

Imagerie à haute résolution en orbite



Introduction

Ce travail se donne pour but d'appréhender les concepts technologiques fondamentaux nécessaires pour pouvoir aborder correctement l'imagerie à haute résolution en orbite. Loin de prétendre décrire tous les aspects de ce domaine, il peut constituer une bonne introduction pour le néophyte (néanmoins armé des connaissances physiques nécessaires). Une attention toute particulière sera développée sur le concept de résolution spatiale : ce qui se fait au présent et ce que l'on peut espérer atteindre dans le futur proche. Nous verrons que ce domaine est un secteur sensible à bien des égards...

Commençons par poser les bases essentielles.

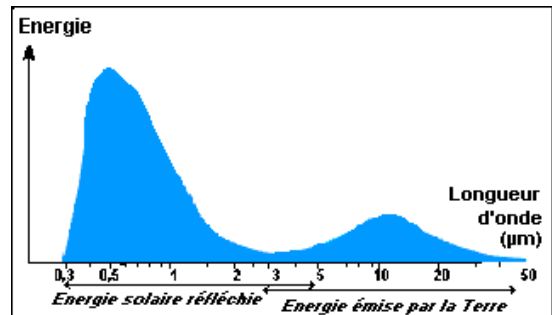
I. Les capteurs

A. Types de capteurs en télédétection : passifs et actifs

1. Le capteur passif

Le capteur passif utilise l'énergie émise par le soleil et réfléchi (en optique) ou absorbée et retransmise (en infrarouge thermique) par la cible. On comprend immédiatement que le point faible principal des capteurs passifs optiques vient du fait qu'ils sont inopérants de nuit... mais il existe une parade à cette contrainte : on peut placer le satellite en orbite héliosynchrone. Cela est d'ailleurs intéressant à d'autres points de vue : le soleil reste toujours au même endroit dans le ciel par rapport au satellite (par définition d'une orbite héliosynchrone) et donc le point d'illumination reste toujours à la même place sur les images prises par le capteur. C'est important, lors d'une comparaison entre deux images prises par le même capteur, d'avoir exactement la même illumination incidente.

Dans la zone spectrale du rayonnement infrarouge thermique, cela n'est pas du tout un problème car, de nuit, la zone n'est qu'indirectement chauffée par le Soleil, par le biais de l'atmosphère (qui conserve une température relativement constante). Elle émet un rayonnement thermique (de manière analogue à un corps noir) détectable depuis l'orbite.



Les capteurs dont ce travail va traiter sont passifs (optiques). Cependant il est bon de rappeler la distinction de ce type de capteur avec les « actifs ».

2. Le capteur actif (rappel)

Dans un capteur actif, c'est le capteur lui-même qui éclaire la cible. Celle-ci réfléchit alors le rayonnement reçu vers le satellite, où il est capté et mesuré (et aussi comparé au rayonnement envoyé, notamment en ce qui concerne la différence de temps émission-réception qui est très précieuse pour connaître l'altimétrie car de fait :

$$\Delta t = d/c \Leftrightarrow d = \Delta t \cdot c$$

Et on dispose ainsi de l'altitude du satellite, donnée très utile comme on le verra par la suite en imagerie)

Un autre avantage évident de ce type de capteur est qu'il s'affranchit complètement de la problématique jour/nuit.

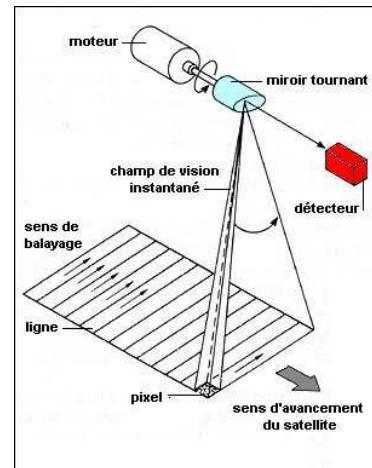
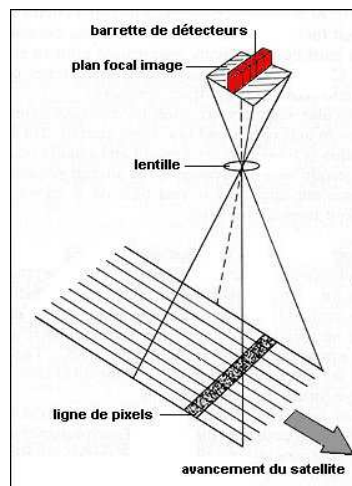
B. Architecture générale du système imageant

