien corrigé loin de l'axe optique, et plus il est sensible au "tilt", c'est-à-dire aux erreurs d'orthogonalité par rapport à l'axe optique.
- plus le capteur est grand, plus l'optique (instrument+correcteur/réducteur) et mécanique (système de mise au point+diviseur optique...), à associer à la caméra coûte cher...

- Attention au champ de pleine lumière corrigé ! un capteur grand champ 24x36mm ne sera pas bien utilisé, si votre champ corrigé est de 22mm (à comparer avec la diagonale du capteur plein format de 44mm)
- pour éviter les vignettages mécaniques et réflexions internes, il faut bien surdimensionner toutes les bagues et vérifier l'absence de reflets dans les bagues de montage
- En fin de chaîne, la dernière source de vignettage : le diamètre des filtres.
- Le vignettage résiduel est facilement corrigeable avec un bon prétraitement de l'image (Flats)



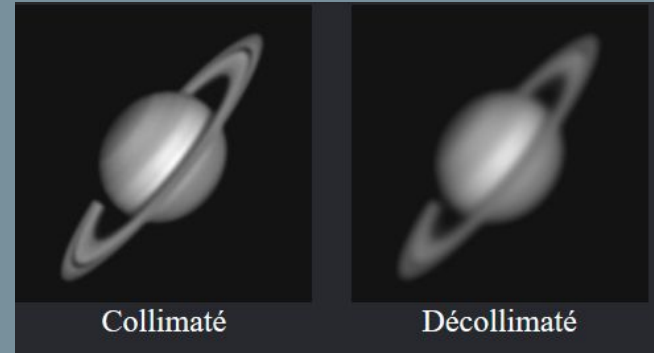
(source Marc Jousset : <http://astrosurf.com/jousset/>)

Télescope (5)

Collimation

- Consiste à vérifier la forme de la tache de diffraction en intra et extra focale et au focus.
- Gros avantage aux Lunettes qui sont préréglées et pour lesquelles on ne retouchera pas soi-même la collimation
- Pour la plupart des télescopes (Newton, Schmidt-Cassegrain, Ritchey-Chrétien, etc..), il est indispensable de vérifier régulièrement la collimation

- Une mauvaise collimation peut dégrader énormément la performance du télescope
- en imagerie, on cherche à disposer du meilleur piqué sur tout le champ à imager (donc pas seulement le centre...)



source : Thierry Legault Astrophoto 3ème édition

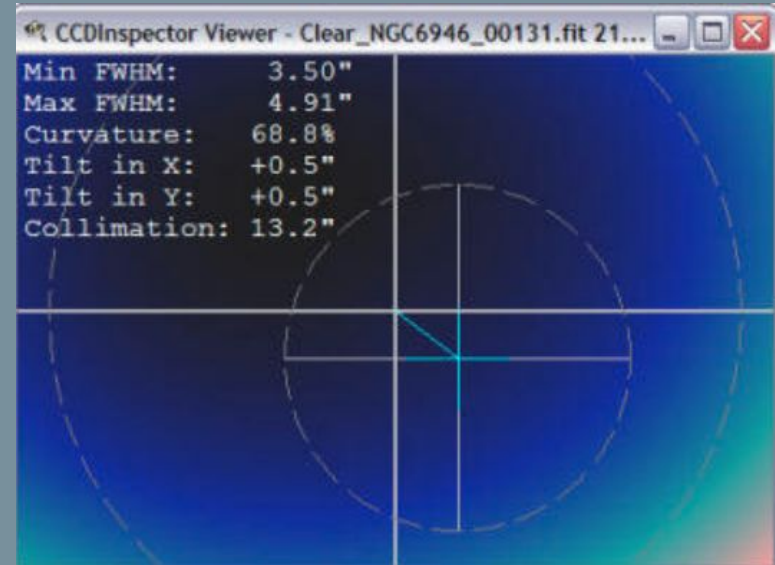
Télescope (6)

Procédure de collimation

La procédure peut varier selon les formules optiques, mais en général on procèdera en 3 temps

1. de jour, avec un laser pour centrer les pièces principales par exemple miroir secondaire et primaire
 - a. Outil Cheshire et Laser
2. de nuit, sur une étoile au centre du champ, au focus et en intra/ extra focale pour vérifier le centrage fait au laser et ajuster au primaire
 - a. en visuel voir l'excellente procédure de Thierry Legault :
http://www.astrophoto.fr/collim_fr.html

3. de nuit, avec la caméra pour vérifier sur tout le champ et ajuster aux 4 coins avec un outil d'analyse d'image comme CCDInspector :



source : Logiciel CCDInspector (CCDware)

Télescope (7)

Rapport F/D (Focale/diamètre)

- ❑ La quantité de lumière collectée varie selon le carré du diamètre de l'objectif
- ❑ Une lunette de 100mm est 4 fois plus lumineuse qu'une lunette de 50mm
- ❑ Comme en photo classique, plus le rapport F/D est petit, plus le système d'imagerie est rapide (temps de pose nécessaire plus court pour avoir une exposition correcte).
- ❑ Un télescope à F/D 3 est 4 fois plus rapide qu'un télescope à F/D 6

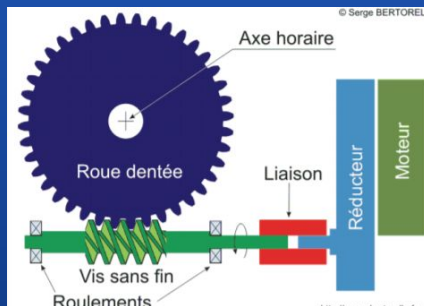
Quel Télescope pour faire quoi ?

- Pour le piqué et qualité de l'image, la taille du champ corrigé, et une collimation stable préréglée, favoriser les lunettes par rapport aux télescopes
- Pour le grand champ, favoriser les lunettes à courte focale (entre 250 à 450mm) et rapport F/D entre 4 et 6
- Pour améliorer la rapidité de prise de vue (poser moins longtemps à quantité de lumière équivalente), favoriser les télescopes à partir de 150/200 mm de diamètre et rapport F/D 3 à 6 avec correcteur optique.

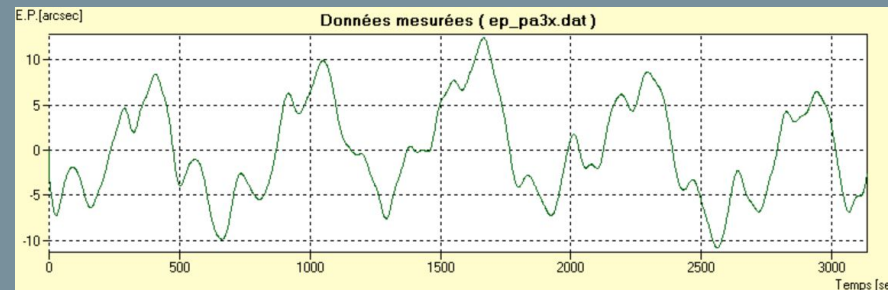
Mécanique (1)

une bonne monture, comment l'évaluer ?

