

Chapitre X¹

Qualité des données matricielles

1. Introduction

La qualité des données matricielles mesure l'aptitude de chaque pixel à fournir une information spectrale ou thématique fiable et à une position connue sur la Terre.

Cette qualité est la condition nécessaire ouvrant la possibilité de:

- traiter de larges étendues en assemblant « sans raccords » des données acquises à différentes périodes (mosaïques, synthèses);
- suivre l'évolution des mesures géophysiques au cours du temps (analyse multi-temporelle);
- fusionner les données acquises par différents instruments pour en dériver de nouvelles informations thématiques avec une précision accrue.

La qualification des données matricielles s'exerce dans deux domaines distincts :

- la qualification géométrique et
- la qualification radiométrique.

Les activités liées à chacun de ces domaines font appel à des méthodes différentes et sont en général réalisées par des experts ayant des connaissances distinctes : - de cartographie et de géodésie pour les premiers, - de physique du rayonnement et des connaissances plus thématiques pour les seconds.

¹ Chapitre rédigé par Serge RIAZANOFF pour la partie « Qualité géométrique » et Richard SANTER pour la partie « Qualité radiométrique ».

Pour permettre de qualifier la radiométrie, par exemple par des techniques d'étalonnage fondées sur des mesures d'un autre instrument, il est nécessaire de préalablement « géo-localiser » (on dit parfois aussi « co-localiser ») les données d'observation de la Terre. C'est la raison pour laquelle la qualification géométrique des données d'un instrument doit être réalisée avant sa qualification radiométrique.

2. Qualité géométrique

Les traitements géométriques opérés sur une image visent à transformer celle-ci pour la mettre en conformité avec une représentation cartographique. On parle alors de *spatiocarte*.



Figure X.1. *Vue aérienne orthorectifiée superposée à une carte (Courtoisie TTI Productions).*

De nombreux facteurs influent sur la qualité de l'image obtenue et qui sont présentés dans cette section.

Après avoir fixé le cadre théorique en fournissant quelques définitions, on illustrera quelques-uns des défauts géométriques les plus usuels, pour terminer par la présentation des deux méthodes les plus utilisées pour le contrôle de la qualité géométrique des images.

2.1. Référentiel image et modélisation de la prise de vue

2.1.1. Référentiel image en trame carrée

Une image est constituée de m lignes, chacune comprenant n points (ou pixels) et est généralement stockée dans un ou plusieurs fichiers dont le premier point coïncide avec le coin supérieur gauche de l'image. Afin de respecter cette contrainte et pour pouvoir manipuler une base directe dans les opérations mathématiques, il est recommandé d'utiliser un repère cartésien donnant d'abord la coordonnée l en ligne (voir figure X.2).

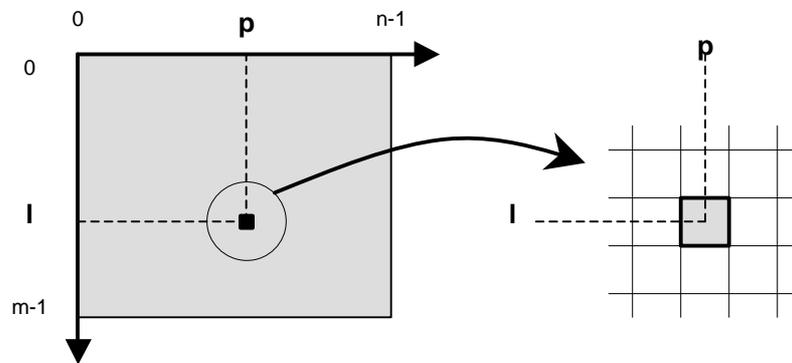


Figure X.2. Référentiel image et maille élémentaire.

Le point (l,p) de l'image a une emprise sur la surface de la Terre qu'on représente par un carré. Cette emprise forme une maille élémentaire qui pour les images géocodées (voir définition en section suivante) peut être représentée sur la surface terrestre et dont on peut donner les coordonnées géodétiques. L'usage est davantage de considérer ces coordonnées au centre de la maille. Cependant, certaines images géocodées considèrent que les coordonnées d'un pixel correspondent au lieu géodétique du coin supérieur gauche de la maille élémentaire.

Toute incertitude sur la position dans la maille (centre ou coin) des coordonnées géodétiques d'un point peut conduire à une erreur systématique de 0,5 pixels dans les deux dimensions (soit $\sqrt{2}/2$ pixels au total).

Notons enfin que cette représentation d'une emprise carrée est par nature abusive puisque la radiométrie mesurée en un point correspond à l'intégration des énergies rétro-diffusées sur une surface (appelée « tâche image ») à peu près jamais assimilable à un carré (voir figure X.3).

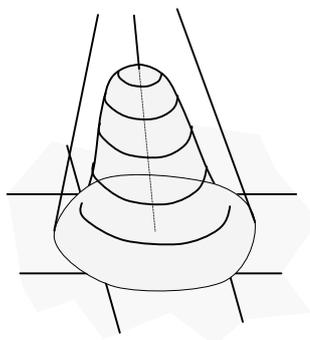


Figure X.3. Tâche image et maille élémentaire.

2.1.2. Localisation directe et localisation inverse

Modéliser la géométrie d'une image d'observation de la Terre revient à définir une relation entre tout point (l,p) de l'image et ses coordonnées géodétiques (λ,φ) dans un système de coordonnées lié à la Terre².

Pour pouvoir générer ou utiliser une image géoréférencée, il est nécessaire de connaître la *fonction de localisation directe* f (aussi appelée plus généralement *modèle de déformation directe*) et/ou la *fonction de localisation inverse* f^{-1} (modèle de déformation inverse) données sous forme mathématique par les formules génériques ci-dessous.

$$\text{fonction de localisation directe} \quad f(l, p, h, var) = (\mathbf{I}, \mathbf{j}) \quad [\text{X.1}]$$

$$\text{fonction de localisation inverse} \quad f^{-1}(\mathbf{I}, \mathbf{j}, h, var) = (l, p) \quad [\text{X.2}]$$

Où

(l,p) sont les coordonnées du point dans l'image,
 (\mathbf{I}, \mathbf{j}) sont les coordonnées géodétiques de ce point sur la Terre,
 h représente l'altitude au point (l,p) ,
 var sont des variables privées propres au modèle (par exemple les coordonnées du vecteur de visée, la résolution...).

1. Dans ce chapitre, on notera (λ,φ) les coordonnées géodétiques correspondant usuellement au couple (longitude,latitude) sans considérer le cas d'autres systèmes de coordonnées cartographiques (X,Y) tels que par exemple le Lambert ou l'UTM. La conversion entre ses systèmes de coordonnées est réalisée par des formules de changement de projection usuelles dont la description est hors du propos de cet ouvrage.

