



Université
Paul Sabatier
TOULOUSE III

Faculté des sciences Paul Sabatier de Toulouse
Maitrise de Physique

Stage Juin / juillet 1998

Mesures photométriques
Du fond de ciel
Avec une caméra CCD Hisi 22

Responsables de stage :

Michel Bonavitacola

Société d'Astronomie Populaire de Toulouse
Centre de Protection du Ciel Nocturne

Alain Klotz

Centre d'Etude Spatial des Rayonnements (CESR)

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	p 2
2. RAPPELS DE PHOTOMETRIE	p 3
3. ETUDE TECHNIQUE : LA LUMIERE PARASITE	p 5
4. LA CAMERA CCD	p 8
5. ETUDE PRELIMINAIRE	p 15
6. MODE OPERATOIRE	p 22
7. LOI DE WALKER ET PROGRAMME THOT	p 24
8. INDICES DETERMINANT LA QUALITE DU CIEL	p 24
9. CLASSIFICATION DES SITES	p 27
10. PERSPECTIVE	p 28
11. ANNEXES	p 28

1. INTRODUCTION

Le stage que j'effectue actuellement à l'Observatoire de Jolimont porte sur la pollution lumineuse. Je dois définir une procédure permettant à tous les astronomes de connaître la qualité de leur ciel. Pour cela, il faut mettre en place tout un protocole expérimental pour obtenir des photographies correctes, déterminer toute une série d'indices reliés à la lumière parasite et ses effets sur les observations. Ensuite, je classerai différents sites la région entourant l'agglomération toulousaine.

A noter que l'on travaillera avec une caméra CCD. Il faut donc dans un premier temps acquérir les connaissances nécessaires à son bon fonctionnement et avoir en tête un minimum d'acquis en photométrie. Alors, on pourra développer un protocole, en ayant bien cerner les effets de la lumière parasite sur les observations, et réfléchir sur une série d'indices intéressants et « universels » (pouvant utiliser les performances du CCD).

Qu'est-ce que la pollution lumineuse ? La lumière émise par les divers éclairages urbains est diffusée par les molécules d'air et de vapeur d'eau de l'atmosphère. Cela se traduit par une lueur générale qui masque la noirceur du ciel nocturne.

C'est parce que la pollution lumineuse est insidieuse et difficilement quantifiable que seuls les astronomes professionnels ou amateurs, premiers concernés du fait de leur activité, la dénonce. La pollution lumineuse peut paraître moins lourde de conséquence que la pollution de l'atmosphère et des cours d'eau. Pourtant elle est étroitement liée aux autres formes de pollution.

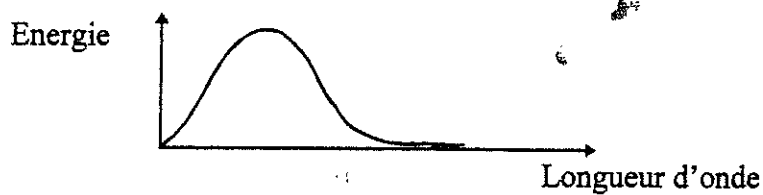
1. RAPPELS DE PHOTOMETRIE

1. Définitions

* La lumière est un rayonnement électromagnétique dont les radiations ont le pouvoir d'exciter les cellules visuelles de l'homme.

* Lorsqu'un rayon lumineux rencontre un obstacle, il est, dans des proportions variables suivant la nature du milieu, réfléchi, transmis et absorbé.

* Le spectre lumineux: Le rayonnement émis par une source lumineuse peut comprendre l'ensemble des radiations lumineuses. On a alors un spectre continu.



Lumière d'une lampe à incandescence

2. Grandeurs et unités photométriques

* Lumen (lm) : unité du flux lumineux

* Candela (cd) : unité d'intensité lumineuse

ou (lm/sr) : flux lumineux par unité d'angle solide (stéradian)

* Lux (lx) : unité d'éclairement

ou (lm/m²) : flux lumineux reçu par unité de surface (m²)

* Candela par m² : unité de luminance

ou (cd/m²) : luminance d'une source dont l'intensité lumineuse est 1 cd et l'aire de 1 m²

* Kelvin (K) : unité de température

3. Flux lumineux F

Le flux lumineux est la quantité d'énergie lumineuse rayonnée par seconde. On utilise le watt lumineux (c'est une unité de puissance dérivée du watt).

$$1 \text{ watt lumineux} = 683 \text{ lumens}$$

Il faut se rappeler que le lumen est une unité de mesure équivalente pour toutes les radiations ou tous les rayonnements, de même que le kilogramme est une unité de poids équivalente pour toutes les marchandises.

$$1 \text{ lumen rouge} = 1 \text{ lumen vert} = 1 \text{ lumen blanc}$$

4. Intensité lumineuse I

Une source lumineuse ne distribue pas nécessairement la lumière d'une manière égale dans toutes les directions. Pour les besoins pratiques, ona besoin de connaître la puissance rayonnée dans chacune des directions et on a été conduit à définir la notion d'intensité lumineuse.

$$I = F/w \quad \text{avec } w, \text{ angle solide}$$

La notion d'intensité ne tient pas compte de la distance de l'observateur à la source. Dans le vide absolu (espace interstellaire) où il n'y a pas d'absorption, l'intensité d'une source ne diminue pas qu'elle que soit la distance (l'observation des étoiles en est une preuve).

Si le rayon de lumière traverse un milieu absorbant, l'intensité décroît jusqu'à extinction totale.

5. Eclairement E

L'éclairement est la quantité de flux lumineux que reçoit uniformément une surface.

$$E = F/A \quad \text{avec } A, \text{ surface en } m^2$$

1 lux correspond à u éclairement de 1 lm/m².

Il est à noter que l'éclairement n'est pas donné uniquement par une source ponctuelle.

6. Luminance L

Si toutes les sources étaient ponctuelles, la notion d'intensité serait suffisante pour exprimer la quantité d'énergie rayonnée dans une direction. Mais il n'en est pas ainsi, d'autant plus que toute surface réfléchissante se comporte comme une source lumineuse secondaire.

Pour comprendre ce que représente la luminance, il faut examiner ce qui se passe lorsqu'on regarde une surface S et non un point. L'image formée en S sera d'autant plus brillante que le flux lumineux atteignant l'oeil sera plus élevé.

Ce flux est fonction de l'intensité des différents oints points lumineux constituant la surface, et de l'aire de la section Sa, surface apparente de S ($S_a = S \cdot \cos \alpha$).

$$L = I/(S \cdot \cos \alpha)$$

7. Diffusion de la lumière

L'atmosphère en première approximation est homogène, isotrope et, même si elle est troublée, ne contient que des molécules petites en taille par rapport à la longueur d'onde incidente ($d < 0,2\lambda$). On peut d'ailleurs noter la nuance suivante (A. Einstein): tout milieu, lorsqu'il est regardé de très près, contient naturellement des fluctuations de densité dues notamment à l'agitation moléculaire (mouvement Brownien). Donc, tout milieu, même optiquement pur, diffuse.

Un rayonnement monochromatique d'intensité I traversant un milieu de longueur d'onde dl subit une extinction de la forme:

$$I = I_0 \cdot \exp(-xd)$$

Loi de Beer

où I_0 et I sont les intensités à l'entrée et à la sortie d'une couche d'absorbant d'épaisseur d , x le coefficient d'extinction par unité de volume.

La diffusion de la lumière s'applique à toutes les longueurs d'ondes. Si on observe un rayon arrivant sur une molécule, celui-ci est diffusé dans toutes les directions.

Le coefficient d'extinction s'écrit :

$$x = \frac{32\pi^3(n-1)^2}{3N\lambda^4}$$

avec N = nombre de molécules par unité de volume

λ = longueur d'onde incidente

n = indice de réfraction du milieu

Dans une zone éclairée par une lumière incidente, la source se comporte elle-même comme émettrice d'une radiation de même fréquence mais d'intensité très faible. La répartition selon les fréquences est la suivante :

Exemple au sol, conditions standards ($N = 2,705 \cdot 10^{19}$ par m^3)

λ (μm)	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1	2
$x(10^{-6}/cm)$	14,8	4,36	1,75	0,83	0,446	0,106	0,0066

Le bleu se situe aux alentours de $0,4\mu m$, le rouge aux alentours de $0,6\mu m$. Donc, le bleu est 5 fois plus diffusé que le rouge.