- en fonction de son poids pour le transport si le mode nomade est envisagé
- selon la stabilité du trépied ou pied colonne associé
- sa capacité de charge maximale
 - ◆ *par rapport à cette capacité max, ne pas dépasser 50% à 66% de cette capacité pour assurer un bon suivi*
- ses fonctions de pilotage en mode GOTO avec raquette,, la possibilité de pilotage par ordinateur
- le type d'entraînement par courroie (plus performant que les roues dentées)



- sa qualité de suivi ou erreur périodique (correspondant à la mesure de la dérive en ascension droite pour un tour de vis sans fin)
- en général autour de ± 10 à $15''$ pour les montures de qualité moyenne, de ± 5 à $10''$ pour une qualité supérieure et inférieure à $\pm 5''$ pour les montures de plus
- Mesure par PH2Guiding, PHD2 Log Viewver , ou PEMPRO
- exemples de procédures : <https://www.webastro.net/forums/topic/171841-comment-mesurer-lerreur-p%C3%A9riodique/>



Mécanique (2)

Alignement Polaire

- en prérequis à tout pointage et guidage de précision, il faut aligner l'axe de rotation en ascension droite de la monture, sur la polaire
 - ◆ via viseur polaire en manuel et vis de réglages en azimuth et en hauteur de la monture (*précision moyenne et parfois pénible à réaliser selon la qualité du viseur*)
 - ◆ via un chercheur, lunette guide ou instrument principal et d'une caméra pour un alignement assisté par logiciel (*polemaster, polaralign, ipolar selon les modèles...*) (*bonne à très bonne précision de pointage*)
- *La précision de l'alignement recherché est de l'ordre de la minute d'arc*

Pointage et centrage de la cible

- le centrage précis sur l'objet à photographier est possible grâce à la résolution astrométrique du champ photographié (repérage des coordonnées précises du centre de la photo, de la focale et échantillonnage) (*fonction de Platesolving*)
- via un logiciel de pilotage de caméra disposant de la fonction de *platesolving (avec catalogues d'étoiles et d'objets stockés)* :
 - ◆ après alignement polaire, pointage de l'objet en GOTO grace aux catalogues stockés, prise d'une image avec la caméra, lancement du platesolving pour reconnaître la position exacte de pointage, resynchro de la monture et pointage/centrage précis de la cible
 - ◆ Outils de platesolving intégré aux outils de pilotage caméra et pointage de télescope (SGP, ASIAIR, NINA, etc...)
 - ◆ Platesolving sur une image précédente, gestion de mosaïques

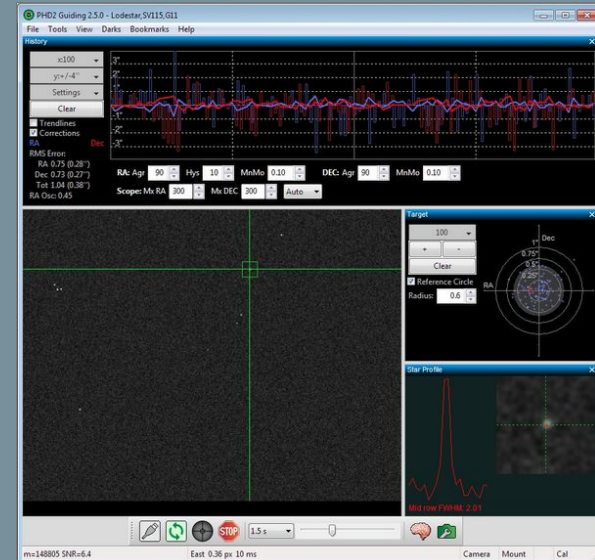
Mécanique (3)

Autoguidage en pose longue

- Pour compenser toutes les irrégularités de suivi de sa monture, en agissant directement sur les moteurs des 2 axes, via des corrections de recentrage sur une étoile guide pendant toute la durée de la pose.
- **Logiciel d'autoguidage** : le plus connu PHD2, mais il en existe plusieurs, y compris aussi intégrés dans le nouveau boîtier ASI AIR de ZWO, ou autre boîtier de type MGEN Lacerta. Le bon paramétrage de l'outil est indispensable
- ***Selon la focale d'imagerie, pour être efficace, la qualité de suivi doit être de l'ordre de 0.5 à 1" et au delà de 1 à 2" si la focale est TR7S courte (téléobjectif par exemple)***
- Très bon tuto très complet : <http://www.astroantony.com/tutoriel/PDF/Autoguidage.pdf>

- Le guidage peut se faire soit en parallèle avec une petite lunette ou bien avec un diviseur optique
- pour une lunette guide, comme la précision de guidage est de l'ordre de 1/10 de pixel, la focale guide peut être beaucoup plus petite que celle de l'imageur.
- par exemple une 60/240mm de focale permettra de guider des télescopes jusqu'à 1500mm de focale

voir l'outil PHD2 Guiding : <https://openphdguiding.org/>



Les 10 règles d'or d'un bon autoguidage avec PHD 2 Guiding

Le matériel

- Guidage dans l'axe avec diviseur optique ou
- Guidage en parallèle avec lunette guide (sans flexions)

Principes :

- focale de guidage à 1/5 max de la focale imageur (avec des tailles de pixel entre guidage et imagerie équivalent).

ex : lunette guide avec 200mm de focale peut guider un télescope de 1000mm de focale max.