De manière générale, un système imageant à haute résolution embarqué sur un satellite reprend toujours ces quelques éléments fondamentaux suivants :

- Le miroir primaire (ou parfois une lentille), pour rassembler le maximum de lumière sur son plan focal où se trouve le détecteur. Le miroir permet aussi d'atteindre la résolution spatiale désirée, comme on va le voir par la suite.

- Le détecteur, pour collecter les informations optiques. Il est généralement constitué d'une matrice rectangulaire de CCD (voire d'une disposition plus particulière comme dans le satellite Spot où ces CCD sont tous alignés)

- Un système qui permet le balayage d'une zone sur la terre, qu'on appelle la « fauchée » du satellite. Ce système dépend de la configuration choisie pour les CCD. Une habitude prise depuis la série Landsat a été de permettre un mouvement de rotation au miroir du système, permettant à celui-ci d'accéder à un large couloir. L'autre système développé (en Europe) qui fut adopté pour la série Spot fut d'aligner tous les CCD du détecteur pour balayer toute la zone sans mouvement (on s'affranchit du mouvement de rotation qui induit des perturbations mécaniques, des vibrations)



Ces deux schémas symbolisent deux architectures développées : l'américaine (en haut pour Landsat) et l'européenne (à gauche pour Spot)

C. Résolutions des capteurs

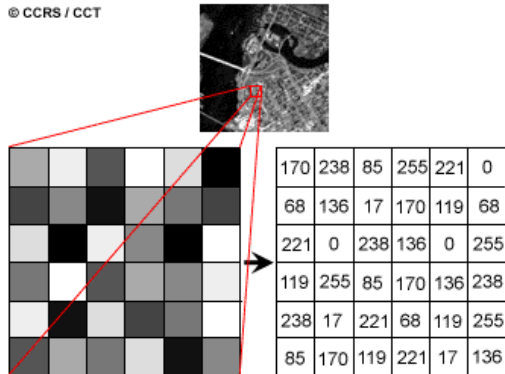
La recherche scientifique actuelle dans ce domaine a pour but principal d'améliorer les différents types de résolution, et c'est pour cela que ces notions fondamentales de télédétection se doivent d'être redéfinies dans le but de pouvoir situer correctement les avantages et défis des systèmes embarqués actuels et futurs. La compréhension de ces quelques notions est très importante car toute la discussion qui va suivre repose dessus.

1. La résolution spatiale

Elle est définie par le « champ de vision instantané » (CVI) qui détermine l'aire de la surface « visible » (à une altitude donnée et à un moment précis) par un élément de la plaque des CCD. Cette aire est donc la cellule de résolution spatiale de l'élément CCD (bien entendu au travers du système optique). Prenons un exemple éclairant pour le satellite Spot : chaque élément sensible CCD du capteur haute résolution du satellite ne mesure que $13 \mu\text{m}$ ($0,013\text{mm}$) mais cet élément sensible « voit » une zone d'environ $10\text{m} \times 10\text{m}$ (le CVI) à la

surface de la terre à travers le télescope du système d'observation. On dira donc que la résolution du capteur est de 10m. (Et comme le capteur est composé de 6000 éléments sensibles placés le long d'une barrette, le satellite circulant sur son orbite « balaye » une zone de 6000 x 10m = 60 km à la surface de la terre, ce qu'on appelle la fauchée).