3. ETUDE TECHNIQUE : LUMIERE PARASITE

1 - Description et modélisation

Tous les instruments optiques utilisés en astronomie (télescopes, interféromètres) ou en géophysique possèdent des récepteurs extrêmement sensibles dont les performances sont en général limitées par le bruit photonique provenant du ciel. La limitation naturelle est la lumière du ciel nocturne sans Lune. Cette lumière provient de 4 origines: la lumière des étoiles non résolues par l'instrument, la lumière zodiacale, les émissions propres de la haute atmosphère et, enfin, la lumière provenant de ces diverses sources et diffusée par l'atmosphère.

La luminance naturelle du fond de ciel est de $2 \cdot 10^{-4}$ candela/ m^2 (équivalente à une étoile de magnitude 21,6 par seconde carrée sur le ciel). Cette valeur est plus grande à 45° degrés en direction du zénith. Elle servira de référence pour évaluer les effets de la lumière parasite. Cette lumière parasite peut, en fait, agir de 2 façons: en illuminant directement l'instrument et en éclairant le ciel qui la rediffuse vers le sol.

L'illumination directe des instruments par des sources lumineuses ne constitue pas la source dominante de gêne. Cependant, cette lumière peut nuire aux observations par réflexions et diffusions successives et peut atteindre le foyer ou même directement les parties photo-sensibles des récepteurs.

La diffusion par l'atmosphère de la lumière produite sur la surface de la Terre a pour effet une augmentation de la clarté du ciel qui, s'ajoutant à la lumière naturelle du ciel nocturne, augmente le bruit de photons et diminue ainsi la détectabilité des objets faibles.

La modélisation de la lumière provenant d'une agglomération et diffusée par le ciel est très difficile à cause de la grande quantité de paramètres en jeu: distance et flux lumineux produit par l'agglomération, quantité de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air, dimension et forme des particules. L'augmentation du bruit photonique parasite, la diminution du signal reçu due à la lumière parasite augmentant la clarté du fond de ciel ne peuvent être évaluées qu'avec les instruments eux-mêmes... lorsque la détérioration du site est déjà consommée.

En l'absence de modèle précis et d'expérimentation sur le site, il faut se contenter d'une modélisation simple effectuée sur des sites connus. La loi de diffusion Raleigh est correcte pour la diffusion par les gouttelettes d'eau et elle est une bonne approximation pour les poussières de moins de 1 μm . En fait, la plupart des poussières industrielles et des aérosols ont des dimensions comprises entre quelques dixièmes de micromètre et 5 μm . Plusieurs études ont été faites. Ainsi M.F. Walker (*Public. Astron. Soc. of the Pacific*, 1977) donne la relation empirique suivante:

$$I = 0,01 * P / R^{2,5}$$

$$\log I = 3 - 2,5 * \log R + \log P \quad (1)$$

Loi de Walker

où P est la population de la ville en unités de cent mille habitants, I est l'accroissement de l'éclat du fond du ciel par rapport à la luminosité du ciel naturel à 45° au-dessus de l'horizon en direction de la ville. R est la distance en kilomètres de la ville.

Pour une ville de 100 000 habitants, à 40 km, on obtient $I=0,1$, soit une augmentation de la luminance du fond du ciel de 10%. On a également 10% pour 3 000 habitants, à 10 km.

On peut généraliser la formule (1) en l'exprimant en fonction non plus de la population, mais de l'émission lumineuse de l'agglomération L exprimée en lumens. On obtient ainsi la formule suivante:

$$\log I = -4,7 - 2,5 * \log R + \log L$$

qui est indépendante de toute hypothèse *a priori* concernant la relation qui peut exister entre l'éclairage d'une ville et le nombre d'habitants.

Ces résultats supposent une concentration de poussières et d'aérosols moyenne au-dessus des régions étudiées. Il convient de se demander ce qu'il adviendrait si la proportion de poussières et d'aérosols en suspension dans l'atmosphère augmentait. Une telle étude a été effectuée par J. Gay au CERGA. Il trouve comme relation:

$$\log I = 0,8 \cdot \log d - 0,2$$

où d est la densité de poussière exprimée en μ grammes par m^3 .

A cet effet de diffusion de la lumière parasite, s'ajoute une absorption générale de la lumière utile par ces mêmes poussières. Du fait de sa variabilité dans le temps, la cohérence photométrique d'une série d'observations est détruite.

Une source de perturbation pour les mesures spectro-photométriques est la présence de raies plus ou moins nombreuses dans les lampes d'éclairage dont la lumière est rediffusée vers les instruments. Ceci a pour effet de modifier la répartition de l'énergie dans le continuum des spectres stellaires et, par conséquent, perturbe les résultats de photométrie à bandes larges et étroites.

2 - Normes

Le principe adopté par l'Union Astronomique Internationale est que l'accroissement de la luminosité du ciel à une hauteur de 45° , dû à la lumière diffusée par un ciel sans nuage, ne doit pas dépasser 10% du niveau naturel le plus bas dans tout le spectre entre 300 et 1000 nanomètres.

En ce qui concerne la lumière directe, une étude menée en 1959 (!!!) a montré que les éclairagements directs ne doivent pas dépasser 10% de l'éclairage global permis.

3 - Précautions à prendre

Pour s'approcher des normes ainsi définies, des mesures très sévères doivent être prises dans le domaine de l'éclairage public et privé pour diminuer la lumière émise par les villes.

Pour l'éclairage public, il faut rendre maximal le rapport entre la quantité de lumière reçue par la surface à éclairer et la quantité de lumière produite par le luminaire. Ceci implique des abat-jours très réfléchissants, dirigeant la lumière vers le sol empêchant tout rayonnement vers le ciel.

Les lampes à vapeur de sodium à basse pression (lampes à émission monochromatique sur le doublet D du sodium) constituent pour les astronomes le type idéal. En effet, l'émission de ces lampes coïncident avec les raies d'émission de la haute atmosphère, donc elle ne gêne pas les observations, tant qu'elle ne dépasse pas la valeur minimale de l'émission naturelle.

Il est possible d'arrêter les éclairages des monuments, des stades, des publicités lumineuses à partir d'une certaine heure de la soirée: 22h à 24h selon les quartiers.

Il existe donc des solutions pour maintenir dans des limites raisonnables la pollution par la lumière provenant des villes.

4. CHARGE COUPLED DEVICE (CCD) ou Dispositif par Transfert de Charges)

1 - Présentation d'une caméra CCD

1.1 - Généralités

Une caméra CCD se présente sous la forme d'une boîte équipée d'un hublot transparent à l'intérieur de laquelle se trouve le capteur CCD. Ce capteur est constitué d'une mosaïque de micro-cellules électroniques sensibles à la lumière. Ces micro-cellules sont appelées photosites ou pixels ("picture element"). Ils ont une forme rectangulaire ou carrée d'environ 10 micromètres de côté. La mosaïque de pixels est appelée matrice. Tout comme en photographie, on peut effectuer des poses de plusieurs minutes en CCD car chaque pixel garde en mémoire la quantité de lumière reçue. Les pixels d'un capteur CCD sont tous identiques et parfaitement rangés en lignes et en colonnes (dans une émulsion photographique, les grains ont des tailles diverses et sont répartis de façon aléatoire).

