

Images numériques :

Echantillonnage et numérisation

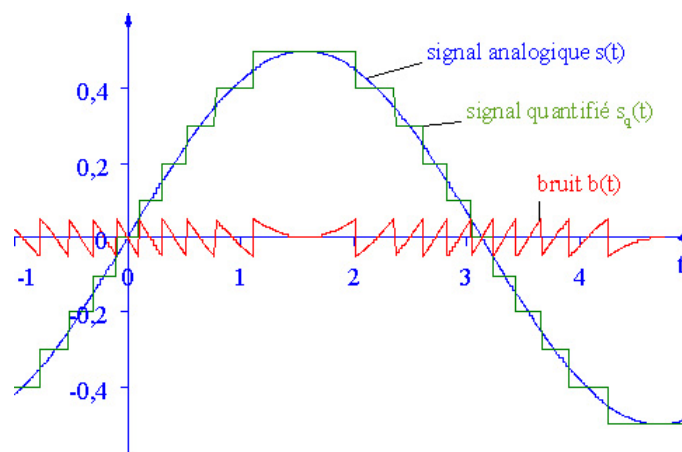
Précédents :

- Principes de fonctionnement des CCD
- Acquisition et pré-traitement des images

Les images formées par la caméra sont converties en signal exploitable par un ordinateur. Ceci implique d'une part la numérisation du signal, d'autre part l'échantillonnage spatial du plan focal. Ces deux opérations ont une incidence sur le signal, qu'on cherche à minimiser.

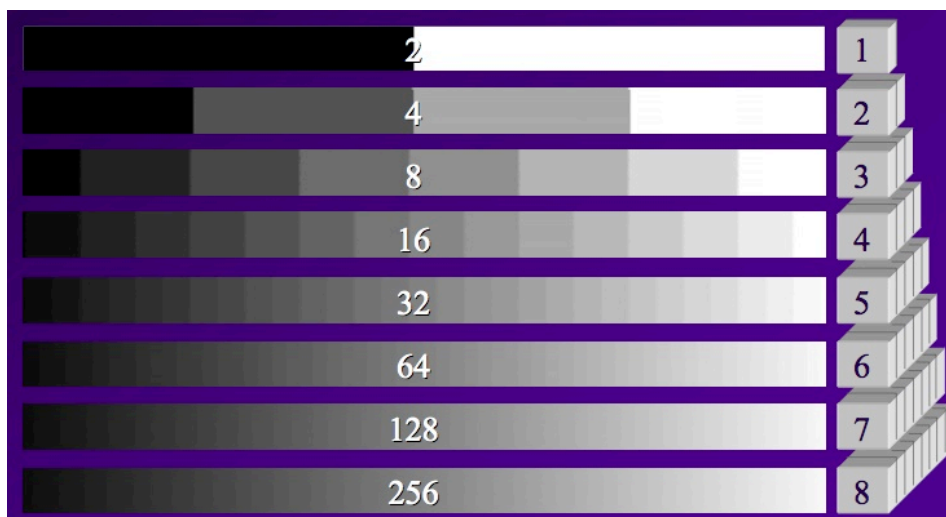
Numérisation d'un signal

La numérisation consiste à convertir un signal physique continu sur une échelle de valeurs discrètes. Cette opération est effectuée par le convertisseur analogique/numérique situé après l'ampli. L'échelle de valeurs est caractérisée par sa résolution, qui dépend du nombre de bits utilisés pour numériser le signal.



Exemple de numérisation d'un signal analogique temporel (en bleu). Le signal numérisé est arrondi à la valeur entière la plus proche (en vert). Il en résulte une erreur de numérisation (en rouge), toujours inférieure au pas de numérisation.

Avec une caméra CCD, on fait d'abord en sorte d'ajuster la dynamique du convertisseur à celle de la caméra, pour coder correctement même les hauts niveaux. On identifie ensuite le nombre de bits nécessaire, de façon à coder le bruit de lecture sur au moins un bit pour ne pas être limité par la conversion (mais utiliser un pas plus fin n'apporte pas plus d'information). On utilise généralement en imagerie des convertisseurs sur 12 à 14 bits, qui sont raisonnablement linéaires et fiables. Le bruit de numérisation est égal à $1/\sqrt{12}$ en bits. Une échelle de 8 bits est suffisante pour reconstituer une impression continue à l'œil (le bruit de numérisation n'est pas perceptible), mais le critère final est d'obtenir un bruit de numérisation plus petit que le bruit de lecture du CCD pour ne pas dégrader les performances de l'instrument.