- monture pilotable en direct en ASCOM (mieux que par port ST2), vitesse de guidage entre X0.5 et X0.9

- alignement polaire réalisé

- logiciel d'autoguidage (PHD2 Guiding ou équivalent)

Les 10 règles

1. Lunette guide bien centrée et alignée par rapport au télescope

2. Axes caméra alignés avec AD et DEC (pas obligatoire mais mieux)

3. Faire une librairie de darks avec la caméra de guidage de 1 seconde à 4 secondes de poses.

4. Préférer le bin 2 pour améliorer la sensibilité selon la caméra de guidage

5. Paramétrer la calibration avec la bonne focale de la lunette guide, le bon binning et pas de calibration adapté

Les 10 règles

6. Choisir une étoile avec la touche Alt S pour avoir une étoile ni sous exposée ni sur exposée (vérifier le profil bien pointu avec un bon rapport signal sur bruit)

7. Lancer la calibration sur une étoile proche de l'équateur et du méridien (+/-1h en AD et 0 degré DEC à +/-10 degré)

8. Vérifier le résultat de la calibration (orthogonalité,...)

9. Pointer l'objet à photographier et choisir l'étoile de guidage avec Alt S

10. Lancer l'assistant de guidage et appliquer ses recommandations au bout de 3 minutes : temps de pose, min motion en AD et DEC, backslash (+vérifier la mesure de l'alignement polaire fourni)

Les ajustements possibles

1. observer les corrections en AD et DEC en affichant les barres verticales rouges et bleues de corrections

2. en cas de modifs, ne faites varier qu'un paramètre à la fois et de façon pas trop importante et observer l'effet

2. si sur corrections (alternance de corrections après chaque pose dans un sens et un autre), diminuer l'aggressiveness ou augmenter le min move de l'axe concerné, si sous corrections, faire l'inverse

3. min move devrait correspondre à environ 1/2 pixel du capteur principal

3. augmenter le temps de pose pour lisser les variations de turbulence

5. augmenter l'hystérésis pour lisser et moyenner les corrections

6. rester avec les algorithmes de base sauf si ils ne conviennent pas, alors essayer lowpass ou resist switch en AD, etc..

Un bon guidage = entre 0.3" et 1" total RMS (ou max équivalent à 1/2 pixel du capteur principal)

Site Phd2 Guiding : <https://openphdguiding.org/>
Docs en français (@Astro Antony) :

https://drive.google.com/drive/folders/1Nt9GMJc-vlhq4dP_Dof_27k-nRHqAK6E?usp=sharing

Imagerie (1)

Backfocus et correcteur Optique

- la position exacte où placer le capteur pour avoir une image parfaitement focalisée :
 - soit le foyer ou point focal de la lunette ou télescope
 - soit la distance du correcteur optique intégré ou non au télescope ou lunette

- *Très important à respecter, pour avoir un champ parfaitement corrigé souvent à +/- 1 mm)*
- *attention : les filtres allongent le backfocus de $\frac{1}{3}$ de leur épaisseur soit en général environ 1mm*
- *Dans quel ordre ?
La caméra, puis La roue à filtres, le plus près du capteur, le diviseur optique devant la roue à filtres*
- *en option : un rotateur devant l'ensemble.*

- Selon ce tirage optique ou backfocus, on va pouvoir placer avant le capteur plusieurs équipements comme une roue à filtres, diviseur optique etc...
- exemple avec une camera ASI1600 et correcteur avec 56mm de backfocus
- source ZWO Astronomy-Imaging :
<https://astronomy-imaging-camera.com/product/asi1600mm-cool>



Imagerie (2)

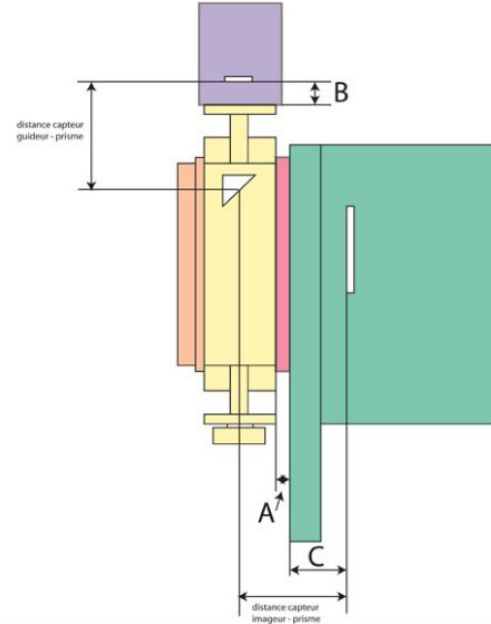
Guidage par diviseur optique

- On peut remplacer une lunette guide par un diviseur optique sur l'axe du télescope
 - Meilleure précision car on guide directement sur l'image en prélevant une toute petite partie du champ
 - comment réaliser le montage ?
- *respecter globalement le backfocus tout en respectant l'égalité entre la distance du prisme vers le capteur de guidage et la distance du prisme vers le capteur d'imagerie*
- *formule de calcul spécifique au diviseur optique*

Calcul du positionnement de votre diviseur optique SKYTRACK

La distance entre le prisme et le capteur imageur doit être la même afin que la mise au point des deux caméras (d'imagerie et de guidage) soit au mieux en même temps. Nous pouvons donc en déduire la formule suivante qui vous permettra de calculer le positionnement du diviseur optique et donc la largeur de la bague d'adaptation qui se situe entre celui-ci et la caméra : (nota : les calculs ont été faits en tenant compte des valeurs moyennes de réglage en hauteur de la caméra de guidage et du prisme.)

$$A = (B + 43 \text{ mm}) - (C + 15.9 \text{ mm})$$



source skymeca :

<http://skymeca.com/accessoires-pour-telescopes/60-diviseur-optique-skytrack-2-5.html>

Imagerie (3)

roue à filtres et filtres

- Type de roue selon la dimension des filtres et le nombre
 - 5 positions type LRGB
 - 7 positions type LRGB-SHO
 - motorisée de préférence
- Beaucoup de formats disponibles
 - 31,75mm (filetage 28mm), 50,8mm (filetage 48mm)
 - 31mm rond non monté, 36mm rond non monté,
 - 50mm rond non monté, 50x50 carré, etc...
- *Qualité très variable selon les prix, mais des filtres de bonne qualité feront la différence !!!*
- *en SHO, filtres à bande étroite en Ha, OIII et SII pour les nébuleuses, regarder de près la sensibilité spectrale et bande passante en nm (en général entre 20nm et 3nm)*
- Quelques marques Astrodon, Chroma, Astronomik, Baader, Optolong, ZWO,... etc...

attention à la dimension des filtres, pour éviter tout vignettage (mettre la roue le plus près du capteur)

→ Formule simple de calcul :

Diametre_filtre = distance_filtre_capteur / (F/D) + diagonale_capteur

F/D = rapport Focale / diametre

exemples :

pour un télescope de 200mm à F/D 5, distance filtre-capteur de 20mm et diagonale capteur de 22mm, le diamètre mini des filtres doit être de : $20/5 + 22 = 26\text{mm}$, donc ça passe avec du 31,75mm en filetage de 28mm

Imagerie (4)

Choix d'un modèle de caméra

1. **Couleur ou monochrome** ? :

en fonction de l'expérience et de la simplicité et rapidité de mise en oeuvre recherchée, et du niveau de détails attendus

- novice ou peu expérimenté : démarrer avec une caméra couleur plutôt que monochrome
- en monochrome : démarrer avec des filtres LRVB puis SHO seulement dans un 2ème temps

2. **Quelle Taille de capteur** ? :

en fonction des objets cibles à photographier **et du champ corrigé disponible en sortie de mon optique** (calculer le champ obtenu et vérifier que ce champ est adapté aux objets cibles)

- ne pas choisir une taille de capteur trop grand (diagonale entre 13 à 22 max)
- inutile d'avoir un capteur de grande taille en format 24x36mm si le champ corrigé est entre 16 à 22mm
- Un capteur de grande taille implique des filtres de grande taille et ça coûte cher !!