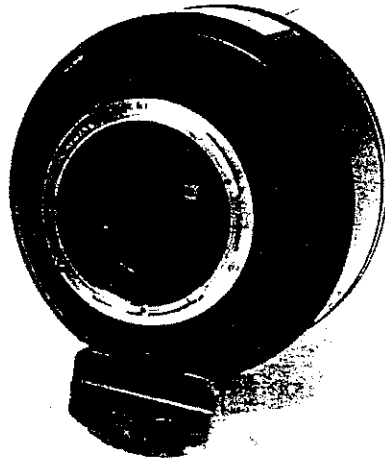
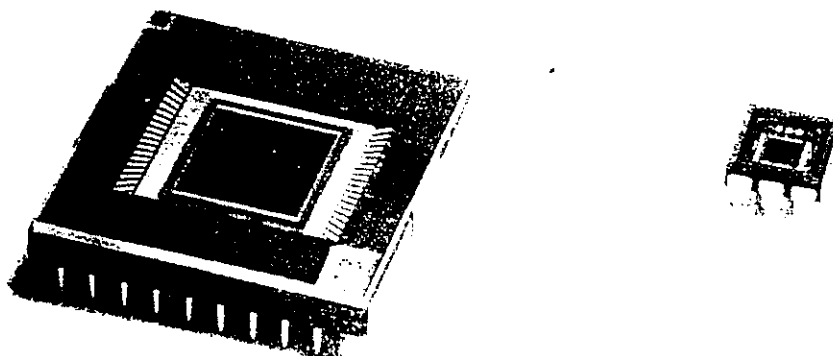


Figure 1.1: Une caméra CCD LYNXX. On peut apercevoir le détecteur CCD comme un petit carré gris derrière le hublot transparent.

L'image formée est automatiquement "découpée" en pixels. Ce phénomène s'appelle l'échantillonnage de l'image. L'échantillonnage d'une image est un des facteurs déterminant la résolution maximale que l'on pourra atteindre; il est lié à la taille des pixels, mais aussi à la longueur focale de l'instrument optique qui forme l'image.

Chaque pixel convertit la lumière en électrons, c'est-à-dire qu'il crée et accumule un nombre de charges électriques proportionnel à la quantité de lumière reçue. Ces électrons sont "lus", convertis en valeurs numériques appelées "pas codeurs". C'est donc la lecture des charges électriques qui permet de reconstituer l'image reçue par le capteur CCD, et ce en quelques secondes seulement.



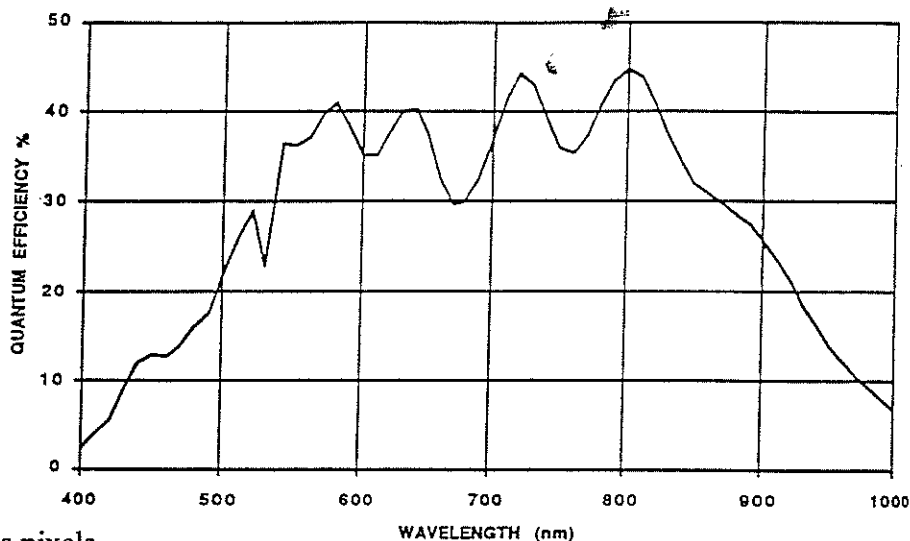
1.2 - Performances du CCD

• Sensibilité

On exprime la sensibilité du CCD en électron (ou charge électrique) fourni par photon incident (ou énergie lumineuse reçue), donc en Coulombs par Joule. Cette notion s'appelle le rendement quantique équivalent (RQE).

Si le CCD était un détecteur parfait, il produirait un électron chaque fois qu'il reçoit un photon. On s'aperçoit que le CCD atteint un RQE d'environ 50% à certaines longueurs d'ondes (1 électron pour 2 photons incidents), ce qui est remarquable (les meilleurs films photographiques ont des RQE de 4 à 5%).

Les CCD sont sensibles de 400nm (limite violette de la lumière visible) à 1 mm (infra-rouge proche). Le maximum de sensibilité se situe dans le rouge, vers 600 à 700 nm.



• Capacité des pixels

La contenance des pixels en électrons n'est pas illimitée. Les valeurs vont de 45000 électrons (pixels de 6,8 x 6,8 mm) à 940 000 électrons (pixels de 23 x 23 mm). Lorsque la quantité de lumière qui a frappé un pixel pendant le temps d'intégration est suffisamment grande, le nombre d'électrons générés peut dépasser la capacité du pixel. Celui-ci est alors saturé, et les électrons excédentaires ont tendance à se déverser dans les pixels voisins. Dans la pratique, lorsqu'une étoile brillante vient à saturer des pixels, on observe une trainée blanche caractéristique, partant de l'étoile brillante; le phénomène porte le nom d'éblouissement ou de blooming.

• Linéarité du CCD

Le CCD est à très peu de choses près un capteur parfaitement linéaire. Cela signifie que le nombre d'électrons générés dans un pixel est proportionnel à la quantité de lumière qui frappe ce pixel. Cette loi est vérifiée au millième près, ce qui est excellent. Cette loi s'arrête au point où le CCD sature.

La linéarité d'un CCD lui donne 3 avantages sur le film photographique:

- i) le CCD n'a pratiquement pas de seuil de détection
- ii) le CCD ne connaît pas l'effet Schwarzschild
- iii) le nombre d'électrons générés donne directement une mesure photométrique.

• Efficacité de transfert

Lors de la lecture du CCD, les charges sont déplacées de site en site le long des colonnes de la matrice, puis le registre horizontal jusqu'à leur sortie. Malheureusement, ces transferts ne sont pas efficaces à 100% et un petit pourcentage des électrons déplacés est perdu à chaque déplacement.

L'inefficacité du transfert est cependant très limitée. Le nombre d'électrons non transférés présente un caractère aléatoire dont la dispersion génère un bruit de transfert dont l'expression est:

$$\sigma_e = \sqrt{\epsilon n N}$$

où ϵ est l'inefficacité de transfert

n , le nombre de transferts réalisés pour lire le pixel concerné

N , le nombre de charges transportées

- Courant d'obscurité

Même en l'absence de tout éclairage, le CCD génère spontanément un courant d'obscurité proportionnel au temps d'intégration et croissant en fonction exponentielle avec la température. Le courant d'obscurité a deux conséquences fâcheuses :

i) il génère spontanément un "bruit thermique" qui limite la détection des faibles étoiles de l'image

ii) il peut, à l'extrême, saturer à lui seul les photosites, rendant impossible la lecture de l'image.

- L'électroluminescence

Sur certains CCD, l'amplificateur de sortie émet une très faible lumière qui suffit à créer des charges dans les pixels situés près de cet amplificateur.

- Les pixels défectueux

Ce sont soit des pixels dont le gain diffère d'un certain pourcentage du gain moyen de la matrice, soit des pixels chauds quiaturent très vite, soit des pixels morts qui restent noirs quelque soit l'éclairage reçu. La plupart du temps, les défauts de la matrice peuvent être corrigés en grande partie par le logiciel de traitement d'image.

2- L'électronique de la caméra CCD

- Temps de lecture et mode fenêtrage

Le fenêtrage consiste à ne lire que la partie de la matrice qui contient l'information utile. Le but est de diminuer le temps de lecture, donc d'augmenter la cadence des images.

- Binning

Le binning consiste à additionner les charges électriques contenues dans plusieurs photosites voisins; l'ensemble de ces photosites est alors considéré comme un seul pixel d'image qui aurait reçu la totalité de la lumière captée par ces photosites.

Le binning peut prendre différentes formes géométriques: par exemple 2x2, ce qui signifie que l'on rassemble 4 photosites voisins pour créer un pixel.

L'un des avantages du binning est d'augmenter le rapport signal sur bruit. Le binning rassemblant $N \times N$ photosites par pixel permet d'effectuer des poses plus courtes d'un N^2 pour obtenir le même signal que l'image sans binning.