*Echelles de gris codées sur un nombre de bits variables.
L'impression de discontinuité est due au bruit de numérisation.*

Avec un signal temporel, on prélève les valeurs du signal à intervalles de temps réguliers. Cette opération s'appelle échantillonnage. En imagerie, elle est effectuée dans le plan focal de la caméra par la matrice de détecteurs utilisée. On s'arrange également pour qu'elle ne limite jamais la qualité de la mesure, en choisissant un pas d'échantillonnage qui ne dégrade pas les performances du système optique.

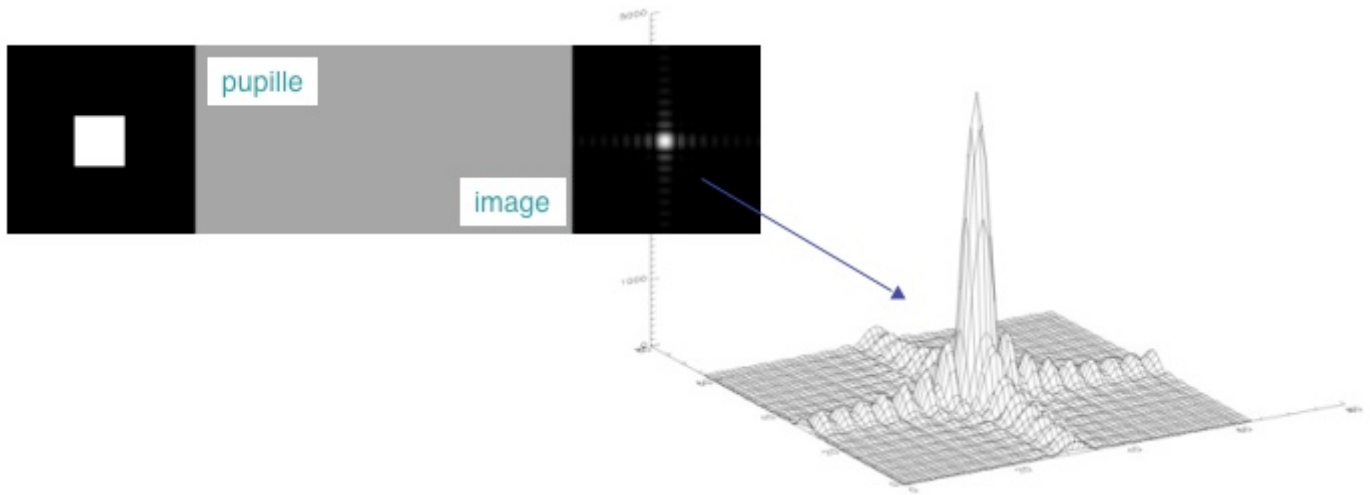
Formation d'images

Dans les meilleures conditions, l'image d'une source ponctuelle formée par le télescope est une tache.

- Une source ponctuelle située à l'infini (une étoile) éclaire la pupille d'entrée du télescope. L'intensité de l'image formée dans le plan focal est fournie par le calcul de la diffraction en champ lointain. C'est le carré de la transformée de Fourier de la pupille d'entrée :

$$I_{\text{abs}}(x,y) = (TF_{\text{pupille}})^2$$

- Si la pupille est rectangulaire, sa TF est un sinus cardinal dans chaque dimension :



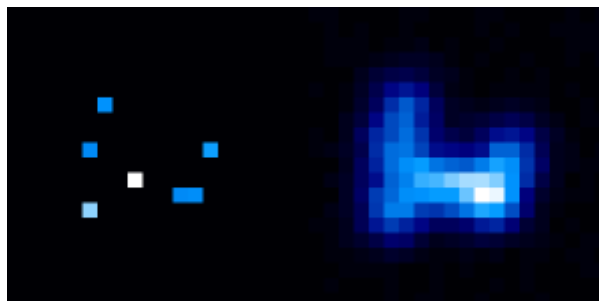
- Si la pupille est circulaire, la TF est similaire avec une symétrie circulaire, elle comporte des anneaux concentriques de plus en plus atténués (tache d'Airy). La demi-largeur du lobe central de la tache d'Airy vue à la longueur d'onde λ est égale à $1,22 \lambda / D$, où D est la taille du miroir. On utilise souvent cette valeur comme ordre de grandeur de la résolution :



Figure1 : Image d'une étoile

Cette figure est la réponse impulsionnelle du système optique, on l'appelle Fonction d'Etalement de Point (PFS en anglais). La dégradation de l'image est donc due à l'utilisation d'un instrument, elle est intrinsèque au processus de mesure : on est limité en résolution angulaire parce qu'on doit utiliser une pupille d'entrée de dimensions finies. C'est le télescope lui-même qui se comporte comme un filtre passe-bas pour les fréquences spatiales. On ne peut améliorer la résolution angulaire qu'en utilisant une plus grande ouverture, c'est-à-dire un miroir de plus grande taille, dont la TF sera plus étroite (ou en travaillant à plus grande longueur d'onde).