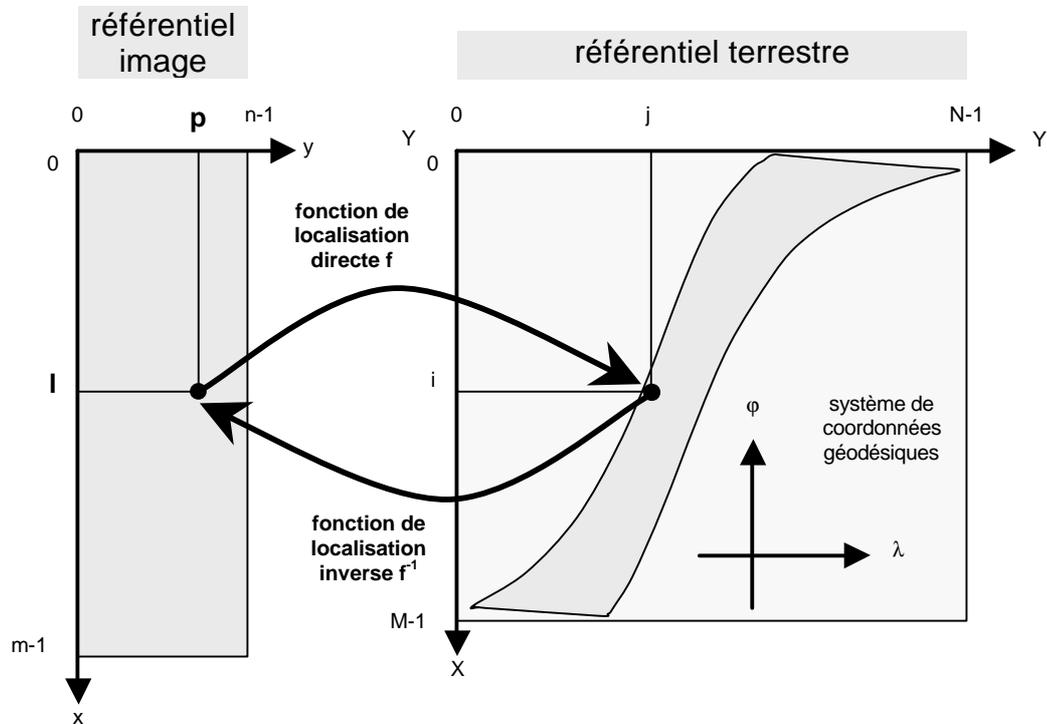


Figure X.4. Référentiel image et référentiel terrestre.

2.1.3. Transformation géométrique des images

Comme vu précédemment, la *fonction de localisation directe* peut être utilisée pour connaître la position du point dans un référentiel terrestre mais peut aussi servir, associée à la *fonction de localisation inverse*, à transformer la géométrie de l'image (on dit aussi *reprojeter*) dans un référentiel terrestre pour produire une spatocarte utilisant une projection classique (voir figure X.4).

La *fonction de localisation directe* permet de projeter les quatre coins (ou si la forme projetée est complexe comme illustrée dans la figure X.4, tous les points du contour) de l'image origine pour connaître les dimensions et la position terrestre (emprise au sol) de l'image destination.

La *fonction de localisation inverse* joue un rôle fondamental dans la reprojektion d'une image puisqu'elle permet de construire point par point l'image destination en retrouvant pour tout point (i,j) de l'image destination les coordonnées (x,y) de son antécédent dans l'image source.

Les coordonnées (x,y) sont rarement entières et il est donc nécessaire d'interpoler la valeur de la radiométrie $R(i,j)$ qu'on affectera dans l'image destination. Le choix de la méthode d'interpolation (plus proche voisin, bi-linéaire, bi-cubique, sinus cardinal...) est un critère important qui doit être pris en compte dans l'évaluation de la qualité d'une donnée matricielle.

2.1.4. Modèles d'acquisition

2.1.4.1. Numérisation des documents (*scanner*)

Dans les projets traitant l'information géographique, il n'est pas rare d'être amené à numériser (« *scanner* » en empruntant le terme anglais) des documents papiers ou des films. Parce qu'ils sont souvent destinés à être superposés aux images d'observation de la Terre, leur qualité géométrique doit être elle aussi contrôlée.

On distingue essentiellement trois types d'appareils de numérisation :

- numérisation à entraînement – dans laquelle le document est entraîné par des galets pour le faire défiler devant une ou plusieurs barrette(s) de CCDs (« *Charged Coupled Devices* » en anglais ou « *Détecteurs à Transfert de Charges* » en français) ;

- numérisation à plat – dans laquelle le document est posé à plat alors que la barrette de CCDs se déplace pour « balayer » le document ;

- numérisation sur tambour – où le document est fixé sur un tambour défilant devant un laser et des CCDs.

Ces trois technologies permettent de traiter des documents de différentes tailles, parviennent à des résolutions variables, et produisent des images numériques de qualités très différentes. Les *scanners à tambour* sont de loin les dispositifs permettant d'atteindre la plus haute résolution avec une qualité géométrique élevée mais sont onéreux. Les *scanners à entraînements* peuvent traiter des documents de grande taille, sont bon marché, mais produisent souvent des déformations dues à la friction des galets (voir un exemple en section 1.2.2.7). Enfin, les *scanners à plat*, sauf à être très onéreux, ne peuvent que traiter des documents de petite taille (A4 ou A3).

2.1.4.2. Modèles de prise de vues

On distingue au moins quatre grands types de prise de vue aéroportées (voir figure X.5).

- prise de vue conique – correspondant à une photographie instantanée de la surface terrestre (ce mode est celui de la plupart des clichés pris d'avion) ;

- prise de vue en peigne (« push-broom ») – pour laquelle une ligne de terrain perpendiculaire à l’axe du vol est vue à une fréquence d’échantillonnage constante (exemple SPOT) ;
- prise de vue à balayage (« scanner »)– au cours de laquelle une barrette de CCDs oscillante balaye le terrain de part et d’autre de la ligne de vol (exemple Landsat TM) ;
- prise de vue Radar – analysant le temps de retour et la phase d’un signal émis d’un côté de la ligne de vol.