- La lecture du signal

Après qu'on lui ait retiré sa composante, qu'on l'ait filtré, amplifié et échantillonné, le signal vidéo est toujours une grandeur analogique donc inapte au traitement par un ordinateur. Il faut donc le convertir en une information numérique. C'est le rôle du Convertisseur Analogique-Numérique (CAN).

- Aspects thermiques

Les temps de pose pratiqués en astronomie, et le niveau de détection recherché imposent de refroidir le CCD afin de limiter son courant d'obscurité. Pour cela, plusieurs solutions sont possibles: l'azote liquide, la neige carbonique et les refroidisseurs à effet Peltier.

- Environnement informatique

L'ordinateur fait partie intégrante d'un système CCD. Lors de l'acquisition des images, il sert à envoyer les ordres de lecture, réceptionner, visualiser et stocker les images numériques. On pourra ensuite les traiter.

Les logiciels d'acquisition: ils permettent de lancer les ordres de pose du CCD, de recueillir les images et de les stocker sur le disque dur. Il faut y associer un logiciel de traitement performant.

3 - Caractéristiques d'une caméra CCD

3.1 - Caractéristiques géométriques

- Nombre de pixels

Le nombre de pixels de la matrice est l'une des caractéristiques les plus importantes de la caméra CCD. C'est ce nombre qui fixe la richesse de l'information spatiale contenue dans l'image: il est le rapport entre le champ couvert par le CCD et sa résolution; cette notion est parfois appelée "dynamique spatiale". Il est possible d'adapter soit le champ soit la résolution par le choix d'une optique de distance focale appropriée, mais le champ et la résolution sont intimement liés par le nombre de pixels.

- Taille des pixels

La taille des pixels est un critère de choix beaucoup moins important que leur nombre.

3.2 - Caractéristiques électroniques et thermiques

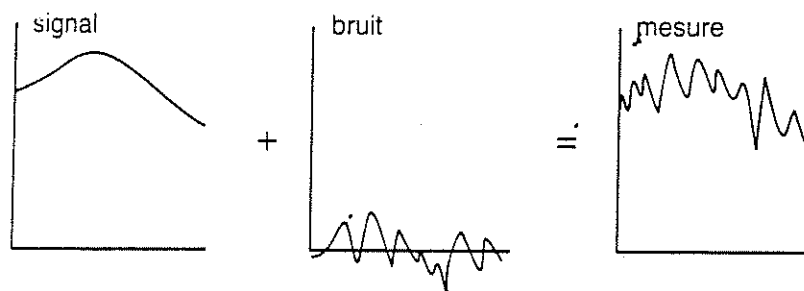


Figure 11.4 : A gauche, représentation monodimensionnelle d'un signal. Au milieu, contribution d'un bruit aléatoire à moyenne nulle. A droite : la superposition des deux composantes représente ce que l'on mesure réellement.

- Bruit de lecture

Le bruit de lecture se traduit par une erreur dans la mesure du signal contenu dans chaque pixel. Cette erreur est complètement décorrélée d'un pixel à l'autre et d'une image à l'autre. C'est l'une des limitations principales de la détectivité des caméras CCD et plus généralement à la qualité des images.

- Bruit thermique

Le courant thermique a 2 conséquences:

i) il remplit les photosites par des charges intempestives qui peuvent provoquer une saturation si la pose est assez longue.

ii) il crée un bruit thermique dont la valeur est égale à la racine carrée du nombre d'électrons thermiques.

- Niveaux de numérisation

Les numériseurs fréquemment utilisés dans les caméras CCD codent l'information sur 8 bits (256 niveaux de gris ou pas-codeurs), 12 bits (4096), 14 bits (16384) ou 16 bits (65536). C'est un paramètre très important, car les images d'astronomie ont besoin d'une grande dynamique.

3.3 - Caractéristiques photométriques

- Détectivité

Elle caractérise la capacité de la caméra à faire apparaître des objets peu contrastés dans une image, par exemple de détecter une étoile très faible dans le fond de ciel, ou un détail planétaire très peu contrasté.

Une étoile faible sera détectée si l'on sait reconnaître la variation de signal qu'elle a provoquée parmi les fluctuations liées au bruit. On considère qu'elle sera détectée si son signal vaut 3 fois la fluctuation moyenne du bruit.

La détectivité revient donc à comparer l'intensité du signal provoquée par un objet faible au bruit de l'image.

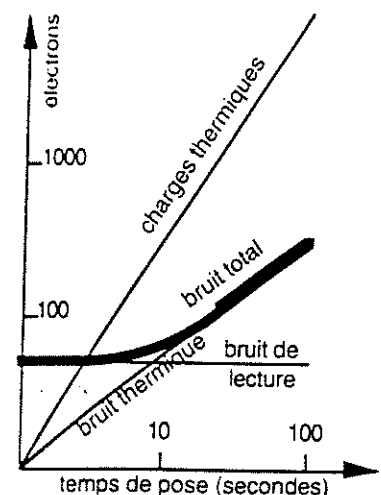
- Bruit de photons

L'étoile mesurée envoie un nombre de photons dont la valeur moyenne définit la luminosité de l'étoile, mais qui subit des fluctuations statistiques dont la valeur moyenne est égale à la racine carrée du nombre de photons reçus.

Bruit total: les sources de bruit étant parfaitement décorrélées,

$$B_T = \sqrt{(B_l^2 + B_{th}^2 + B_{fc}^2)}$$

avec B_{fc} , bruit de fond de ciel.



- Précision photométrique

La réponse linéaire du capteur CCD en fait un merveilleux récepteur pour la photométrie. Le nombre d'électrons générés dans les pixels qui correspondent à l'image de l'étoile étant proportionnel à l'éclairement reçu, il suffit de compter cette charge électrique pour accéder directement à la mesure de luminosité. La précision de la mesure est principalement liée à l'intensité des bruits électroniques (en plus de la qualité de la caméra).

Remarque : Les pas-codeurs doivent représenter un nombre d'électrons inférieur au bruit de lecture.

3.4 - Les fonctions d'acquisition

- Mode rafale

Il permet de prendre des vues en continu sans que l'observateur ait à relancer la caméra entre chacune d'entre elles.

- Le temps de lecture de la matrice a plus ou moins d'importance suivant le type d'observations.

- Le fenêtrage consiste à ne numériser qu'une partie de l'image à chaque prise de vues. Le but essentiel est d'obtenir une cadence d'images élevée, lorsqu'une partie du champ seulement est intéressante.

- Le binning (voir plus haut)

Le binning est intéressant lorsque l'on veut des images rapidement, sans trop de soucis de résolution, et qu'elles ont un rapport signal sur bruit limite.

- Le mode TDI permet de faire des images avec un télescope fixe. Il consiste à décaler les charges de photosite en photosite dans la matrice CCD au fur et à mesure que l'image se déplace sur cette matrice. Ainsi les charges créées par un point de l'image restent en face de ce point pendant tout le temps d'intégration.

4 - Réalisation des images

4.1 - Choix de la combinaison optique

- La résolution

La résolution limite que l'on peut atteindre est déterminée par le diamètre du télescope, par la qualité intrinsèque des images et par l'échantillonnage.

La première limitation provient du phénomène de diffraction dû au diamètre de l'instrument : plus le diamètre est important, meilleure sera la résolution.

La deuxième limitation en résolution provient de la turbulence du site d'observation. La turbulence atmosphérique est souvent bien plus importante que la limite de diffraction.

La troisième limitation provient de l'échantillonnage dû au détecteur CCD. Il s'agit donc de grandir suffisamment l'image optique au niveau du plan du CCD afin de placer un minimum de secondes d'arc sur chaque pixel. Cet échantillonnage spatial est géré par la longueur focale de l'instrument et par la taille des pixels du capteur CCD.

Dans le cas général :

$$\text{échantillonnage} = \arctan \left(\frac{\text{pixel}(\mu\text{m}).10^{-6}}{\text{focale (m)}} \right) \quad \text{en (arcsec/pixel)}$$

Dans la pratique, on cherche à se placer à l'échantillonnage critique où la largeur à mi-hauteur des étoiles occupe 2 pixels.