3 . **Quelle taille de pixel** :

- fonction de l'échantillonnage recherché et de ma maîtrise technique (voir slides 12 à 20)
- Des petits pixels (aux alentours de 2 à 3 microns) seront plus exigeants en qualité optique/mécanique et maîtrise. Par contre ils permettent de simuler un allongement de focale et donc de grandissement

4. **Quel investissement** ? :

- en fonction de l'expérience et de la maîtrise des techniques instrumentales sur la chaîne d'imagerie complète
- Pour un 1er investissement, préférer des caméras aux alentours de 1000 euros sans les filtres (type 183, 533, 294, 1600....) , (environ 1500 Euros avec les filtres LRGB).Le prix est en rapport avec la taille du capteur
- Ensuite si le champ corrigé le permet, aller vers des capteurs de plus grande taille jusqu'au plein format 24x36mm (2400, 2600, 6200, etc...), entre 2300 à 5500 euros avec les filtres en 2" ou format carré 50x50mm.
- à noter que le filtres et roue à filtres en format 2 pouces sont chers et sont indispensables pour des caméras en plein format (type 24x36mm)

Imagerie (5) Caméra couleur

- Une matrice de Bayer (micro filtres colorés) est ajoutée devant le capteur, avec 2 pixels verts pour 1 pixel bleu et rouge. un algorithme de calcul est appliqué pour reconstituer la couleur
- moins sensible qu'une caméra monochrome (d'un facteur 2 à 3 selon les caméras et technos), mais en une passe, on fait l'équivalent de 3 poses RVB en monochrome
- les nouvelles caméras couleur CMOS sont de plus en plus performantes.
- Possibilité aussi d'utiliser des filtres pour lutter contre la pollution et filtrer le Ha et OII avec des filtres duo narrowband (Optolong L-Enhance...)
- **Quand l'utiliser ? : quand on débute ou pour simplifier la mise en oeuvre et gagner du temps pour la prise de photos RVB (pas de roues à filtres). Permet de réduire aussi les traitements (par rapport à du RVB en monochrome)**

Caméra monochrome

- **Nécessité d'ajouter une roue à filtres** pour reconstituer la couleur en RVB ou LRVB
- La couche Luminance contient les détails et nécessite un temps de pose total plus long que le RVB qui sera utilisé pour reconstituer la couleur
- en cas de pollution lumineuse, pour la couche L, possibilité d'utiliser un filtre anti pollution ou un filtre Ha
- possibilités d'ajouter des filtres en Ha, OIII et SII notamment pour les combinaisons multiples en fausses couleurs SHO (Palette de Hubble)
- possibilités étendues de combiner des poses en Ha et OIII avec des poses LRVB
- **Quand l'utiliser ? : pour plus de fins détails et de fins contrastes, pour de l'imagerie en SHO et en global un rendu meilleur**

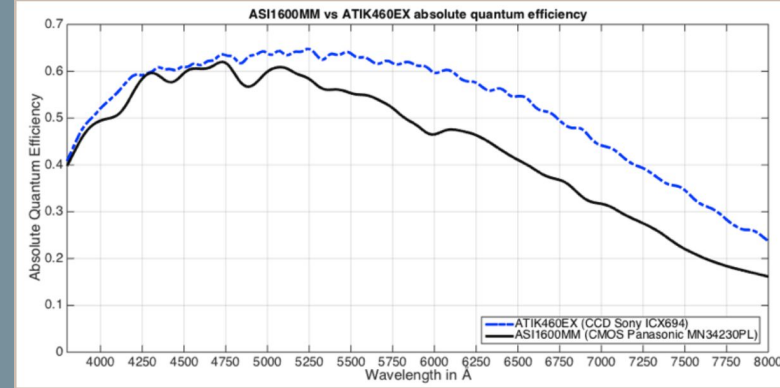
Imagerie (6)

autres critères de choix de caméra

- **Capacité de stockage en e-** : plus elle est grande, meilleur c'est (car saturation moins rapide)
- **Bruit de lecture et bruit thermique**
- **Nb de bits de numérisation (12 à 16 bits)** : plus le nb de bits est élevé, plus la conversion du signal est précise
- **Refroidissement** (> -15degré et au delà) : indispensable : un refroidissement de bon niveau est de l'ordre de -15 à -30 degré avec un système de refroidissement tournant en dessous de 100%

Exemple pour la camera ASI1600MM
<https://astronomy-imaging-camera.com/product/asi1600mm-cool>

Courbe de rendement quantique et sensibilité spectrale
rapport entre le nb de photons reçus et le nombre d'électrons générés en standard plutôt autour de 60%).
c'est le rendement selon la longueur d'onde de l'ultraviolet à l'infrarouge



source : Christian Buil

http://www.astrosurf.com/buil/atik_vs_zwo/http://www.astrosurf.com/buil/atik_vs_zwo/

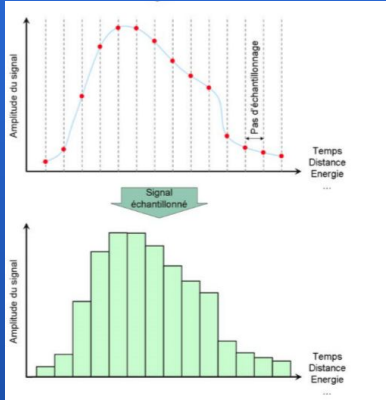
à noter le rendement varie avec la longueur d'onde.

- Les nouvelles caméras CMOS rétro-éclairées ont un rendement quantique de l'ordre de 85%, donc en théorie nettement plus sensibles que les CCD aux alentours de 50 à 60%

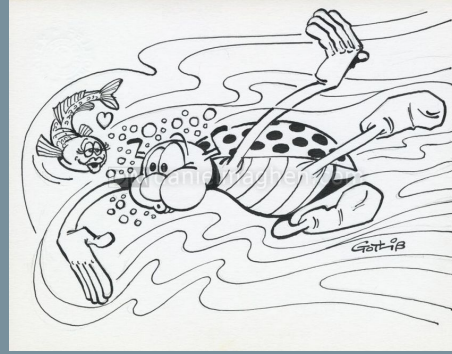
Imagerie (7)

Echantillonnage

- à l'origine on a un signal analogique (l'intensité de la lumière en nb d'électrons selon la position sur le capteur), qu'on numérise en échantillonnant



- Le bon échantillonnage est celui qui permet de restituer toute l'information contenue dans le signal d'origine. *C'est là qu'intervient le théorème de l'échantillonnage de Nyquist-Shannon.*
 - Il nous dit que le pas d'échantillonnage doit être entre 2 et 3 fois plus petit que le plus petit détail enregistrable.