© CCRS / CCT

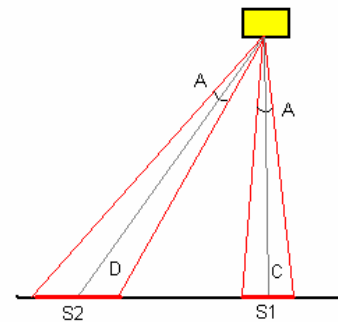


On comprend clairement sur les illustrations ci-contre le principe de fonctionnement des éléments CCD: une valeur numérique proportionnelle à l'intensité est enregistrée (sur un certain nombre de valeurs permises : voir la résolution radiométrique ci-après). Pour une image non compressée, un pixel de l'image reprend la luminosité enregistrée par le CCD correspondant. (si l'image est compressée, un pixel reprend la moyenne des intensités enregistrées par plusieurs CCD).

Sur le schéma de droite, on voit que cette l'aire de résolution, le CVI, vaut :

Aire de résolution = A.C (d'où la nécessité de connaître c, la distance, et donc d'avoir aussi un capteur actif dans le satellite)

Donc pour pouvoir être résolu, un élément observé doit avoir une dimension supérieure ou égale à celle de cette aire-limite. Notons que dans certains cas, si un élément est plus petit mais que sa réflexion domine celle des autres éléments présents autour dans la cellule de résolution, il peut être détecté. On a alors le cas d'une « détection (mais non pas résolution !) plus fine que la résolution ».



Ce type de résolution est très lié au pouvoir séparateur que l'on connaît bien en optique. En effet le pouvoir séparateur d'un instrument, fixé par le critère de Rayleigh, donne le plus petit angle que cet instrument est capable de résoudre :

$$\text{angle} = 1.22 \cdot \lambda/D \quad \text{en radians} \quad (D = \text{diamètre du miroir})$$

Dans ce cas-ci, cet angle, c'est A (voir figure). Donc si la résolution spatiale est décrite en termes de surface (en mètres) et le pouvoir séparateur en termes d'angle (en secondes d'arc), c'est bien la même notion physique qui est derrière (avec l'utilisation du même angle A).

De façon générale, on dit que plus la résolution spatiale est fine, plus le CVI diminue. On comprend bien cela intuitivement sur le schéma du haut. (une résolution de 10m est plus fine qu'une de 20m ; A y est plus fin dans le premier cas)

2. La résolution spectrale

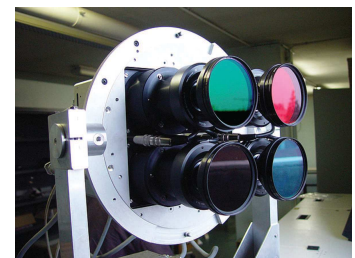
La résolution spectrale de tout système imageant décrit la capacité de ce système à distinguer les différentes longueurs d'onde des rayons qui lui parviennent. Pour bien comprendre cela, prenons un exemple. On peut comparer un détecteur sensible à une grande

plage de λ , par exemple le visible (400-700nm) à un autre détecteur composé de trois capteurs sensibles successivement au bleu (400-500), au vert (500-600), et au rouge (600-700). Le second système donnera plus d'information spectrale quand au photon qui lui parvient : il déterminera plus sensiblement sa région spectrale que le premier. Un détecteur sera donc d'autant plus précis en résolution spectrale qu'il aura de capteurs sensibles à des bandes spectrales de plus en plus fines. La résolution spectrale idéale serait donc donnée pour un capteur capable de distinguer toutes les longueurs d'onde...