• Le champ

Le champ couvert par l'image CCD dépend des dimensions de la matrice et de la longueur focale de l'instrument. Il sera d'autant plus étendu que les dimensions de la matrice sont grandes et que la longueur focale est petite.

Dans le cas général :

$$\text{champ} = \arctan \left(\frac{\text{coté du CCD (mm)}.10^{-3}}{\text{focale (m)}} \right)$$

Il est toujours difficile de concilier un grand champ et une bonne résolution.

5 - Traitement des images

5.1 - Prétraitement

Le prétraitement consiste à « nettoyer » l'image brute de ces effets. Il se déroule en 3 étapes bien distinctes :

1. Soustraction du noir
2. Division par la PLU (La PLU est une pose effectuée sur une plage de lumière uniforme (ciel bleu). L'intensité lumineuse réellement tombée sur le pixel est alors constante pour tous les pixels de la matrice. Le temps de pose de la PLU est suffisamment court pour négliger la contribution des charges thermiques).
3. Correction locale de l'image au niveau des pixels ou des colonnes défectueuses.

5.2 - Les transformations géométriques

• Les translations

L'application la plus courante des translations est le compositage, opération indispensable pour diminuer le bruit des images obtenues. Le compositage consiste à recentrer et à sommer plusieurs images prétraitées du même objet. Le recentrage se fait au moyen de translations.

- Les rotations

Il est parfois intéressant de comparer 2 images issues de 2 caméras fixées sur 2 télescopes différents. On a alors 2 images dont les échelles et les orientations sont différentes.

- Les mosaïques

Le champ du CCD est parfois trop petit pour observer la totalité d'un objet étendu. On effectue alors plusieurs poses en déplaçant le champ observé entre chaque image tout en gardant au moins 2 ou 3 étoiles communes sur le bord des champs. On synthétise une seule grande image en assemblant toutes les petites images individuelles comme une mosaïque.

5.3 - Les convolutions

- Les convolutions spatiales

Ce sont des opérations qui consistent à modifier la valeur des pixels en fonction de la valeur de leurs voisins. On distingue les filtres passe-haut, destinés à augmenter le contraste local, et les filtres passe-bas, destinés à étaler les images, c'est-à-dire à les rendre floues.

- Les convolutions fréquentielles

La transformée de Fourier d'une image permet de générer 2 images fréquentielles en coordonnées cartésiennes ou polaires. Ces images permettent de « séparer » les différentes structures des images (étoiles, galaxies, bruit, ...).

5.4 - La restauration des images

Cela consiste à déconvoluer l'image observée.

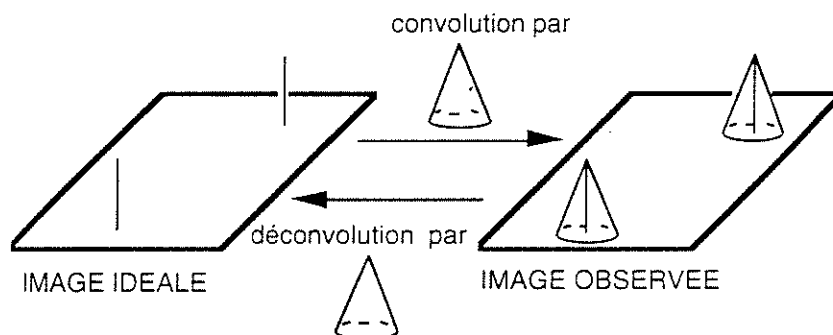


Figure V.36 : A gauche, l'image de deux étoiles ponctuelles vues en perspective. A droite, la même image, telle qu'on l'observe réellement, est le résultat d'une convolution. La restauration de l'image consiste à effectuer l'opération inverse, c'est à dire faire une déconvolution.

5. ETUDE PRELIMINAIRE

Nous venons de voir que les caractéristiques de l'optique utilisée sont très importantes pour la qualité des images. Cette étude consiste à prendre en compte les différents paramètres (focale, binning, temps de pose ...) pour obtenir les meilleurs clichés.

Pour déterminer la focale et le binning qui permettront d'obtenir des clichés de qualité optimale, il faut poser le problème avec plusieurs contraintes :

- Le ciel remplit les $\frac{3}{4}$ de la dynamique : il faut être sûr d'avoir du ciel dans l'objectif.

- Un temps de pose court pour ne pas avoir de traînées sur la photographie dûes aux étoiles. En effet, il n'y a pas de guidage qui permettrait de compenser le déplacement des étoiles.

- Les étoiles doivent être rondes sur le cliché, et non pas sous forme de traînées (directement relié au temps de pose).

- Il ne faut pas avoir trop d'étoiles faibles dans le fond de ciel pour ne pas qu'elles se « perdent » dans le bruit.

1. On fixe la focale $F = 28, 50, 70, 135, 200, 500$ mm.

2. On calcule l'échantillonnage

$$\alpha(\text{"/pix}) = 3600 * \arctan \left(\frac{P (\mu\text{m})}{F (\mu\text{m})} \right)$$

avec $p =$ taille du pixel

- pour binning 1/1 $p = 9 \mu\text{m}$
- pour binning 2/2 $p = 18 \mu\text{m}$
- pour binning 4/4 $p = 36 \mu\text{m}$

F (mm)	28	50	70	135	200	500
$\alpha_{1/1}$	66,3	37,13	26,52	13,75	9,28	3,71
$\alpha_{2/2}$	132,6	74,26	53	27,5	18,56	7,43
$\alpha_{4/4}$	265,2	148,5	106,08	55	37,13	14,85

3. On calcule le temps de pose

$$t(\text{s}) = 30 * 2^{\text{bits} * 3/4} * \left(\frac{1}{2900 * (\alpha / 3)^2} \right)$$

On prend la valeur 14 bits, c'est-à-dire le nombre d'éléments binaires utilisé pour coder l'information.

On s'aide de données acquises lors d'une étude précédente. Pour une nuit de pleine Lune, on a 2900 pas-codeurs, avec un échantillonnage de 3"/pixel et un temps de pose de 30 s.

On se limite à $\frac{3}{4}$ de la dynamique.

F (mm)	28	50	70	135	200	500
$t_{1/1}$	0,26	0,83	1,63	6,05	13,28	82,99
$t_{2/2}$	0,07	0,21	0,41	1,51	3,32	20,75
$t_{4/4}$	0,02	0,05	0,10	0,38	0,83	5,19

4. On impose au système un guidage fixe.

$$\text{Guidage fixe} = \frac{15 * t(s)}{\alpha (''/\text{pix})}$$

F (mm)	28	50	70	135	200	500
1/1	0,059	0,335	0,92	6,6	21,46	335
2/2	0,007	0,042	0,12	0,825	2,68	41,9
4/4	$9,2 \cdot 10^{-4}$	0,005	0,014	0,1	0,33	5,23

Pour respecter les contraintes, les valeurs correctes sont à F = 135 mm en binning 1/1, F = 200 mm en binning 2/2 et F = 500 mm en binning 4/4. On obtient 3 cas, que l'on peut reporter sur le temps de pose.

5. On peut calculer maintenant la constante des magnitudes. Par définition, la magnitude m d'un astre se mesure à partir de son flux intégré F par la formule de Pogson :

$$m = c - 2,5 \log(F)$$

La constante des magnitudes C est déterminée à partir d'une étoile de magnitude connue et dont on mesure le flux sur l'image. C est en fait la moyenne des différentes valeurs obtenues sur diverses étoiles calibrées.

Lors d'une étude précédente, C variait de 24 (pleine Lune) à 22 (nuit sans Lune). On prend la valeur moyenne, c'est-à-dire 23.

On peut alors établir la formule suivante :

$$C = 23 + 2,5 \log \frac{t(s)}{30(s)} + 5 \log \frac{\alpha (''/\text{pix})}{3 (''/\text{pix})}$$

On peut vérifier que quelque soit la focale de l'objectif et le binning, on obtient toujours pour C la même valeur .

$$C = 24,57$$

On calcule la magnitude limite définie comme :

$$m_{lim} = C - 2,5 \log(\text{bruit})$$

Il faut alors déterminer la valeur de « bruit ». Le bruit se traduit par une variation aléatoire du signal enregistré autour d'une valeur moyenne, soit dans le temps, soit dans l'espace. Ces fluctuations limitent fondamentalement la détectivité. Le bruit s'exprime comme l'écart-type en nombre d'électrons du signal enregistré.