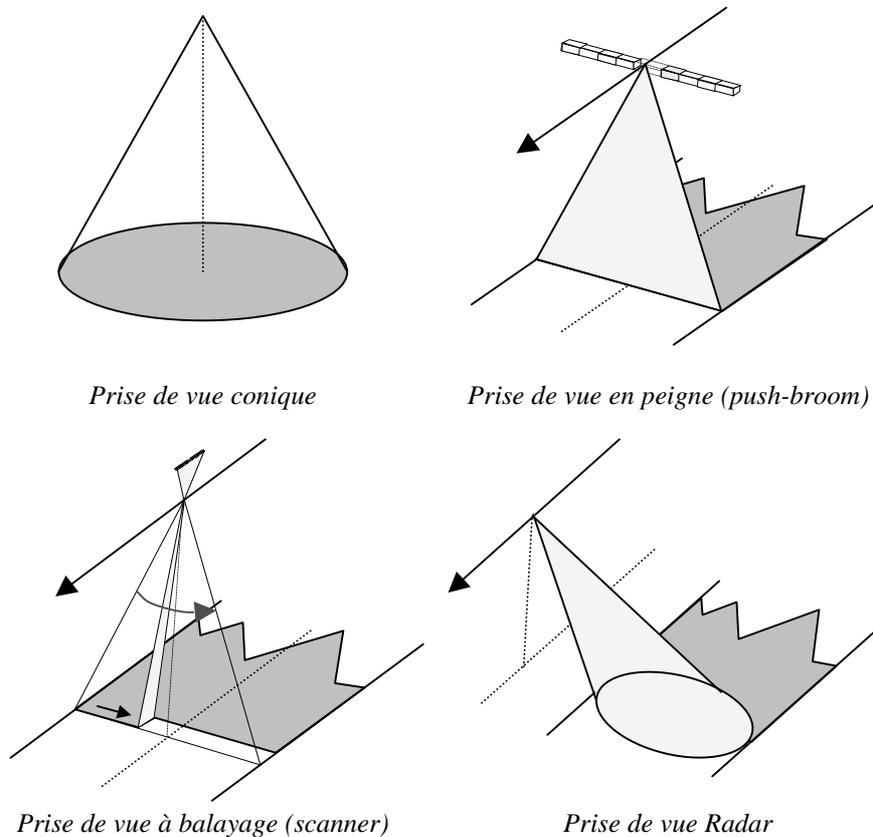


Figure X.5. Principales méthodes de prises de vues aéroportées.

Ces quatre types d’acquisition ne sont en rien exhaustifs. D’autres techniques existent souvent plus complexes tels que le scanner de type « balayage TV » des satellites Météosat ou le « scanner conique » de l’instrument ATSR des satellites ERS et Envisat...

Chacune de ces techniques engendre des défauts géométriques qui lui sont propres présentés en section 1.2.3.

Les fonctions de localisation directe ou inverse peuvent être complexes. Elles découlent d'un modèle de prise de vue faisant intervenir la position de la plateforme, son attitude instantanée (c'est à dire son orientation), la géométrie de l'instrument, une représentation de la Terre incluant éventuellement un modèle numérique de terrain.

La figure X.6 illustre par exemple un des référentiels utilisés pour la modélisation de l'acquisition de l'instrument HRV du satellite SPOT [RIA 02].

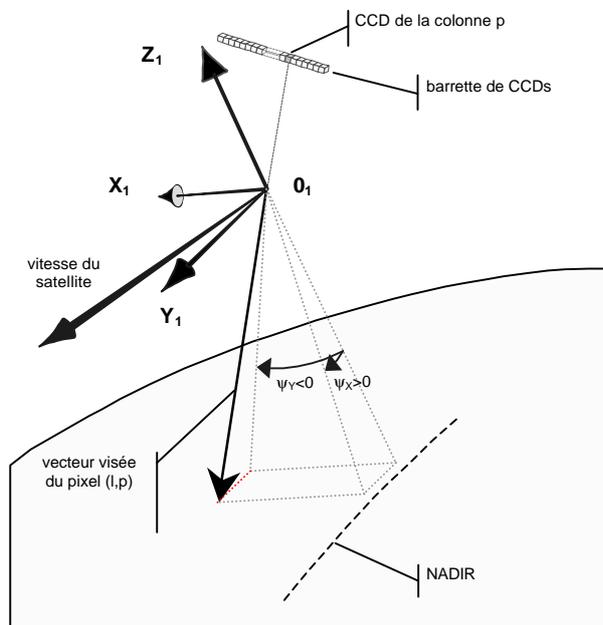


Figure X.6. Vecteur de visée dans le « Repère à piloter » du satellite SPOT.

2.2. Définitions

On peut noter une grande confusion dans le sens des termes désignant les activités liées au traitement des images et surtout au contrôle de leur qualité. L'emprunt de termes anglophones a rajouté à cette confusion. Sans prétendre à l'exhaustivité, les définitions présentées dans cette section constituent une tentative de clarification en complément des définitions fournies dans le dictionnaire [CON 97].

2.2.1. Image géoréférencée

On appelle *image géoréférencée* une image dans laquelle pour tout point (l,p), les coordonnées géodétiques (λ, ϕ) ou les coordonnées cartographiques (X,Y) sont fournies par une formule analytique ou un automate (programme) aussi complexe soit il (cas de l'image SPOT niveau 1A ci-contre).



La fonction de localisation directe (eq. X.1) assume ce rôle ; mais il peut exister plusieurs fonctions de localisation pour une même image. Par exemple, on trouvera dans les données auxiliaires des scènes SPOT les coefficients d'un polynôme approximant cette fonction de localisation. (cas de l'image SPOT niveau 1B ci-contre)

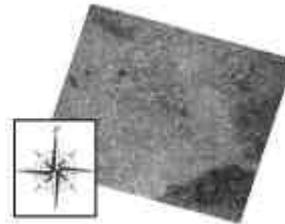


2.2.2. Image géocodée

On appelle *image géocodée* une image pour laquelle il existe une fonction de localisation directe linéaire donnant les coordonnées géodétiques (λ, ϕ) ou les coordonnées cartographiques (X,Y) pour tout point (l,p) de l'image.

$$\begin{cases} X = X_0 + P_l \times p \\ Y = Y_0 - P_h \times l \end{cases}$$

[X.3]

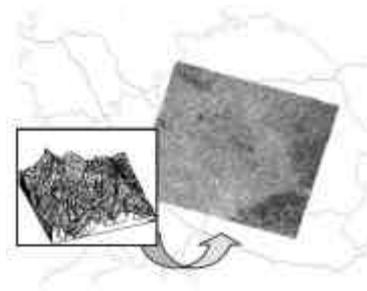


Où

- (l,p) sont les coordonnées du point dans l'image,
- (X,Y) sont les coordonnées cartographiques ou géodétiques ($\mathbf{l, j}$),
- (X_0, Y_0) sont les coordonnées cartographiques du coin supérieur gauche,
- P_l et P_h sont les hauteur et largeur du pixel respectivement.

2.2.3. Image orthorectifiée

On appelle *image orthorectifiée* une image dont les effets de parallaxe dus au relief et au vecteur de visée (effets de perspectives) ont été corrigés. L'orthorectification nécessite l'emploi d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Une image orthorectifiée est une image géocodée de précision cartographique.



2.2.4. Points de contrôle

Un *point de contrôle* est un quadruplet $(l, p, \Lambda, \vartheta)$ dont les coordonnées géodétiques (Λ, ϑ) sont fournies par une référence cartographique externe : -carte, -image géocodée de référence, -levé GPS, -point géodésique... et qui sert à évaluer la précision de localisation de l'image à contrôler.