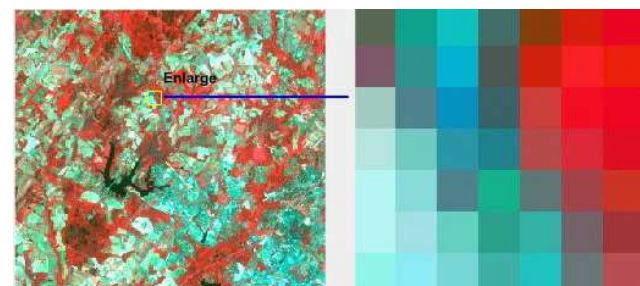
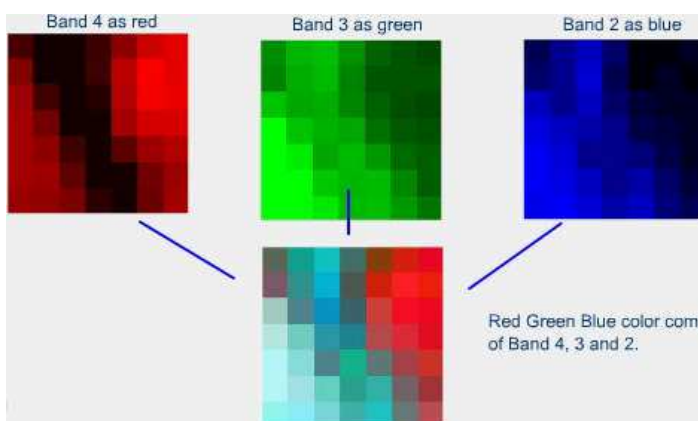
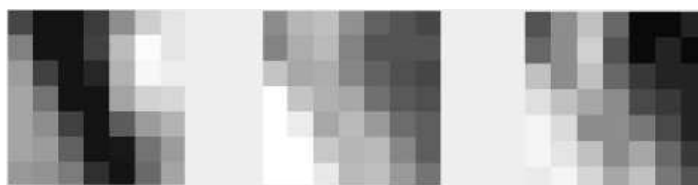
Détecteurs panchromatiques et multispectraux :

L'exemple ci-dessus n'a par ailleurs pas été choisi par hasard : il décrit la différence entre le détecteur panchromatique et le détecteur multispectral.

Le panchromatique est simplement sensible au rayonnement visible, sans distinction de λ . On attribue à ses images des tons noirs ou blanc, en fonction de ce qu'on reçoit comme intensité photonique (c'est-à-dire en fonction du nombre de photons que l'on capte). Les images que l'on observe sur GoogleEarth ont précisément été prises par de telles caméras.



Les caméras multispectrales comportent donc des capteurs sensibles à différentes régions spectrales. Dans le cas par exemple de la caméra à trois bandes spectrale, on attribue aux images prises dans chacune de ces bandes spectrales la couleur de la bande correspondante, bleu, vert et rouge. On superpose ensuite les trois images pour en obtenir une seule, en couleur (conformément aux schémas ci-dessous)



Cette séquence d'images schématise l'explication du mécanisme multispectral de Landsat : à partir des informations collectées sur trois bandes spectrales auxquelles on attribue une couleur, on peut recombinaison le tout pour obtenir des informations en couleurs. (Notons que c'est exactement le même mécanisme qui est utilisé sur des télescopes comme Hubble !) La caméra visible sur l'image du haut présente 4 détecteurs, sensibles aux trois couleurs et à l'infrarouge (la noire).

Il existe des détecteurs munis d'un plus grand nombre de capteurs sensibles à de plus fines bandes spectrales. Ce sont les « hyperspectraux ». Leur avantage évident est une résolution

spectrale importante...mais cela donne de très nombreuses données à traiter. C'est assez lourd pour les ordinateurs.

3. La résolution radiométrique

La résolution radiométrique d'un système décrit sa capacité à reconnaître de petites différences dans l'intensité reçue de la surface observée. Le nombre maximum d'intensités différentes qu'il est possible de distinguer pour un CCD est en relation avec le nombre de bits utilisés pour la représenter, l'enregistrer dans le système informatique. Une capacité de 8 bits donne $2^8 = 256$ intensités différentes (de 0, pas d'intensité détectée jusqu'à 255, l'intensité maximale au-delà de laquelle le détecteur sature). Si on ne possède seulement que 4 bits de résolution radiométrique, on a seulement accès à $2^4 = 16$ niveaux différents.

La résolution radiométrique d'un détecteur est donc très fortement liée à la capacité du CCD de bien différencier les différentes intensités reçues.

4. Premières conclusions

Ces trois types de résolutions sont les bases fondamentales qui nous permettent d'approcher n'importe quel type de télédétection, et notamment ce qui nous intéresse plus particulièrement : l'imagerie à haute résolution en orbite.

Voyons ce que l'on peut déjà dire à partir de là pour un système imageant embarqué...