Si p (pas-codeurs) est exprimé en nombre d'électrons à la sortie du CCD, le bruit sera lui-même exprimé en nombre d'électrons. Afin de rendre la contribution du bruit de quantification négligeable, il faut un pas-codeur correspondant à un petit nombre d'électrons.

Pour profiter de toute la dynamique du CCD avec un faible bruit, il faut utiliser un convertisseur à très grande résolution (~ 15 bits).

Le bruit total est obtenu en faisant la somme quadratique de tous les bruits élémentaires.

$$\sigma_t = \sqrt{(\text{Bruit thermique})^2 + (\text{B. de transfert})^2 + (\text{B. de reset})^2 + (\text{B. de signal})^2 + (\text{B. de quantification})^2}$$

Il est important de déterminer expérimentalement le bruit d'une caméra afin de détecter toute anomalie et plus généralement pour optimiser son fonctionnement par des réglages adéquats.

Dans la pratique, divers bruits de fonctionnement s'ajoutent au bruit de signal. Nous regrouperons ces bruits additionnels (bruit de reset, bruit thermique...) sous le nom générique de bruit de lecture.

Le bruit de lecture du CCD dépend de nombreux facteurs tels que les valeurs des polarisations continues appliquées, la stabilité du gain de l'amplificateur, les couplages parasites dans les connexions ... Autant de paramètres qu'il faut essayer d'ajuster au mieux.

Le bruit thermique ne peut être atténué qu'en refroidissant le CCD.

Donc, avec une caméra CCD à 14 bits, on a :

$$2^{14} \sim 16\,000 \text{ photons}$$

On se limite à $\frac{3}{4}$ de la dynamique : 12 000 photons.

Par effet photoélectrique sur le réseau de cellules photoconductrices au silicium, on a :

$$6\,000 \text{ électrons}$$

On a 3 électrons par pas-codeurs, on obtient finalement

$$\text{bruit de photons} = 2000 \text{ pas-codeurs}$$

Pour le bruit de lecture, on a 45 pas-codeurs.

D'où

$$m_{lim} = 24,57 - 2,5 \log \sqrt{45 + 2048}$$

$$m_{lim} \sim 20,42$$

Cette valeur est trop grande. On ne pourra pas détecter une étoile d'une si grande magnitude. Le calcul du bruit ne doit pas être correct. Des bruits ont été oubliés. Ne pouvant pas les déterminer (surtout leurs donner une valeur), on obtiendra la magnitude limite lorsqu'on aura fait les premières mesures (aucune photographie réalisée avec l'appareillage utilisé du fond du ciel n'a été faite).

Pour continuer l'étude, on va fixer la magnitude limite à 14. Cette valeur apparait atteignable avec notre caméra.

7. Il faut déterminer le nombre d'étoiles que l'on observera pour une magnitude limite égale à 14. On connaît la série de valeurs suivantes :

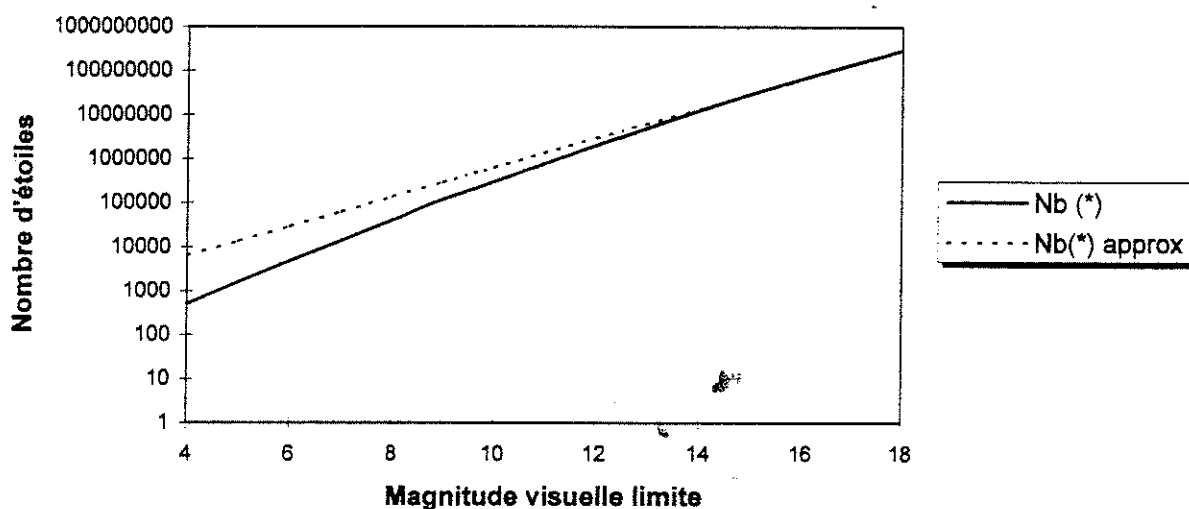
Magnitude limite (visuelle)	Nombre d'étoiles
4	500
5	1600
6	4800
7	14000
8	40000
9	120000
10	300000
12	2000000
15	30000000
18	300000000

On se place sur un graphe semilogarithmique en Oy ces différents points en fonction de la magnitude. On obtient pratiquement une droite. La loi est donc en exponentielle. On peut l'approximer par la loi suivante, valable pour $m > 15$.

$$Nb = 287,2 * \exp(0,7699 * m) \quad \text{pour } m > 15$$

Pour $m=14$, $Nb = 1,4 \cdot 10^7$ étoiles

NOMBRE D'ETOILES PLUS BRILLANTES QU'UNE MAGNITUDE LIMITE



On remarque bien que la courbe approximée (-----) s'accorde bien à la courbe théorique à partir d'une magnitude de 14/15.

7. On va déterminer la densité d'étoiles dans l''^2 .

$$D(*) = 1,4 \cdot 10^7 / 41\,252,96 \quad \text{sur la sphère}$$

$$D(*''^2) = 7,5 \cdot 10^7 / (41\,253,96 \cdot 3600^2)$$

$$D(*''^2) = 26 \cdot 10^{-6} *''^2$$

8. On peut calculer le champ

$$A(*''^2/\text{champ}) = \alpha^2(*''/\text{pix}) * \left(\frac{768}{\text{binning } x} \right) * \left(\frac{512}{\text{binning } y} \right)$$

avec $\text{binning}_{x,y} = 1, 2, 4$

F (mm)	28	50	70	135	200	500
$A_{1/1}$	$1,73 \cdot 10^9$	$542 \cdot 10^6$	$276 \cdot 10^6$	$74,3 \cdot 10^6$	$33,9 \cdot 10^6$	$5,42 \cdot 10^6$
$A_{2/2}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----
$A_{4/4}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----

On vérifie que pour chaque focale, $A_{1/1} = A_{2/2} = A_{4/4}$.

9. On calcule maintenant le nombre d'étoiles par champ.

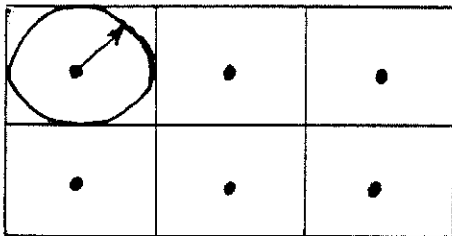
$$N (\text{*/champ}) = \text{densité } (*/''^2) * A (''^2/\text{champ})$$

F (mm)	28	50	70	135	200	500
N	$4,5 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	881	141

Comme N est fonction de A, quelque soit le binning, N sera toujours égal en fonction de la focale.