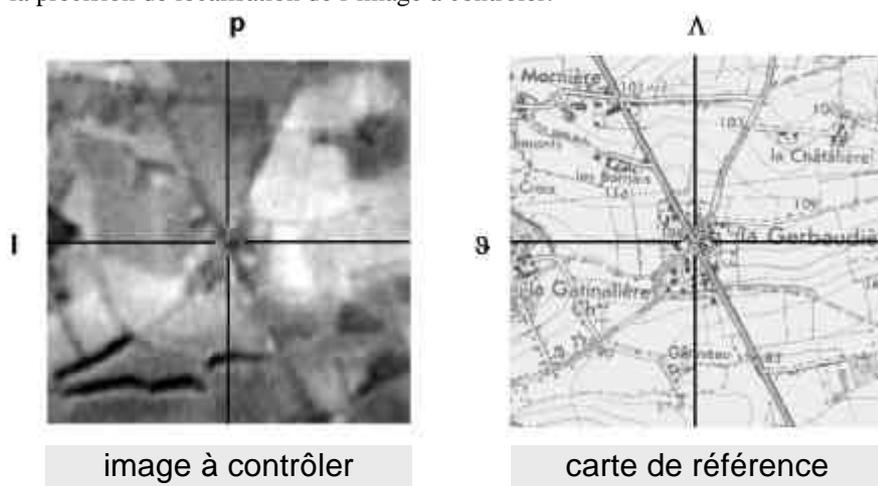


Figure X.7. Point de contrôle pris d'une carte à l'intersection d'une route.

La saisie précise de points de contrôle est un exercice difficile qui dépend de l'échelle des documents, du type des objets rencontrés dans les paysages (par exemple l'intersection d'une route est souvent plus précise qu'une jetée), de la précision de l'outil utilisé pour le pointé, de l'habileté de l'opérateur...

On peut cependant énoncer quelques règles pour le levé de points de contrôle :

- privilégier les intersections d'axes les plus perpendiculaires possible (routes, angles de champs, coin des bâtiments...);
- visualiser l'image zoomée et le document de référence à la même échelle;
- répartir les points de contrôle de manière homogène dans l'image à contrôler;
- dans les zones montagneuses, lever des points aussi bien dans les vallées que dans les zones élevées (crêtes, cols);

2.2.5. Points d'appui

Les *points d'appui* (on dit aussi *points de calage*) sont des quadruplets $(l, p, \Lambda, \vartheta)$ levés comme les points de contrôle mais qui servent à caler la fonction de localisation directe en résolvant des incertitudes liées aux inconnues de son modèle.

Par exemple si la position (X_s, Y_s, Z_s) de la plate-forme n'est pas connue au moment de la prise de vue, au moins trois points d'appui seront nécessaires pour interpoler cette position par des techniques dites de *triangulation*. En utilisant la méthode de minimisation de l'erreur quadratique moyenne, on peut raffiner la valeur de cette position à partir d'un plus grand nombre de points d'appui.

Sans doute à cause de l'ambiguïté anglophone pour laquelle le mot « control » signifie à la fois évaluer la qualité et piloter le modèle, on constate une grande confusion entre les points de contrôle et les points d'appui.

2.2.6. Erreur de localisation

L'*erreur de localisation* d'un point est la distance entre la position géodétique (λ, φ) fournie par le modèle de localisation directe (eq. X.1) et la position (Λ, ϑ) observée dans le levé du point de contrôle.

$$e = \text{dist}[(\mathbf{I}, \mathbf{j}), (\Lambda, \mathbf{q})] \quad [\text{X.4}]$$

Où

dist est une fonction distance qu'on définira : distance euclidienne ou distance géodésique...

2.2.7. Erreur quadratique moyenne

L'*erreur quadratique moyenne* est la moyenne des erreurs de localisation.

$$eqm = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{dist}[(\mathbf{I}_i, \mathbf{j}_i), (\Lambda_i, \mathbf{q}_i)]^2} \quad [\text{X.5}]$$

Où

n est le nombre de points de contrôle,

e_i est l'erreur de localisation du point i ($i=1..n$),

$(\mathbf{I}_i, \mathbf{j}_i)$ est la position géodétique calculée par la fonction de localisation directe pour le point i ($i=1..n$),

$(\mathbf{L}_i, \mathbf{J}_i)$ est la position géodétique fournie par le document cartographique de référence pour le point i ($i=1..n$),

dist est une fonction distance qu'on fixera : distance euclidienne ou distance géodésique...

2.2.8. Champ des vecteurs d'erreur

Le vecteur erreur pour un point de contrôle i relie la position $(I_j i)$ prédite par la fonction de localisation directe (et donc entachée d'erreur) à la position $(L_i J_i)$ donnée par le document de référence (et qui est supposée être la position juste).

$$\vec{v}_i = \begin{pmatrix} \Delta_i - I_i \\ \mathbf{q}_i - \mathbf{j}_i \end{pmatrix} \quad [\text{X.6}]$$

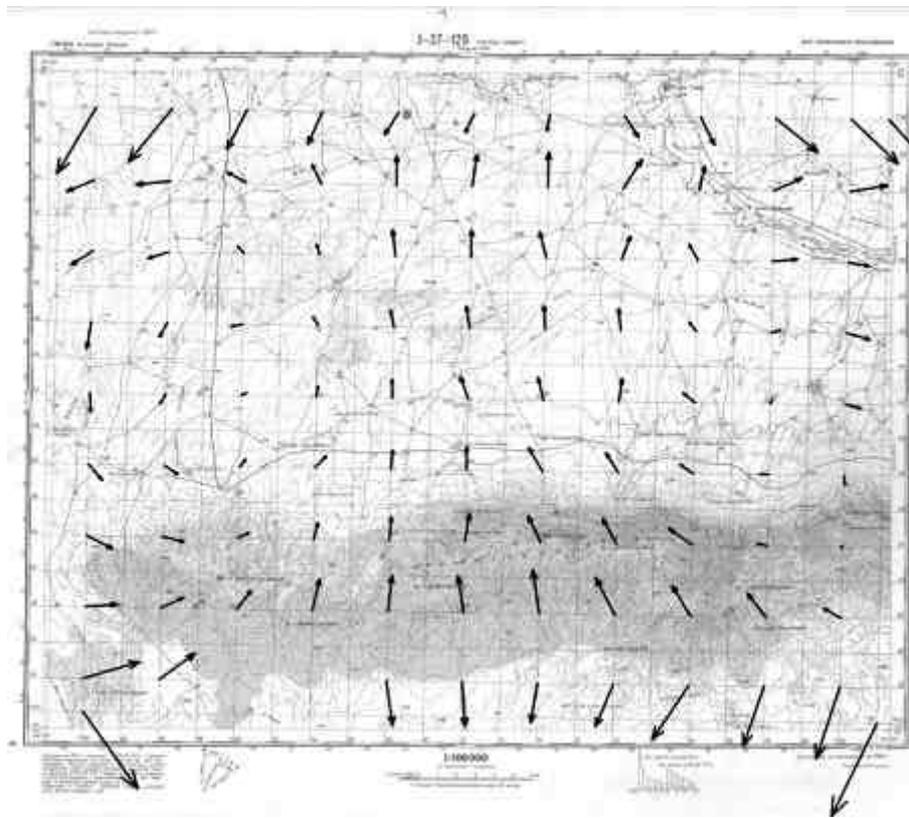


Figure X.8. Champ des vecteurs d'erreur d'une carte scannée.