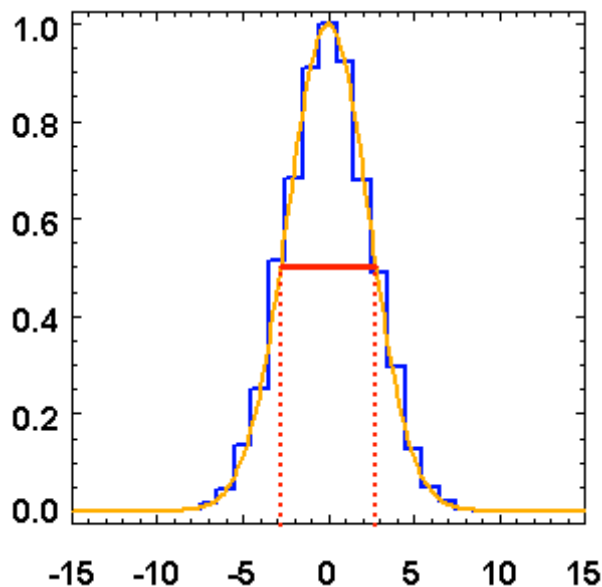
- Pour un objet plus complexe tel qu'un champ d'étoiles, l'image recueillie est donc la convolution de l'objet avec la PSF :



A gauche l'objet considéré (un champ stellaire), à droite l'image qu'en forme le système optique.

- Dans les meilleures conditions la taille du télescope limite la résolution angulaire, mais celle-ci est en général fortement dégradée par la turbulence atmosphérique : l'atmosphère se comporte comme un système optique

formant une image devant le télescope, en perpétuel mouvement autour de sa position moyenne. On peut là aussi caractériser ce système par une PSF, qui a généralement un profil gaussien si l'atmosphère est stable (fluctuations moyennes autour d'une position de repos sur des temps de poses de l'ordre de la seconde). C'est la largeur de cette fonction qu'on appelle seeing et qui limite généralement la résolution depuis le sol. Dans des sites exceptionnels tels qu'Hawaii elle vaut typiquement 1", soit la résolution fournie par un télescope de 50 cm en visible. Utiliser un miroir plus grand avec un instrument classique permet de collecter plus de photons, mais pas d'améliorer la résolution.



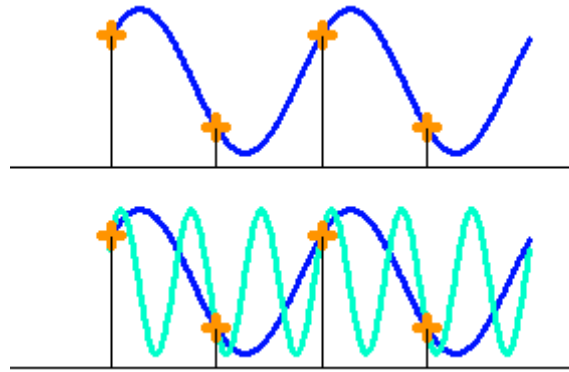
PSF totale pour l'atmosphère et le télescope, dominée par la turbulence atmosphérique. Sa largeur à mi-hauteur limite la résolution finale des images.

- On utilise différentes techniques pour réduire les effets de l'atmosphère : interférométrie des tavelures, optique adaptative, télescopes orbitaux... Il s'agit toujours de s'approcher de la limite théorique où la résolution n'est limitée que par la diffraction du télescope. Pour les objets lumineux, une autre technique consiste à prendre des poses en rafales et à sélectionner après coup celles où la turbulence est minimum et les détails sont les plus fins.