10. On peut alors calculer la distance minimale qui sépare 2 étoiles sur l'ensemble des cellules CCD.

Raisonnons sur un exemple :



$$S = 100'' * 100'' = 10^4 \text{ ''}^2 \text{ surface totale}$$

On divise le carré en carrés de petites dimensions. La surface du petit cercle est $s = \pi r^2$. On suppose que ces cercles ont la même surface que les carrés (quadrature du cercle).

$$\text{On obtient alors : } d_{\text{mini}} ('') = \sqrt{\frac{A (''^2 / \text{champ})}{N (\text{*/ champ}) * \pi}}$$

$$d_{\text{mini}} = \sqrt{\frac{1}{\pi * \text{densité } (*/''^2)}}$$

On trouve $d_{\text{mini}} = 110''$ entre chaque étoile.

11. On peut en déduire la distance entre 2 étoiles en pixel. Pour cela, on calcule

$$d (\text{pix}) = \frac{d_{\text{mini}} ('')}{\alpha (''/\text{pix})}$$

F (mm)	28	50	70	135	200	500
1/1	1,66	2,96	4,31	8	11,8	29,6
2/2			2,1	4	5,9	14,8
4/4				2	2,9	7,4

Il ne faut pas prendre une distance en pixel trop petite. Sinon les étoiles faibles se perdent dans le bruit du fond du ciel.

12. Conclusion

On obtient 3 cas idéaux. On n'en gardera qu'un.

F = 200mm en binning 2/2
temps de pose ~ 5 sec
échantillonnage = 19 ''/pix
magnitude limite atteignable = 14
champ = $2,61^{\circ 2} = 33,9 \cdot 10^6 \text{ ''}^2$
nombre d'étoiles dans le champ = 881

Remarque : L'avantage du binning 2/2 sur le binning 1/1 est que l'on peut stocker plus de fichiers. On pourra lors d'une nuit de mesures prendre plus de photographies.

6. MODE OPERATOIRE

1. Le matériel

On utilise un télescope avec un téléobjectif de 200mm sur une monture motorisée sur les 2 axes. La caméra est une CCD HiSi22 avec un micro-ordinateur portable, l'ensemble étant prêté par l'Aérospatiale. (Le télescope est guidé ; lors de l'étude, on a raisonné sans guidage).

Pour faciliter les mesures, la caméra est fixée sur un socle avec des arrêts permettant de pointer pratiquement instantanément les points du ciel intéressants. De plus, un levier permet de placer la caméra à 90° et à 45°.

2. La détermination des champs

On a sélectionné différents champs du ciel compris dans des constellations qui se trouvent aux alentours de 45° au-dessus de l'horizon. A l'aide du programme informatique C2A, on a pu

obtenir des champs hors de la Voie Lactée, comportant des étoiles de même type spectroscopique et avec aucune étoile variable. La magnitude la plus grande (donc l'étoile la moins brillante) d'un objet connu est en moyenne pour chacun de ces champs comprise entre 13 et 14.

3. La saisie des images

La saisie des images consiste à prendre sur différentes portions du ciel le fond de ciel. On va prendre diverses zones du ciel en plus du champ. Tout d'abord, on photographie au zénith (90°). Ensuite, on va faire une prise de vue dans chaque direction de la rose des vents, c'est-à-dire N, NE, E, SE, S, SO, O, NO, soit 8 points (en faisant en sorte d'éviter la Voie Lactée). On revise alors le zénith pour voir s'il y a une dérive au cours du temps. On fait ainsi 3 séries de mesures en repassant à la fin de chacune par 90° .

Ensuite, on pourra photographier les différents champs sélectionnés, en passant chaque fois par le zénith.

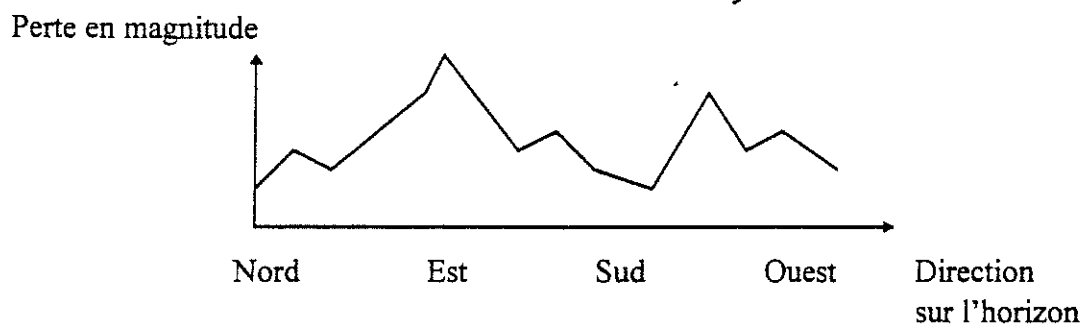
Les conditions climatiques au moment des prises de vue vont influencer les résultats. Suivant la température, la période de l'année, l'heure de la nuit, l'humidité du ciel..., la qualité des clichés seront différents. Il faudra s'affranchir de ces "contraintes" en effectuant les mesures le plus rapidement possible, sur 3 ou 4 soirs avec un ciel variant le moins possible.

De plus, il sera peut-être nécessaire d'utiliser un filtre vert. En effet, la caméra CCD couvre un domaine de longueurs d'onde plus large que l'oeil humain. Or cette étude s'adresse tout d'abord aux personnes observant le ciel à l'oeil nu et sans instrument particulier. Donc, il faudra filtrer la lumière reçue par la caméra du fond du ciel.

4. Les sites de mesures

Les photographies seront réalisées sur 3 ou 4 sites tout d'abord. Une première série de mesure sera faite à Léguevin (31) à 20 km à l'ouest de Toulouse. Une deuxième à l'observatoire de Rabastens (81) à 40 km au nord-est de Toulouse. Le ciel devrait y être de bonne qualité. Une troisième à St-Geniès (31) à quelques kilomètres au nord de Toulouse. Peut-être une quatrième série de mesures sera effectuée à l'observatoire de Jolimont, en plein coeur de Toulouse.

Il serait intéressant de pouvoir "quadriller" tout le ciel sur un site de bonne qualité, étalé sur plusieurs nuits d'observation (Pic du Midi ?). On pourrait alors photographier à quelques degrés par degrés tout l'ensemble du ciel. On n'aurait pas ces vides dans les champs que l'on va avoir sur les 4 sites mesurés. Ceci faciliterait l'exploitation des résultats : on pourrait intégrer la perte en magnitude par rapport à la latitude (les 360° pour faire le tour de la voûte céleste). Il n'y aurait plus de zones manquantes: tout le ciel serait pris en compte.



Au Sud, la perte en magnitude est faible: le ciel est peu pollué. Par contre, à l'Est, la perte en magnitude est très élevée : le ciel est de mauvaise qualité; il est pollué.

5. Traitement des images

Lors du traitement des images, il faut éliminer tous les bruits provenant de l'instrumentation (bruit de la caméra CCD, bruit dû à la stabilité du matériel qui n'est pas parfaite ...) qui sont intervenus pendant les mesures.

7. LOI DE WALKER ET PROGRAMME THOT

A partir des données recueillies lors des différentes mesures sur plusieurs sites, on pourra tenter de confirmer la loi empirique de Walker, donnant l'accroissement de l'éclat du fond du ciel, ou au contraire d'en montrer ses limites, pour essayer d'améliorer le modèle.

Rappel : loi de Walker $\log I = 3 - 2,5 \log R + \log P$

Le programme Thot, développé par M. Bonavitacola, permet le calcul de l'augmentation relative de la luminosité du fond du ciel à 45° degrés au-dessus de l'horizon. Il utilise comme modèle la loi de Walker et permet d'estimer le niveau de dégradation du ciel selon l'azimut. Pour cela, il suffit de connaître la population des villes entourant ce site, leur position géographique et la situation du lieu d'observation. Alors, l'observateur peut déterminer rapidement un lieu idéal. Ce programme permet également de prévoir la dégradation d'un site en fonction de l'évolution démographique d'une ville.

Notre étude va permettre de valider le modèle et/ou de le faire évoluer en l'améliorant. On va pour cela déterminer une série d'indices de "qualité", caractérisant ainsi la pollution du site. On peut essayer de repérer le plus faible objet étendu visible ou estimer la magnitude limite. A l'aide de champs sélectionnés (aux alentours de 45°) et en s'aidant des magnitudes indiquées, on détermine la plus faible étoile.