La visualisation du champ des vecteurs d'erreur fournit un excellent moyen de comprendre les défauts de la fonction de localisation. Par exemple, la figure X.8 illustre le cas d'une carte numérisée sur un scanner à entraînement et dont les galets ont provoqué des extensions / compressions du papier.

2.2.9. Projection native d'une carte

La *projection native d'une carte* est le système de coordonnées de référence utilisé pour sa génération. Les axes X et Y de la projection native sont strictement parallèles aux bords de la carte et les graduations espacées d'un intervalle constant.

Une carte peut présenter les grilles, amorces ou croisillons correspondant à une autre projection, voire à plusieurs autres projections.

Lorsqu'une carte est scannée et qu'on désire la géocoder, il est recommandé de lever un nombre significatif de points d'appui (voir par exemple la figure X.8) régulièrement espacés et distribués dans l'image puis de la transformer dans sa projection native en utilisant une interpolation polynomiale de degré 2 ou 3 (les degrés trop élevés peuvent produire des oscillations).

2.3. Quelques défauts de géométrie

2.3.1. Défaut de localisation absolue

La moyenne algébrique des composantes en latitude et longitude permet de détecter une translation entre la position (I_j, j) prédite par la fonction de localisation et la position (L_i, J_i) observée à partir des documents cartographiques de référence.

$$\begin{cases} \bar{m}_i &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Lambda_i - I_i) \\ \bar{m}_j &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - j_i) \end{cases} \quad [X.7]$$

Ce vecteur (m_λ, m_ϕ) mesure l'*erreur de localisation absolue*.

Pour les images acquises par les satellites à défilement, ce défaut est généralement dû à des erreurs dans la valeur des éphémérides (position et vitesse) de la plate forme et surtout dans leur datation.

La figure ci-contre illustre par exemple la position d'une scène SPOT acquise en visée latérale et la projection sur la Terre des 8 données d'éphémérides contenues dans l'en-tête du produit. Une erreur de datation de ces données conduirait à déplacer la position de la scène SPOT parallèlement à son NADIR.

Cette erreur peut facilement être corrigée en ajoutant les valeurs m_λ et m_ϕ aux coordonnées du



coin supérieur gauche généralement gardé en données auxiliaires d'une image géocodée dans à peu près tous les Systèmes d'Information Géographiques (SIG).

2.3.2. Défauts globaux de géométrie interne

L'analyse de la direction des vecteurs d'erreur permet rapidement de détecter les déformations globales (on dit aussi déformations à basse fréquence) d'une image.

L'erreur de localisation absolue vue en section précédente est elle-même une déformation globale dans laquelle les vecteurs d'erreurs sont à peu près parallèles (figure X.9.a).

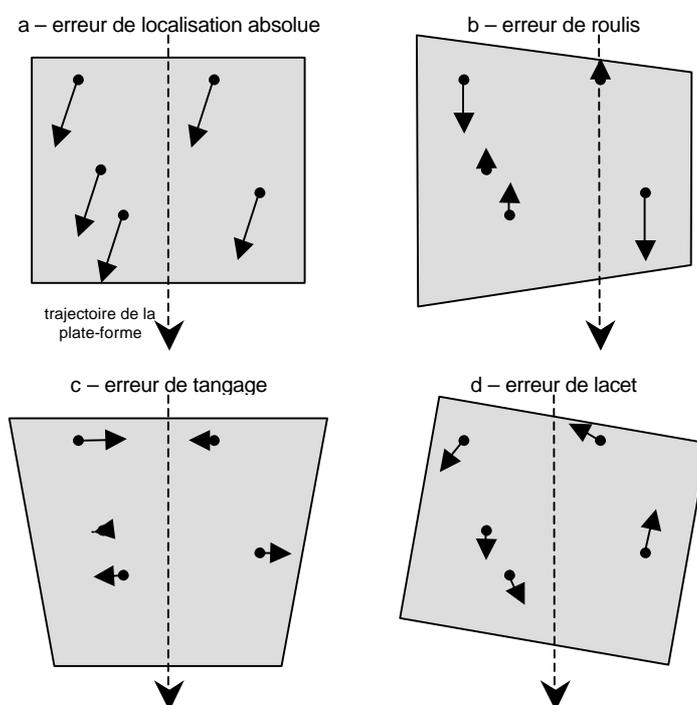


Figure X.9. Quelques défauts globaux de géométrie interne.

Les défauts de roulis (b), tangage (c) et lacet (d) sont dus à des imprécisions dans l'attitude de la plate-forme (avion ou satellite) et donc à la direction de visée intersectant la Terre. Les erreurs de roulis ou tangage produisent un effet de perspective de l'image alors qu'une erreur de lacet produit une rotation de l'image.

Dans les terrains peu accidentés, ces défauts peuvent être corrigés individuellement et très localement par des formes polynomiales de degré faibles.

Dans tous les autres cas, une orthorectification de précision doit intégrer les données d'éphémérides (position et vitesse) de la plate-forme ainsi que ses données d'attitude (angles de roulis, tangage et lacet autour d'un repère lié à la plate-forme). Ces données doivent être datées pour être mises en relation avec le temps de ligne image (cas des prises de vue en peigne ou à balayage) ou avec le temps de prise de vue instantanée (cas de prise de vue conique).

2.3.3. Défauts locaux de géométrie interne

Les défauts locaux de géométrie interne (on dit aussi déformations à haute fréquence) peuvent avoir des causes très diverses. Citons les plus classiques d'entre elles.

2.3.3.1. Précision du MNE

Lorsqu'une image est orthorectifiée, elle doit être corrigée des erreurs de parallaxe (voir figure X.10) qui combinent les effets de l'élévation α du vecteur de visée avec l'élévation h du terrain.

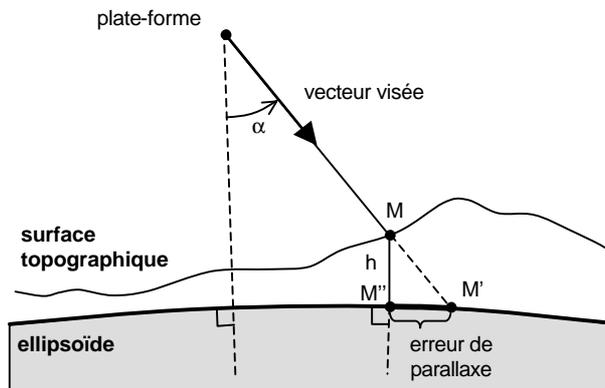


Figure X.10. Erreur de parallaxe.

En toute rigueur, l'erreur de parallaxe est la distance géodésique (M', M''), mesurée le long de l'ellipsoïde, entre la projection verticale M'' du point M sur l'ellipsoïde et l'intersection M' du vecteur de visée avec l'ellipsoïde. Cette erreur peut néanmoins être approximée par la simple formule suivante :

$$\overline{M' M''} = h \times \tan(\alpha) \quad [X.8]$$

Pour être cohérent, le modèle de prise de vue et le modèle numérique d'élévation (MNE) doivent faire référence à une même représentation terrestre. On utilise généralement l'ellipsoïde WGS84. En particulier le modèle numérique d'élévation doit contenir les élévations par rapport à l'ellipsoïde et non des altitudes par rapport au géoïde qui peut s'écarter jusqu'à 200 mètres de l'ellipsoïde WGS84.