Problème 1 : Le compromis entre les différentes résolutions

En effet, si on possède une haute résolution spatiale, on observe donc un petit CVI...ce qui réduit la quantité d'énergie reçue par l'élément CCD. Donc cela diminue clairement la résolution radiométrique (on détecte moins d'intensité lumineuse...et il est donc plus difficile de noter des variations d'intensité !). Si on veut dès lors augmenter la résolution radiométrique sans réduire la résolution spatiale, il faut élargir l'intervalle de λ détectable, ce qui revient précisément à diminuer la résolution spectrale ! Inversement, une résolution spatiale plus grossière permet une résolution radiométrique plus grande et une résolution spectrale plus fine.

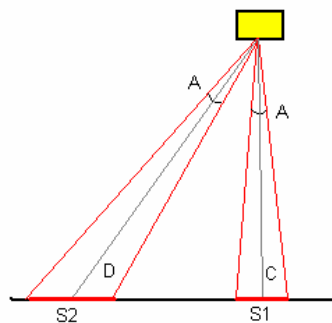
On comprend donc bien pourquoi plusieurs types de détecteurs sont embarqués sur les satellites, en fonction du type de résolution que l'on désire privilégier. L'usage habituel est de prévoir un capteur noir et blanc (la caméra panchromatique) sur toute la gamme du visible (avec donc une faible résolution spectrale) pour disposer d'une haute résolution spatiale et radiométrique. On embarque un autre détecteur, la caméra multispectrale, qui elle possède une plus grande résolution spectrale (par définition) ainsi que radiométrique au détriment de la plus faible résolution spatiale.

C'est le compromis qui est actuellement réalisé pour tous les satellites d'imagerie optique actuels. Mais on peut cependant noter qu'il est possible de combiner les données de la caméra panchromatique et celles de la multispectrale afin de créer des images possédant la résolution spatiale de la panchromatique et la résolution spectrale de la multispectrale (la

résolution radiométrique étant déjà de même ordre dans les deux types de données). C'est possible mais pas systématique, car le traitement des données est relativement lourd...

Problème 2 : variation de la résolution spatiale en fonction de l'angle de vision

Si le CVI n'est pas constant pour tous les pixels de l'image, les pixels correspondant au point de vue du nadir (juste en-dessous du satellite) auront une échelle plus grande que ceux de la périphérie. Cela signifie que la résolution spatiale variera du centre à la bordure de l'image, ce qui est assez désagréable. Il faut en tenir compte dans le traitement des images !



On a de fait :

$$S_2 = A.C$$

$$S_1 = A.D$$

Et comme $D > C$ on voit que $S_2 > S_1$, le CVI est donc bien différent. La résolution étant liée au CVI, elle est donc plus faible dans le cas S_2 . Comment en tenir compte ? Physiquement il n'y a rien à faire : la distance D étant fixée, on ne peut rien y changer. Et l'angle A est fixé pour un capteur CCD. Ce que l'on peut néanmoins effectuer, c'est prendre des couloirs d'observation suffisamment étroits pour que la distance C varie peu, de sorte qu'on traite des pixels de résolution spatiale très proche. C'est une contrainte très forte que l'on retrouve pour toute la télédétection en orbite. Une manière un peu différente de procéder est d'enregistrer des images pour des CVI différents (et donc des résolutions spatiale différentes) et d'assembler indépendamment les images de différente résolution. On obtiendra ainsi petit à petit des cartes entières du globe pour des résolutions différentes : très résolues dans le cas des images de types « S_1 » et moins résolues pour les images « S_2 ».

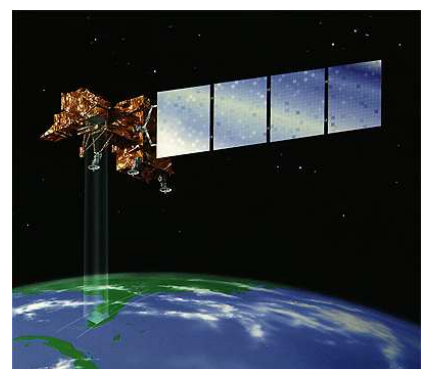
Problème 3 : la distorsion du champ. Il faut éviter des problèmes de distorsions liés à l'optique du miroir (comme on cela a été abordé aux cours : le problème de coussinets et barillets serait très ennuyeux pour l'assemblage d'images pour former des cartes !)