- en astro, le plus petit détail dépend essentiellement de deux paramètres : le diamètre de l'instrument, et l'amplitude de la turbulence atmosphérique durant la pose.
- Si la turbulence est inférieure à la résolution de l'instrument (ou pouvoir séparateur), la résolution maximale sera celle de l'instrument.
- Si l'amplitude de la turbulence est supérieure à la résolution théorique de l'instrument, celui-ci sera "bridé" et la résolution maximale accessible ce soir là sera celle de la turbulence

(source : Axel Vincent-Randonnier de l'asso astro AVEX)

Imagerie (8)

Echantillonnage

L'angle sur le ciel que représente 1 pixel au foyer d'un instrument s'appelle l'échantillonnage et s'exprime en secondes d'arc par pixel ("/pixel).

- La résolution réelle d'une image dépend de cet échantillonnage, de la limite de résolution de l'optique, et de l'amplitude de la turbulence atmosphérique pendant la pose.
- les caméras à petits pixels permettent d'améliorer la résolution pour des télescopes à courtes et moyennes focales, à condition de disposer d'optique de qualité.
- ***pour exploiter un niveau d'échantillonnage aux alentours de 0.5" en ciel profond, il convient de disposer d'une optique/mécanique de bon niveau et de maîtriser totalement l'ensemble de la chaîne d'imagerie (collimation, mise au point, et guidage...)***

Echantillonnage (en secondes d'arc par pixel)					
en fonction de la focale et de la taille du pixel					
Ech = 206xTaille Pixel en microns / Focale en mm					
			268C		
	Camera QHY	183	600		294
	Camera ZWO		6200M/C		
	Camera ZWO		2600C		
	Camera ZWO	183M/C	533C	1600	294
		Taille Pixel microns	Taille Pixel microns	Taille Pixel microns	Taille Pixel microns
	Focale mm	2,40	3,76	3,80	4,63
	135	3,66	5,74	5,80	7,07
	200	2,47	3,87	3,91	4,77
	400	1,24	1,94	1,96	2,38
	600	0,82	1,29	1,30	1,59
	800	0,62	0,97	0,98	1,19
	1000	0,49	0,77	0,78	0,95
	1200	0,41	0,65	0,65	0,79
	1500	0,33	0,52	0,52	0,64
	2000	0,25	0,39	0,39	0,48
	2500	0,20	0,31	0,31	0,38
	3000	0,16	0,26	0,26	0,32

Imagerie (9)

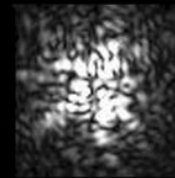
Quel bon échantillonnage choisir ?

- Cas 1 : Turbulence < résolution de l'instrument
 - Ech. idéal = résolution de l'instrument / (2 à 3)
 - Lunette de 72mm : $1.93/2$ à 3 donc entre 0.64 et 0.96"
 - Télescope de 200mm : $0.7/(2 \text{ à } 3)$ donc 0.23 à 0.34" "
- Cas 2 : Imagerie du ciel profond (3 minutes de pose), turbulence (amplitude de 1.5 à 3" sur 3 minutes)
 - Ech. idéal = Turbu en " / (2 à 3) = 0.5" à 1.5 "
- Cas 3 : Imagerie planétaire (films à 30 images/s), turbulence (amplitude de turbulence avec de bonnes conditions de 0.3" en 1/30eme de seconde)
 - Ech. idéal = Turbu en 1/30eme / (2 à 3) = $0,3/2$ à 3 = 0,10 à 0,15"

à retenir : pour un échantillonnage correct, choisir une valeur environ égale à $\frac{1}{3}$ Turbulence (ex : pour 3" d'amplitude de turbulence, prendre 1" d'échantillonnage)

(source : Axel Vincent-Randonnier de l'asso astro AVEX)

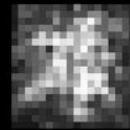
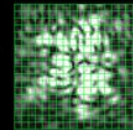
Avec turbulence : résolution limitée par la turbulence
(ex.: Turbulence $\approx 2 \times$ Pouvoir séparateur)



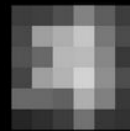
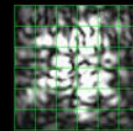
Echantillonnage
(1 carré = 1 pixel)

Résultat de
l'échantillonnage

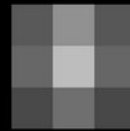
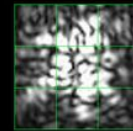
échantillonnage $\approx 1/18$ Turbulence
(fort sur-échantillonnage)



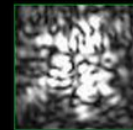
échantillonnage $\approx 1/6$ Turbulence
(sur-échantillonnage)



échantillonnage $\approx 1/3$ Turbulence
(échantillonnage correct)



échantillonnage \approx Turbulence
(sous-échantillonnage)



Imagerie (10)

Focalisation et tolérance de mise au point

- La focalisation est une des tâches les plus délicates en imagerie.
- **Rien ne sert d'avoir un instrument à l'optique parfaite si la focalisation est défectueuse, la puissance de l'instrument sera perdue.**
- On constate sur le tableau qu'un instrument ouvert à F/D 5 a une contrainte 4 fois plus élevée qu'un instrument à F/D 10.
 - Pour un newton de 200mm ouvert à 4, la tolérance de mise au point est de 10 microns
 - pour un RASA à F2, la précision doit être de 2.5 microns
 - pour une lunette à F6, la précision est de 20 microns
 - pour un SCT avec mise au point sur le miroir primaire à F2 la précision requise est de 2.5 microns. par contre si on fait la mise au point sur un PO en bloquant le miroir, la tolérance est plus grande (à F/D 6 ou 7)

Le tableau ci-dessous récapitule la tolérance de mise au point en microns, en fonction du rapport F/D, pour un positionnement à 1/3 de longueur d'onde

Le rapport F/D à prendre en compte est celui du faisceau lumineux au niveau de l'élément mobile servant à faire la mise au point (donc miroir primaire sur un Schmidt-Cassegrain, porte-oculaire sur une lunette ou un Newton)