La qualité d'un Modèle Numérique d'Élévation est donnée par deux grandeurs :

- *résolution planimétrique* – qui mesure la distance au sol entre deux valeurs d'élévation consécutives ;
- *résolution altimétrique* – qui fournit la précision verticale de la mesure d'élévation (généralement donnée en mètres ou déci-mètres).

Lorsque la direction des vecteurs d'erreurs dans une image orthorectifiée dépend de l'altitude des points de contrôle (voir figure X.11), ces défauts locaux de géométrie interne peuvent être imputables à la précision du MNE utilisé, à une erreur dans sa position géographique ou encore à la méthode d'interpolation des altitudes employée.



Figure X.11. Défauts de correction des parallaxes en zone montagneuse.

2.3.3.2. Défauts liés à l'instrument

Instruments en peigne (« push-broom »)

L'alignement des CCDs sur la barrette, ou l'alignement des barrettes entre elles sont rigoureusement contrôlés en laboratoire avant le vol. Les angles de visée de

chaque CCD sont fournis aux centres de traitement pour servir dans les modèles de prise de vue et élaborer les produits distribués aux utilisateurs. Pour les produits SPOT au format DIMAP par exemple, ces angles de visées sont présents en données auxiliaires.

Suite au lancement ou par le simple fait du vieillissement, on peut observer des écarts dans les valeurs de ces angles de visées par rapport aux valeurs avant col. Ces variations sont très complexes à mesurer pour corriger le modèle de prise de vue.

La figure X.12 montre par exemple un défaut d'alignement des pixels dans un produit à large champ détecté par analyse de disparité avec une image de référence.

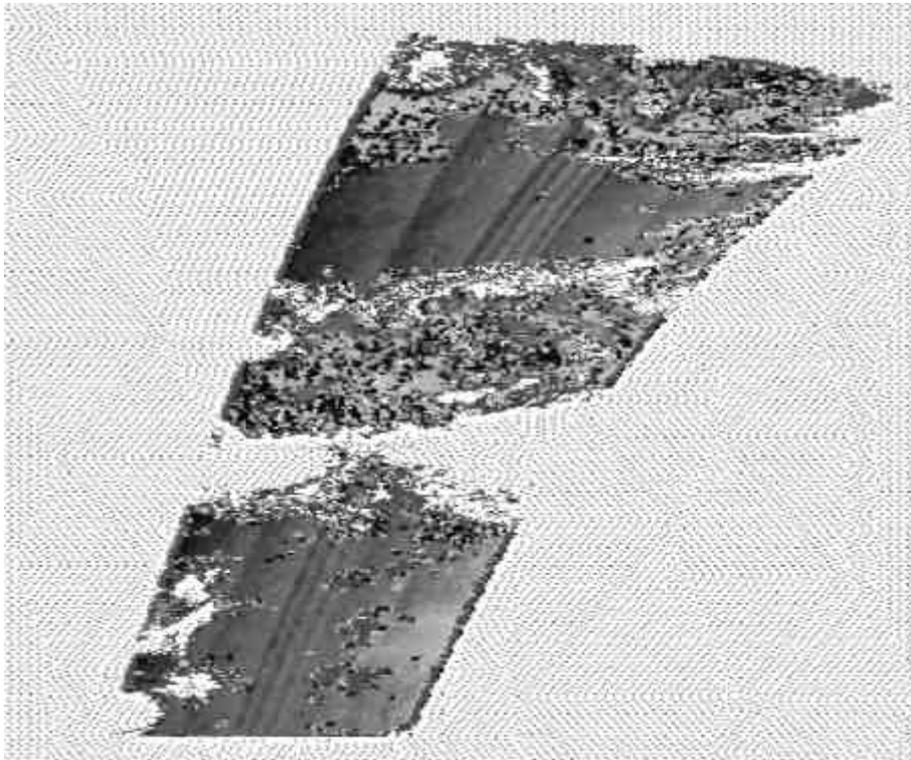


Figure X.12. Défaut d'alignement des pixels d'un segment à large champ.

Instruments à balayage (« scanner »)

L'acquisition par un instrument à balayage (par exemple Landsat TM ou ETM+) est réalisée par une série de fauchées (« scan » ou « swath ») qui sont rectifiées individuellement par des miroirs correcteurs latéraux, interpolés par des formules

polynomiales ajustées sur trois dates mesurées par des cellules puis assemblées pour former l'image.

Des erreurs dans la mesure de l'une des trois dates de passage du miroir oscillant devant les cellules peuvent produire le décalage d'une ou plusieurs fauchées par rapport aux précédentes (voir exemple donné par la figure X.13).

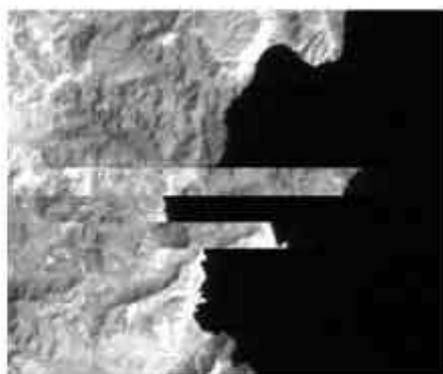
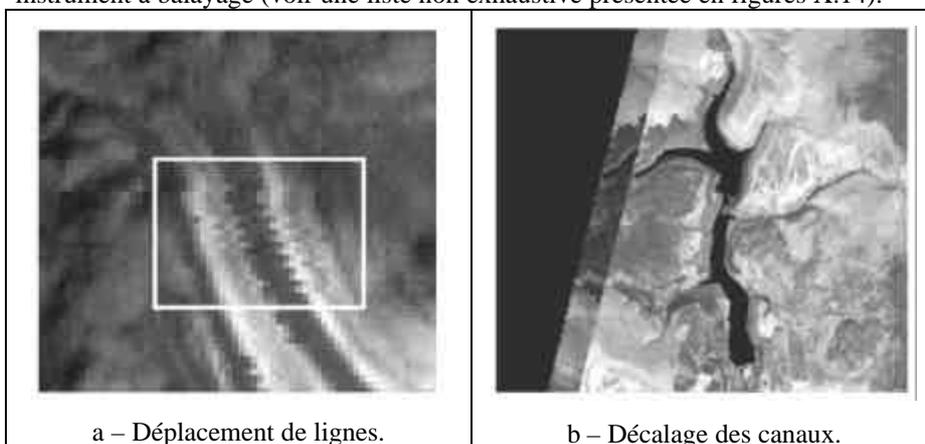


Figure X.13. Décalage de fauchées dans une image Landsat TM
(Courtoisie GAEL Consultant).

D'autres erreurs de géométrie ont été observées dans les images acquises par un instrument à balayage (voir une liste non exhaustive présentée en figures X.14).