II. Les satellites

A. Les satellites actuels

1. Landsat (des satellites « classiques »)

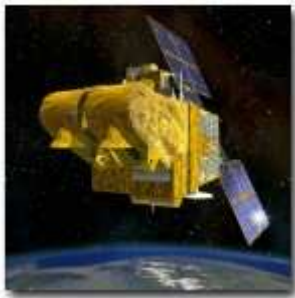
La série des satellites Landsat a débuté en 1972 et Landsat 7, le plus récent, fut lancé en 1999. Ce programme américain visait à produire une cartographie complète de la planète pour permettre des études de la géologie planétaire, surveiller le développement de l'agriculture, les changements climatiques. C'est le premier véritable programme d'observation systématique d'observation de notre monde à résolution moyenne



et haute. Il a permis de très grandes avancées dans de nombreux domaines et a inondé le monde de millions d'images. Ce programme est le grand classique, la référence.

Jusqu'en 1982, les détecteurs étaient de type MSS (Multi Spectral Scanner). Ils étaient composés de 4 bandes spectrales avec pour chacune une résolution spatiale d'environ 70 m et radiométrique de 6 octets (donc $2^6 = 64$ valeurs d'intensités différentes). Un miroir oscillant à l'entrée du détecteur permettait un balayage du couloir de fauchée, qui était large de 185 km.

En 1982, pour Landsat 4, ce système fut remplacé par un plus performant, le TM (Thematic Mapper), comportant davantage de bandes spectrales disponibles (et donc plus fines) pour des résolutions spatiales de 30 m et radiométrique de 8 octets. Un satellite plus sensible spectralement avait en effet été réclamé pour de nombreux domaines. Par exemple, en géologie, certaines roches de compositions différentes ont des caractéristiques spectrales voisines, d'où le besoin d'une meilleure sensibilité spectrale s'était fait sentir. Et entre temps la technologie avait également évolué dans les sens des résolutions spatiales et radiométriques.



2. Spot (classique)

La série des satellites européens Spot s'est également distinguée dans le domaine grâce à de précieuses avancées technologiques. Les 2 détecteurs multibandes HRV (Haute Résolution Visible) peuvent fonctionner en mode panchromatique (sur le domaine 0,51-0,73 μm) avec une résolution spatiale de 10 m et en mode multispectral de résolution spatiale de 20m.

Les Spot disposent d'une fauchée qui varie entre 60 km au nadir, en dessous du satellite, à 80 km. La fauchée est donc plus étroite que celle disponible sur les Landsat, mais la génération Spot est capable d'observer en diagonale sur une largeur qui s'étend sur 950 km

3. Worldview-1 (de pointe)

Conçu par la firme américaine DigitalGlobe (fournisseuse de GoogleEarth) et lancé en septembre 2007 depuis Vandenberg Air Force Base, ce satellite possède un œil d'aigle qui lui permet d'atteindre une résolution jamais atteinte jusqu'ici...dans le domaine civil !

Sa caméra panchromatique atteint une résolution spatiale de 50 cm pour une orbite polaire à 496 km d'altitude, alors que le dispositif multispectral atteint lui 2 m. La fauchée se voit encore être réduite, à 17 km (plus la résolution spatiale augmente et plus le CVI des CCD diminue et donc la fauchée aussi !).



B. Les futurs satellites : des contraintes scientifiques...ou « autres » ?

GeoEye-1, Worldview-2...

Le point important que l'on va chercher à développer est le suivant : pour une résolution désirée, la taille du miroir est prévisible ! En effet, on dit (sur internet) que le satellite GeoEye-1 atteindra une résolution spatiale de 41 cm pour une altitude de 684 km. Avec cela et le critère de Rayleigh, on peut déterminer la taille de son miroir. Car de fait :