	Tolérance Mise au Point			
	Ciel Profond (Planétaire à diviser par 2)			
Rapport F/D	Très bonne	Correcte	Médiocre	
2	+/-4	+/-8	+/-18	
4	+/-18	+40	+/-80	
6	+/-40	+/-80	+/-160	
8	+/-80	+/-140	+/-300	
10	+/-120	+/-200	+/-400	
15	+/-200	+/-500	+/-1000	
30	+/-1000	+/-2000	+/-4000	

Tolérance de mise au point en microns

(source : Thierry Legault Astrophoto 3ème édition)

Imagerie (11)

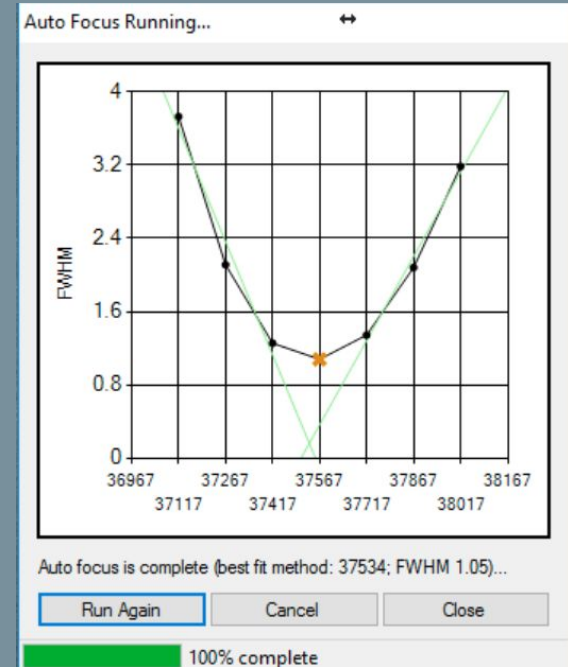
Autofocus

- Le focus peut se faire de façon automatique si on équipe le porte oculaire d'un moteur pas à pas
- permet d'automatiser la prise de vue et contrôler régulièrement et automatiquement la mise au point selon les variations de température (avec une sonde)
- nombreux modèles disponibles pilotables par ordinateur, à noter le boîtier ASIAIR PRO fonctionnant avec la solution ZWO EAF d'autofocus
- Principes de fonctionnement :
fixation du moteur avec une petite équerre
calibration du moteur avec un logiciel d'autofocus avec les bons paramètres

Courbe d'autofocus

Exemples de réglages

- Réglage du nb de points (7 ou 9 points)
- Réglage du backlash su moteur
- Réglage du nombre de oas entre chaque point
- Pose de 8 secondes en bin 2



Source Sequence Generator Pro

<https://www.sequencegeneratorpro.com/sqpro/>

Imagerie (12)

Rapport Signal sur Bruit

(source RCE 2018 Didier Walliang et AIP : Théorie sur le Bruit))

Le bruit est une fluctuation aléatoire autour de la vraie valeur de luminosité...(bruit de photons, bruit issu de la pollution lumineuse, bruit de notre système d'imagerie,...). Le signal c'est ce qui nous intéresse, ce qu'on veut faire ressortir

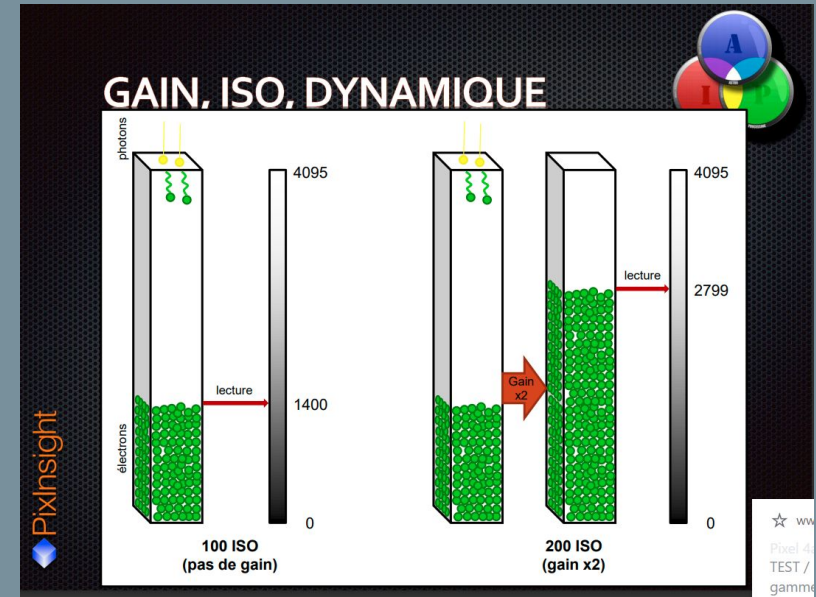
En astrophoto, on travaille la plupart du temps en basse lumières. Le rapport signal sur bruit est donc fondamental

Exemple : pour un signal de 100 photons

Bruit : $\sqrt{\text{photons}} = \sqrt{100} = 10$

Rapport signal / bruit = $100 / \sqrt{100} = 100 / 10 = 10$

→ Le bruit évolue selon la racine carrée du nombre de photons....donc pour réduire le bruit par 2, il faut capturer 4 fois plus de photons



Choix du Gain de la caméra

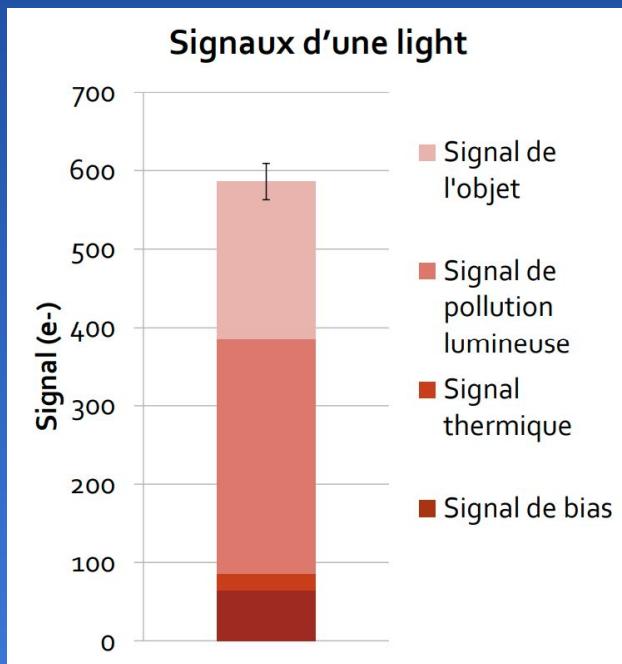
- Si l'objet est très lumineux ou a de grandes différences de luminosité, baisser le gain pour ne pas saturer et conserver toute la dynamique
- *exemple ASI1600 en LRGB : poses de 30s à 120s avec un gain de 75 et offset à 15*
- Si l'objet photographié est faible ou le temps de pose est court (lucky imaging), alors augmenter le gain pour discerner de faibles variations de lumière
- *exemple ASI1600 en SHO: poses de 180s à 300s avec un gain de 200 et offset à 50*