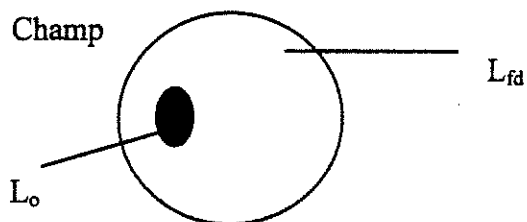
8. INDICES DETERMINANT LA QUALITE DU CIEL

Par définition, une source de lumière est une région du ciel qui émet de la lumière (rayonnement électromagnétique). Pour qu'elle soit détectable, il est impératif qu'elle émette davantage d'énergie que les régions voisines (fond du ciel). L'observation astronomique est donc un problème de contraste, ou de rapport signal/bruit, le signal correspondant à la source, le bruit à toute lumière qui n'est pas la source. Chacun peut faire une observation assez simple: regarder la Lune la nuit et le jour. La nuit, par suite de l'absence de la lumière diffusée du Soleil, le contraste est maximal et l'observation de la Lune facile et riche en détails. En revanche, le jour, le contraste est très faible, le niveau de lumière parasite (en comparaison à la Lune) étant très important: Il est possible de voir la Lune mais l'on observe qu'une tâche blanchâtre et aucun détail sur sa surface.

Pour classifier les différents sites, il faut pouvoir les comparer. Pour cela, il faut déterminer des indices absolus de qualité, applicables à tous les sites. Ces indices permettent de distinguer un bon site d'un mauvais.

Cette classification étant destinée dans un premier temps à l'observateur à l'oeil nu, ces indices doivent strictement provenir de facteurs observationnels.

1. Diminution du contraste des objets étendus



1. Le contraste C est défini par

$$C = (L_o - L_{fd})/L_{fd}$$

avec L_{fd} , la luminance du fond du ciel et L_o , la luminance associée à un objet étendu (nébuleuse...),
De plus :

$$L_{fd} = \int_{\text{champ fond du ciel}} \sigma(fd) ds$$

et

$$L_o = \int_{\text{champ objet}} \sigma(o) ds$$

où σ est la luminance surfacique.

Si on augmente le niveau de lumière parasite L_p , on a :

$$C' = ((L_o + L_p) - (L_{fd} + L_p))/(L_{fd} + L_p) = (L_o - L_{fd})/(L_p + L_{fd}) \leq C$$

Le contraste est plus petit et les conditions d'observation moins favorables.

2. Si on écrit C comme : $C = (L_{fd} - L_o)/L_o$

et $L_{fd} = L_{fdn} + L_{fdp}$ (naturel + parasite)

alors $C = (L_{fdn} + L_{fdp} - L_o)/L_o$

$$C = (L_{fdn} + L_o)/L_o + L_{fdp}/L_o$$

avec $(L_{fdn} + L_o)/L_o = \text{Constante}$

3. Soit L' la luminance limite dans un ciel « noir » avec un minimum de lumière parasite, qu'elle soit d'origine naturelle ou artificielle. Soit un ciel « éclairé » (Lune, lumière Voie Lactée, lumière parasite...). On suppose $L_p = aL_{fd}$. Dans ces nouvelles conditions, soit L^2 la luminance limite. Si l'on suppose les valeurs du contraste équivalentes soit des conditions d'observation analogues, on peut écrire :

$$C' = (L' - L_{fb})/L_{fd} = ((L^2 + L_p) - (L_{fd} + L_p))/(L_{fd} + aL_{fd}) = C^2$$

soit en supposant que $L_{fd} \leq L'$ (et $\leq L^2$), $(a+1) = (L'/L^2)^{-1}$, ou $\Delta m = 2,5 \log(a+1)$.

Δm représente une diminution de magnitude limite. Ainsi, une augmentation de la lumière de fond de ciel de 10% augmente la limite de visibilité de 10%, ce qui correspond à une diminution de la magnitude limite de 0,1.

2. La plus grande magnitude détectable

Il s'agit de comparer tous les sites étudiés par rapport à une magnitude limite de référence, qui est fonction de l'optique utilisé. Pour cela, sur un site où le ciel est "pur" (sans pollution lumineuse), on détermine sur le champ photographié la magnitude du plus faible objet connu (typiquement sur les champs sélectionnés une magnitude de 13 à 14). On obtient alors une magnitude de référence m_{pur} . On fait de même sur un site "pollué". On a $m_{pollué}$.

On calcule alors le rapport q , coefficient de magnitude:

$$q = m_{pollué}/m_{pur} \quad q < 1$$

Si q est près de 1, le ciel du site est de bonne qualité.

Si q est loin de 1, le ciel du site est de mauvaise qualité.

On répète ce processus pour plusieurs champs, avec pour chaque champ une magnitude de référence et une magnitude pollué.

Suivant la direction vers laquelle on observe, on connaîtra la qualité du ciel.

S'il y a cohérence dans les résultats, c'est-à-dire si une direction n'est pas de qualité complètement opposée aux autres directions, on peut faire la moyenne sur tous les coefficients de magnitude q_i .

Remarque: On raisonne ici sur des magnitudes ponctuelles. Pour notre étude, il est peut-être plus intéressant d'utiliser des magnitudes surfaciques. Il suffit alors de déterminer la magnitude du fond du ciel.

3. Luminosité des pixels

On peut utiliser les possibilités qu'offrent la caméra CCD. On détermine la luminosité du pixel le plus noir sur le champ photographié, et ce sur chaque cliché, sur chaque site. On pourra comparer cette luminosité sur toute la durée des observations sur chaque site et déterminer une évolution de la qualité au cours de la nuit. On pourra également comparer d'un site à l'autre, en faisant des moyennes pour chaque site, et montrer lequel est plus pollué et lequel a la qualité la meilleure.

9. CLASSIFICATION DES SITES

A partir de la série d'indices déterminés, on pourra mettre une "note" et une appréciation sur le site concerné.

En recoupant les indices avec des intervalles de valeurs homogènes, on pourrait obtenir la classification suivante:

$$a < \{\text{indice1/indice2/.../indice n}\} < b$$

Note	Appréciation	Observation à l'oeil
0		
1	Mauvais	
2		
<hr/>		
3	Insuffisant	
4		
<hr/>		
5	Acceptable	
6	Correct	
<hr/>		
7	Bon	
8		
<hr/>		
9	Très Bon	
<hr/>		
10	Exceptionnel	
>10		

10. PERSPECTIVE

Nous allons réaliser les photographies courant juin. Je pourrais alors analyser toutes les données recueillies. J'obtiendrais une série d'indices qui permettront de connaître la qualité du ciel sur les sites étudiés. J'essaierais ensuite de mettre en place une procédure que les astronomes pourront utiliser (via des publications, via Internet) pour déterminer la qualité de leur site. On sera en mesure également d'apporter des modifications au modèle de Walker. A plus long terme, on souhaite cartographier toute la France et classer ainsi les différents sites comme cela est fait pour la qualité des plages sur le littoral.

Nous souhaitons obtenir des résultats intéressants et solides pour le 2^{ème} Congrès sur la Pollution Lumineuse de Rodez (12), début octobre 1998.

D'ici là, je continue le stage.

11. ANNEXES

• Annexe 1 : REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- * Astronomie CCD - Christian BUIL - Société d'Astronomie Populaire
- * La caméra CCD - Alain KLOTZ
- * Optique géométrique et ondulatoires - J.P. Pérez
- * Rapport La Protection des Observatoires Astronomiques et Géophysiques - Institut de France / Académie des Sciences - Grasse 1984
- * Rapport Congrès sur la Protection de l'Environnement Nocturne - Rodez 1995

• Annexe 2 : REMERCIEMENTS

Je remercie toutes les personnes de l'Observatoire de Jolimont et plus particulièrement :

- * Mr Bonavitacola, pour le matériel et notamment la caméra CCD (Aérospatiale)
- * Mr Hoffer, qui nous a procuré une série de champs d'étoiles aux alentours de 45° et de magnitude maximale ~ 14
- * Mr Klotz qui m'a permis de mettre en place le protocole expérimental
- * Mr Hirtz, qui nous a prêté son téléobjectif 200 mm.