Le CVI (de 41 cm sur 41 cm) est sous-tendu par un angle A que l'on peut facilement retrouver : (cf dessin page 4 et 7))

$$\text{tg}(A) = 41 \text{ cm} / 684 \text{ km} \approx A \text{ (approximation des petits angles) (A est ici donné en radians)}$$

$$\Rightarrow A = 0.1236 \text{ secondes d'arc}$$

Et par le critère de Rayleigh (c'est ici une formule simplifiée qui est utilisée : elle donne la limite de résolution directement en secondes d'arc. Elle est très pratique. Voir « Optique » de Hecht, p 237) on peut retrouver le diamètre du miroir :

$$\Rightarrow A = 2.52 \cdot 10^5 \cdot (\lambda/D)$$

$$\Leftrightarrow D = 2.52 \cdot 10^5 \cdot (\lambda/A)$$

$$\Leftrightarrow D = 1.019 \text{ m}$$

On a utilisé ici le seul critère de Rayleigh, qui n'est vraiment valable que pour un instrument optique seulement limité par la diffraction, ce qui est rarement le cas. Grâce à ce raisonnement, on peut au moins être certain que la taille du miroir sera au minimum +/- 1.1m, vu les aberrations probables. Cette estimation devient intéressante dans ce domaine où la technologie devient tellement sensible que les informations ne sont délivrées qu'au compte-gouttes ! En effet, les militaires sont parmi les utilisateurs les plus assidus de l'observation de la terre à très haute résolution. Il ne serait franchement pas étonnant que de nombreux satellites d'observation de l'US Army (pour ne citer qu'elle) atteignent des résolutions plus fines que la vingtaine de centimètres. Une telle résolution, pour une même altitude de 684 km, doit demander un miroir primaire d'au moins 2.089 mètres, à en croire le critère de Rayleigh, ce qui est de la dimension du miroir de Hubble. L'observatoire spatial fut une mission lourde, lancée en 1990 par une navette. Or si l'on suit l'actualité, on peut de temps en temps entendre le départ d'une mission militaire lourde (parfois une navette) au départ de Vandenberg air force base... Et quand on sait que certains satellites militaires descendent parfois à des altitudes de 400 km, on peut comprendre aisément que la limite des 20 cm a depuis déjà longtemps été allègrement atteinte (d'autant que l'armée américaine reçoit chaque année un budget de plus de 400 milliards de dollars !). On peut même spéculer sur l'existence d'une pression des militaires sur les civils dans ce domaine, un effet de retardement de l'avancement des nouvelles technologies...un simple exemple a été les nombreuses protestations de nombreux états lorsque GoogleEarth est apparu sur internet.

On peut néanmoins citer quelques contraintes techniques qui, dans le civil du moins, posent encore problèmes :

- La taille du miroir : celui-ci devient assez encombrant à haute résolution

- La taille des CCD : on n'en a dit qu'un mot, mais des CCD plus petits et plus nombreux permettent une meilleure résolution...mais il paraît difficile de progresser dans cette direction, car on ne peut pas miniaturiser à l'infini les éléments CCD !
- La résolution radiométrique : le nombre de bits disponibles donnant les différents niveaux d'intensité pourrait être augmenté...mais cela implique l'usage de matériaux plus photosensibles pour les CCD (pour accéder à un plus grand nombre d'intensités détectables).
- Les aberrations optiques : l'optique du système répercute infailliblement ses défauts sur son plan focal et donc dans la détection...on a abordé ce thème au cours, avec toutes les difficultés et les compromis que l'on rencontre !

Conclusion

En conclusion de ce travail, après avoir situé le niveau technologique actuel, on a pu comprendre que, si toutes les contraintes ne sont pas toujours de l'ordre scientifique, il en demeure encore quelques-unes pour le développement de la résolution (notamment spectrale) dans le futur immédiat. On peut donc être optimiste sur les capacités des humains à atteindre ces résolutions d'ici quelques années, si ça ne l'est pas déjà réalisé !

Sources :

- Photonics août 2006, octobre 2007
- « Optique », Eugène Hecht, Pearson Education
- http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_f.php
- <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/geoeye-1.html>
- <http://www.satimagingcorp.com/characterization-of-satellite-remote-sensing-systems.html>
- <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/spot-5.html>
- http://en.wikipedia.org/wiki/SPOT_%28satellites%29
- <http://en.wikipedia.org/wiki/WorldView-1>
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Landsat>
- <http://www.digitalglobe.com/about/worldview1.html>

et beaucoup d'autres...