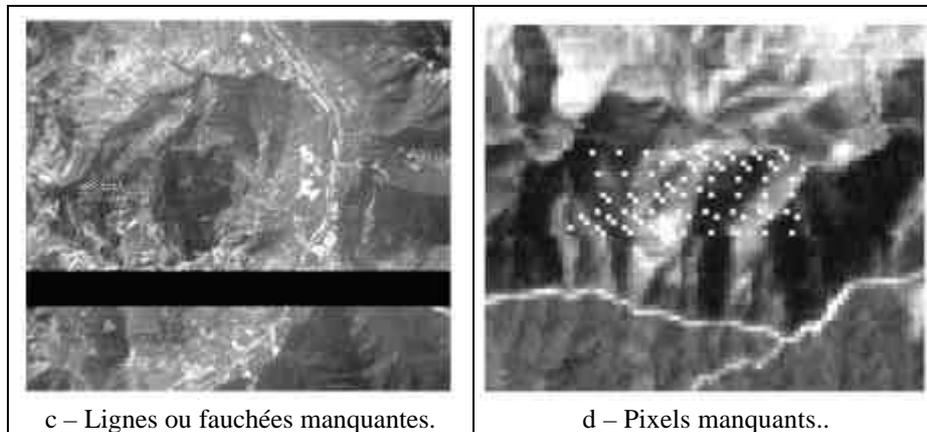


Figure X.14. Quelques défauts observés dans les images Landsat TM
(Courtoisie GAEL Consultant).

2.4. Contrôle de localisation et modèles globaux

Le contrôle de la localisation absolue (§1.2.3.1), les défauts globaux (§1.2.3.2) ou les défauts ayant une amplitude au moins supérieure à un pixel peuvent être mesurés par une application permettant de saisir des points de contrôle (§1.2.2.4) et calculant :

- l'erreur quadratique moyenne des erreurs de localisation (eq. X.5).
- la moyenne arithmétique des erreurs de localisation (eq. X.7).

Pour être significatives, les statistiques doivent s'appuyer sur au moins 20 points de contrôles régulièrement répartis dans l'image et en utilisant des documents de référence cartographique de qualité et dont la précision de localisation est elle-même connue.

2.5. Contrôle de la géométrie interne

Les contrôles de géométrie interne doivent pouvoir détecter des erreurs de dimension sub-pixelaire. C'est par exemple le cas de l'évaluation des angles de visée des CCD en vérifiant que leurs intersections avec un plan tangent à la Terre sont réparties sur une grille régulière.

L'une des méthodes les plus utilisées est *l'analyse de disparités* dans laquelle on cherche à apparier les points (ou un sous-ensemble de points régulièrement espacés) de l'image à contrôler avec leurs homologues dans une image de référence.

Cette mise en correspondance est généralement réalisée par corrélation de deux imagerie (une dans l'image à contrôler et l'autre dans l'image de référence) dont l'une est déplacée dans une fenêtre d'exploration pour trouver la valeur de déplacement (dx,dy) pour laquelle l'indice de corrélation est le plus élevé.

L'analyse de disparité produit deux images : -une image des déplacements verticaux (dx) et -une image des déplacements horizontaux (dy), voir une troisième image correspondant à l'indice de confiance des appariements.

La figure X.15 montre par exemple les résultats d'une analyse de disparités réalisée entre une scène Landsat ETM+ orthorectifiée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et la même scène orthorectifiée à partir d'un autre MNT.

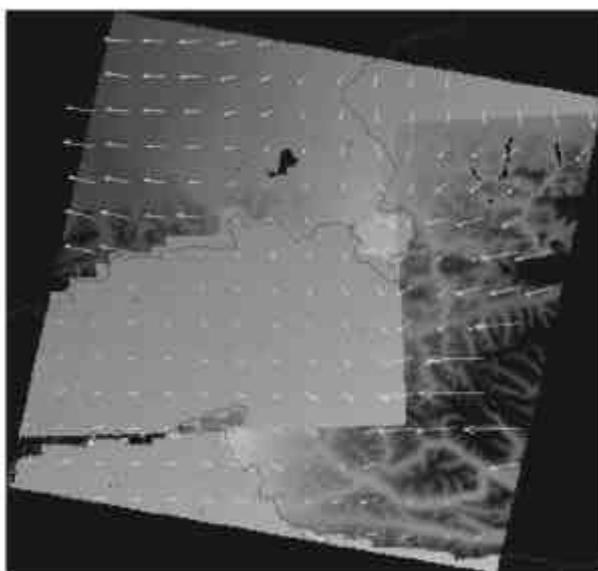


Figure X.15. Résultats de l'analyse de disparités d'image Landsat ETM+ (Courtoisie GAEL Consultant).

Comme on peut l'observer, l'analyse de disparités fournit des résultats fins permettant de retrouver la limite des MNTs utilisés et même le relief (ou plutôt « l'anti-relief ») dans les zones où un seul MNT a été utilisé.

3. Qualité radiométrique

3.1 Grandeurs radiométriques

On se limite ici aux grandeurs optiques mesurées dans le spectre solaire. Le domaine thermique, pour lequel on parle de température apparente, est exclu. Le flux énergétique ϕ correspond à une énergie émise, reçue ou transportée par unité de temps et s'exprime donc en Watts. On définit ensuite la densité de flux énergétique F (ou flux net) comme un flux d'énergie traversant un élément de surface élémentaire.

$$F = \frac{d\mathbf{f}}{d\Sigma} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad [\text{X.9}]$$

La luminance énergétique correspond au flux énergétique traversant une surface élémentaire $d\Sigma$, suivant une direction θ par rapport à la normale à la surface comprise dans un angle solide $d\Omega$, et s'écrit :

$$L = \frac{d^2\mathbf{f}}{d\Omega d\Sigma \cos\theta} \quad (\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}) \quad [\text{X.10}]$$

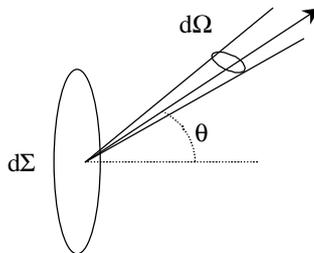


Figure X.16. Flux énergétique traversant une surface.

On parle également de luminance énergétique monochromatique L_λ ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$) :

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad [\text{X.11}]$$

Dans le cadre de capteur satellitaire, en tenant compte de la réponse spectrale des filtres des instruments, il est utile d'introduire la notion de luminance monochromatique équivalente L_{eq} . Si R_λ est la sensibilité spectrale du filtre :

$$L_{eq} = \frac{\int L_l R_l dI}{\int R_l dI} \quad [X.12]$$

On considère un faisceau d'éclairement E_s tombant sur la surface avec un angle θ_s .