Imagerie (13)

Rapport Signal sur Bruit

(source RCE 2018 Didier Walliang et AIP : Théorie sur le Bruit))

Les différentes sources de signal et de bruit



Signal de Bias (offset) et Bruit de Lecture

- incertitude sur la mesure du courant électrique
- unité : e-, selon les capteurs, compris entre 1 et 15 e-
- sur une caméra CMOS, le bruit de lecture dépend du gain

Signal Thermique et Points chauds

- dépend de la température, du temps de pose
- temps de pose x2 => signal thermique x2, d'où l'intérêt de refroidir les capteurs
- **on peut réduire ce bruit grâce aux darks** (même température, temps de pose et gain)
- certains photosites sont plus sensibles au signal thermique que d'autres : cela donne des points chauds
- pour corriger certains points chauds résiduels,, utiliser la correction cosmétique

Signal de Pollution Lumineuse et Signal de l'objet

- La pollution lumineuse diminue le rapport signal/bruit (à temps de pose égal). Plus le signal utile est faible, plus la pollution lumineuse a une influence sur le rapport signal/bruit

pour compenser, il faut poser plus longtemps (en temps de pose total) :

- concrètement faire plus de poses et diminuer le temps de pose unitaire pour éviter la saturation et conserver la dynamique.
- et/ou utiliser des filtres (pour les nébuleuses à émission)
- et/ou trouver un lieu d'observation moins pollué

Imagerie (14)

Rapport Signal sur Bruit

(source RCE 2018 Didier Walliang et AIP : Théorie sur le Bruit))

Comment mesurer le bruit de lecture ?

Mesure simple :

Bruit de lecture en ADU = écart type d'un bias

Comment mesurer le bruit sur une image ?

- avec Pixinsight et la valeur StdDev (à sélectionner au préalable car pas positionnée par défaut)

The screenshot displays the Pixinsight interface. On the left, a dark image labeled 'Preview01' is shown with a green rectangular region of interest. To the right, the 'Statistics' dialog box is open, showing a table of statistics for the selected region. The 'stdDev' value is 54.7, which is highlighted with a red box and labeled with a red '6'. Below the Statistics dialog, the 'Statistics Options' dialog box is also open, showing a list of available statistics. The 'Standard deviation' checkbox is selected and highlighted with a red box and labeled with a red '4'. The 'OK' button in the Statistics Options dialog is also highlighted with a red box and labeled with a red '5'. The 'Statistics' dialog has a red '3' next to its close button. The 'Statistics Options' dialog has a red '4' next to its 'Standard deviation' checkbox. The 'OK' button in the Statistics Options dialog has a red '5' next to it.

	K
count (%)	100.00000
count (px)	5544
mean	1949.1
median	1950.0
stdDev	54.7
avgDev	43.9
MAD	37.5
minimum	1764.0
maximum	2163.0

Available Statistics

- ☒ Count
- ☒ Mean
- ☐ Modulus
- ☐ Norm
- ☐ Sum of squares
- ☐ Mean of squares
- ☒ Median
- ☐ Variance
- ☒ Standard deviation
- ☒ Average absolute deviation
- ☒ Median absolute deviation (MAD)
- ☐ Biweight midvariance (BWMV)
- ☐ Percentage bend midvariance (PBMV)
- ☐ Sn
- ☐ Qn
- ☒ Minimum
- ☒ Maximum
- ☐ Minimum position
- ☐ Maximum position

Imagerie (15)

Temps de pose total optimal

- En fonction de la qualité du ciel, transparence, niveau de pollution lumineuse, présence de la lune...
- Selon le type d'objet et sa luminosité, le champ obtenu avec sa caméra et la focale du télescope
- *se fixer une durée totale, qui pourra par ailleurs nécessiter plusieurs nuits d'imagerie.*
 - Plus c'est long, mieux c'est !..mais plus il y a d'images à traiter ! (entre 1h et 100h !!!)
- **Pour une caméra couleur**, on ajoutera un filtre anti pollution de bonne qualité si le site est dégradé pour avoir une image RVB plus contrastée
 - Filtres de type Astronomik, IDAS, CLS, L-Enhance Optolong, etc...

- **Pour une caméra monochrome**, il faut choisir la combinaison de filtres (L, R, V, B, S, H, O, autres...) selon le type de photo qu'on désire faire
 - Photos de type LRVB avec ou pas de HA et OII
 - Photos SHO en fausses couleurs avec des filtres à bande étroite type Ha , OIII et SII
- **Choisir le nombre de poses unitaires par filtre**
 - Max de poses sur la Luminance ou les couches avec du détail comme le Halpha
 - Poses suffisantes en RVB pour avoir la couleur
 - Temps de pose total en L équivalent voire 2X supérieur au temps de pose total en RVB
- **Exemples :**
 - Photo LRVB 6 heures au total : L 4 heures (poses de 1 à 3 minutes), RVB 2 heures (40 minutes par filtre R, V, B)
 - Photo SHO : pose unitaires plus longues de 5 minutes ou plus

Imagerie (16)

Temps de pose unitaire optimal

- Choisir un temps de pose unitaire (par pose)
 - vaste sujet avec beaucoup de débats
 - fonction de la caméra, de la techno
 - de l'objet et sa luminosité
 - de la pollution lumineuse
 - du rendement quantique du capteur
 - du rapport F/D



- **Comment déterminer le temps de pose unitaire optimal ?**
 - Mesurer le bruit de fond sur une image brute d'offset.
 - mesurer le bruit de fond sur des images prétraitées de 1, 2, 3, 4 et 8 minutes.
 - Le bon temps de pose est celui qui présente un fond de ciel avec un rapport de X3 à X4 par rapport au bruit de lecture
- Exemple :
 - je mesure un bruit de lecture (en ADU) sur un offset pris avec la camera et le logiciel de pilotage de camera (type SGP, maximdl ou autre...) = 100 ADU
 - je mesure le bruit de fond dans une zone sans étoiles sur mes brutes prétraitées. Respectivement pour 1 minute, 2, 4 et 8 minutes, je trouve 225, 350, 550, 670
 - du coup l'optimum sera une pose de 2 minutes (350 = X3.5 le bruit de lecture égal à 100).