Echantillonnage du plan focal

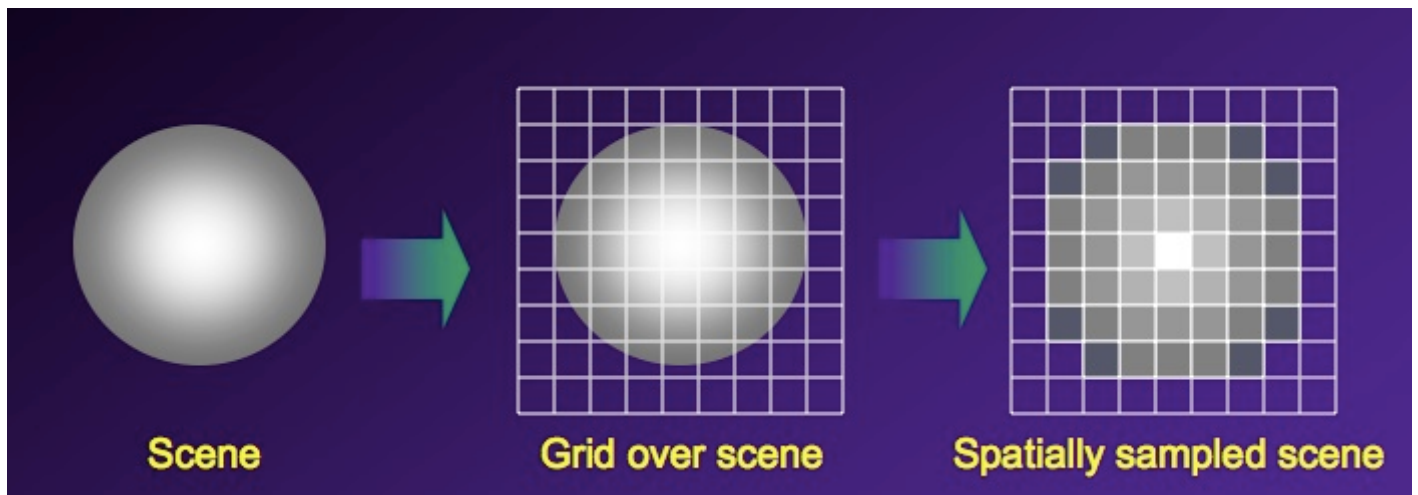
En tout état de cause, on ne veut pas risquer de dégrader la résolution difficilement obtenue à cause d'un mauvais échantillonnage du plan focal. Celui-ci doit donc être plus fin que la meilleure résolution envisageable.

Le théorème de Shannon précise la fréquence d'échantillonnage requise pour reconstituer les fréquences spatiales jusqu'à une certaine limite f_0 . Sur la figure, on veut mesurer les plus hautes fréquences spatiales (f_0 , en bleu) présentes dans l'image. La fréquence d'échantillonnage doit être au moins $2f_0$, le double de la fréquence maximale visée (échantillons en jaune - sur la figure, on suréchantillonne). Les fréquences plus élevées (f_+ , en cyan) ne seront pas mesurées en tant que telles, mais seront pliées autour de la fréquence maximum (détectées à $2f_0 - f_+$). La fréquence maximum détectable avec un certain pas est appelée fréquence de Nyquist. Le pas d'échantillonnage du plan focal doit donc être au moins le double du meilleur seeing attendu pour ne jamais perdre d'information et ne pas mélanger les plus hautes fréquences.



Echantillonnage d'une fréquence inférieure à la fréquence de Nyquist (en bleu). Les fréquences supérieures (en cyan) ne sont pas détectables en tant que telles.

Traduit en distances dans le plan focal, ceci conduit à un pas d'échantillonnage (distance entre pixels) minimum égal à $0,61 f \lambda / D$, où f est la distance focale du télescope (si on veut échantillonner la résolution théorique, par exemple avec un système d'optique adaptative). Pour un instrument limité par le seeing, un pas de $f/2 \text{ Seeing}_{\text{max}}$ est suffisant.



PSF et grille d'échantillonnage dans le plan focal.



PSF suréchantillonnée, échantillonnée de façon optimale, et sous-échantillonnée. On voit que le suréchantillonnage conduit à une grande quantité d'informations inutiles.

Le suréchantillonnage se traduit par un excès d'information à traiter. On peut limiter le suréchantillonnage au moment de l'acquisition en binnant les pixels par 2 ou 3 dans chaque dimension, c'est-à-dire en les lisant par paquet de 4 ou 9 - effectuer cette opération au moment de l'acquisition présente l'avantage de réduire le bruit de lecture.

Un corolaire important est que la résolution angulaire des images n'a qu'un lointain rapport avec le pas de la

matrice ou le nombre de pixels utilisés. C'est toujours la PSF totale (télescope + atmosphère) qui détermine la résolution des images astronomiques.

Pour en savoir plus :

 [Liens pour l'observation](#)

Précédents :

- [Principes de fonctionnement des CCD](#)
- [Acquisition et pré-traitement des images](#)

 [Retour](#)

<http://www.lesia.obspm.fr/~erard>

Dernière mise à jour : *15 avril 2011*
Remarques : [stephane.erard at obspm.fr](mailto:stephane.erard@obspm.fr)
S. Erard © 1999-2011