(source : Thierrey Legault Astrophoto 3ème édition)

Imagerie (17)

Exemple 1

1. Je veux imager M31 (3 à 4 degrés sur 1 à 2 degrés) en entier sans faire de mosaïque et je dispose d'une lunette de 72mm de diamètre et de 432mm de focale avec un réducteur de focale qui passe à 331mm avec un diamètre corrigé pour format APS-C (diamètre d'environ 29mm)
2. Je veux améliorer le piqué de mon image de M31 et me rapprocher des conditions d'amplitude de turbulence entre 1 à 3" selon la durée de la pose.

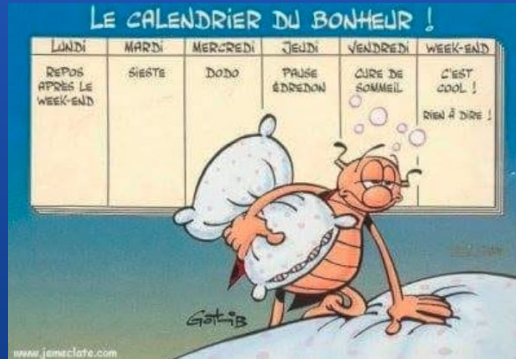


- Champ couvert avec un capteur au format APS-C type ASI294MC (19.1mm x 13mm) = 3.3 degré par 2.25 degré, donc ça le fait bien
- la diagonale du capteur de la 294 mesure 23,3, ce qui est cohérent avec le champ corrigé de 29mm. donc pas de pb de vignettage et autres...
- Echantillonnage = 2,88" (206*4.63/331) sous échantillonné par rapport à la capacité de la lunette (1.93"), mais on est en grand champ avec de la turbulence de plaine standard..
- Pour améliorer le piqué et se rapprocher des conditions de turbulence, il faut baisser l'échantillonnage à une valeur autour de 0.5" à 1.5"
- Compte tenu de la focale avec réducteur de 331mm, et pour un échantillonnage de 1.5", il me faut une caméra avec des pixels de 2.4 microns
- Une caméra avec des pixels de 2.4 comme la ASI183 peut donc s'avérer pertinente, mais la taille du capteur est plus petit. En conséquence, le champ à couvrir par M31 va nécessiter dans ce cas une mosaïque de 2 images (avec recouvrement)

Imagerie (18)

Exemple 2

1. Je veux imager la nébuleuse de la trompe IC1396 dans son entier avec toutes les nébulosités (soit environ un champ de 4 degré sur 3 degré).
Je dispose d'une petite lunette 61mm/F4.5 qui a un champ corrigé d'environ 44mm
2. Je veux réduire le champ sur toute la longueur de la trompe (environ 1 degré par 0.5 deg).
Je veux aussi plus de piqué sur la trompe elle-même en me rapprochant au mieux des conditions d'amplitude de turbulence entre 1 à 3" selon la durée de la pose.
Je dispose aussi d'une newton 200 F4 avec un champ corrigé de 22mm



Pour avoir un champ de 4 degré sur 3 degré, je dois avoir une focale courte et un grand champ.

Avec la lunette de 61mm à F4.5 et l'ASI1600 mon échantillonnage = $2,85''$ ($206 \times 3.8 / 274$) n'est pas très loin de la capacité de la lunette ($2.27''$), mais on est en grand champ avec de la turbulence standard de plaine.

la diagonale du capteur de la 1600 mesure 22mm, ce qui est largement inférieur au champ corrigé. donc pas de pb de vignettage et autres...

Avec l'ASI1600 et sa taille de capteur (17.7mm x 13.4mm), je dispose d'un champ de 3.7 degré par 2.8 degré, ce qui est parfait !

Pour réduire le champ sur la trompe (1 degré par 0.5 degré environ), il me faut plus de focale. Le newton 200 à F4 avec l'ASI1600 me donne un champ de 72' sur 58' ce qui est parfait pour cadrer la trompe dans toute sa longueur.

En même temps, j'améliore le piqué en me rapprochant des conditions de turbulence, car l'échantillonnage passe à $0.78''$ (ce qui est parfait compte tenu de l'amplitude de turbulence entre 1 à 3")

Références et source d'informations

- Thierry Legault Astrophoto 3ème édition : <http://www.astrophoto.fr/> et http://www.astrophoto.fr/collim_fr.html
- Axel Vincent-Randonnier de l'asso https://www.avex-asso.org/dossiers/wordpress/fr_FR/dossiers-pratiques/informatique-pratique/echantillonnage
- Splendeurs du ciel Profond Laurent Ferrero <http://splendeursducielprofond.eklablog.fr/pollution-lumineuse-et-sky-quality-meter-p562800>
- Marc Jousset : <http://astrosurf.com/jousset/>
- Christian Buil : http://www.astrosurf.com/buil/atik_vs_zwo/
- Thierry Jabet : AiryLab : <http://airylab.fr/>
- RCE 2018 - AIP : Théorie du Bruit Didier Walliang de l'association Astro Imaging Processing (AIP) <https://www.astro-images-processing.fr/articles/39886-rce-2018-theorie-sur-le-bruit-en-astrophotographie>
- PIXNSIGHT : Logiciel de traitement d'images : <https://pixinsight.com/>
- CCD Inspector : de ccdware : <https://www.ccdware.com/products/ccdinspector/>
- ZWO astronomy imaging cameras : <https://astronomy-imaging-camera.com/>

Références et source d'informations

- SKYMECA : <http://skymeca.com/accesoires-pour-telescopes/60-diviseur-optique-skytrack-2-5.html>
- PHD2 Guiding : <https://openphdguiding.org/>
- Telescopius : <https://telescopius.com/deep-sky/object/1107/andromeda-galaxy/m-31/galaxy>
- Sequence Generator Pro : <https://www.sequencegeneratorpro.com/sgpro/>
- PECPrep : http://eq-mod.sourceforge.net/pecprep/index_fr.html
- PEMPRO : <https://www.ccdware.com/products/pempro/>
- Polemaster : <https://www.ghyccd.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=136&id=32>
- Ipolar : <https://www.ioptron.com/product-p/3339.htm>
- Carte du ciel : <https://ap-i.net/skychart//fr/start>
- Stellarium : <https://stellarium.org/fr/>
- Photopills : <https://www.photopills.com/>
- Astro Antony : <http://www.astroantony.com/tutoriel/PDF/Autoguidage.pdf>

Si vous êtes arrivés jusque là, c'est plutôt bon signe...
de plus nous sommes dans une époque bénie des dieux, car l'astrophoto est de plus en plus
facile, abordable et automatisable....si...si je vous assure.....et si je vous disais comment on
faisait au siècle dernier.....mais c'est une autre histoire !!!