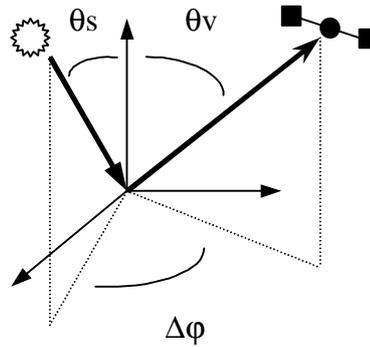


Figure X.17. Trajet des faisceaux incident et réfléchi.

Soit la luminance $L(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi)$, réfléchi par la surface dans une direction donnée, caractérisée par $(\theta_v, \Delta\phi)$ (Figure X.17), la définition de la réflectance bidirectionnelle est :

$$r(\mathbf{q}_s, \mathbf{q}_v, \Delta\mathbf{j}) = \frac{\rho L(\mathbf{q}_s, \mathbf{q}_v, \Delta\mathbf{j})}{\mu_s E_s} \quad [X.13]$$

où μ_s est le cosinus de l'angle zénithal solaire. Si ρ est une constante quelque soit l'angle d'incidence et l'angle de réflexion, alors la surface est un réflecteur lambertien qui réfléchit la même luminance dans toutes les directions. ρ est la grandeur géophysique par excellence. Si la réflectance est non lambertienne, une même cible éclairée et/ou vue dans différentes conditions géométriques ne présente pas la même réflectance. On normalise alors la réflectance observée à celle que l'on

observerait si le soleil était au zénith pour une observation à la verticale. Cette normalisation fait appel à une bibliothèque de données bidirectionnelles, données qui permettent de passer d'une géométrie à une autre. Le choix de la fonction à appliquer se fait, pour des images couleur, sur un indice spectral. Cet indice est quasiment insensible à la directionalité de la cible.

3.2. Inventaire de défauts de radiométrie

On présentera ici les différents facteurs qui altèrent la qualité radiométrique des données en indiquant les méthodes de correction utilisées. Le dernier exemple est plus spécifique des prises de vues aériennes.

3.2.1. Largeur de la « tâche image » - FTM et focalisation de l'instrument optique

Si on schématise l'optique à une simple lentille, un point objet à l'infini ne converge au plan focal image que si la focalisation de l'instrument est parfaite sur toute la surface du détecteur. D'autre part la diffraction transforme la notion de point image en tâche image. Ces deux défauts de radiométrie sont en général bien maîtrisés.

3.2.2. Polarisation de l'instrument

Si l'on tourne un polariseur en observant une scène naturelle, l'intensité de l'image varie. La lumière est polarisée. D'autre part, l'optique d'un instrument polarise elle-même : si l'on regarde une source dont on module l'intensité par un polariseur, l'instrument ne mesure pas la même chose. On connaît la réponse d'un instrument en lumière polarisée. On peut estimer la polarisation des scènes naturelles et effectuer si nécessaire une correction.

3.2.3. Lumière parasite

A l'intérieur d'une optique se produisent des réflexions parasites sur les différentes faces des optiques ou sur les bords du canon optique. Toutes les surfaces sont traitées avec des revêtements anti réfléchissants. Une optique idéale, éclairée par un faisceau de lumière parallèle très fin (faisceau laser), ne reçoit ce faisceau que sur un détecteur élémentaire (pixel). En pratique, on observe une distribution de la lumière sur l'ensemble de l'image. On caractérise la lumière parasite par une fonction (« *Point Spread Function* » ou PSF) qui nous sert par la suite à corriger les images de cet effet. Cette correction est numériquement lourde mais elle est souvent nécessaire si l'on veut obtenir une bonne qualité radiométrique.

3.2.4. Prises de vues aériennes

La prise de vue en géométrie conique des images aériennes induit une inhomogénéité de répartition des densités dans l'image. Cet effet, connu sous le nom de « vignettage » (on rencontre aussi le terme de « vignettisation »), produit en général des coins plus sombres ou parfois une décroissance de la luminosité du centre vers les bords de l'image (voir figure X.18).

Ce défaut est dû à la composition de l'atmosphère (humidité, aérosol, pollution...), à la focale utilisée (la plus grande ouverture d'une focale à 153 mm produit plus de vignettage qu'une focale à 210 mm), à l'altitude de l'avion (au dessous de 500 mètres le phénomène est moins sensible), à la position par rapport à la couche d'inversion à 0°C, à l'attitude de l'avion...

Lors de la prise de vue, il est possible d'utiliser des filtres limitant l'effet de vignettage. Des optiques modernes sont désormais utilisées pour compenser ce défaut.

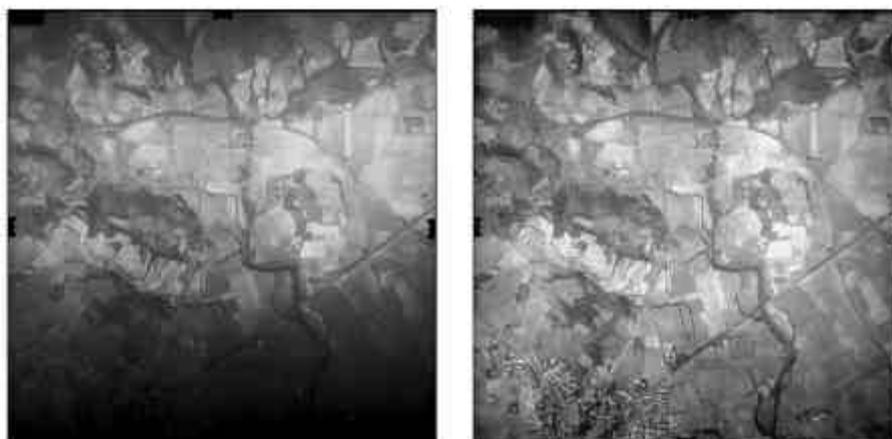


Figure X.18. Vue aérienne brute (gauche) et après traitement du vignettage (droite).
(courtoisie TTI Production, France)

Nombre de logiciels permettent de corriger le défaut de vignettage. Une des techniques les plus utilisées consiste à réaliser des statistiques de luminosité par ligne et par colonne et à interpoler une fonction polynomiale de correction de la luminosité de l'image pour l'aligner sur cette observée au centre de l'image (voir figure X.18).

3.3. Etalonnage des données radiométriques

3.3.1. Etalonnage radiométrique

Un capteur reçoit une énergie (en Joule) et après traitement électronique et conversion numérique, on dispose de comptes numériques CN. Même en absence de signal, on mesure des comptes numériques CN_0 qui correspondent au courant d'obscurité. Ce courant d'obscurité est facilement mesurable car il suffit d'occulter l'optique de l'instrument ou, quand cela n'est pas possible de viser le noir (par exemple la nuit au-dessus des déserts).

L'étalonnage consiste à associer les CN avec la grandeur énergétique désirée. Pour ce faire, on mesure les CN dans des conditions où on peut prédire le signal mesuré. Ces conditions peuvent être obtenues en laboratoire, en vol à partir d'un dispositif embarqué ou encore sur des cibles dont on connaît les caractéristiques optiques (étalonnage vicarie, « *vicarious calibration* » en anglais).

3.3.1.1. Etalonnage en laboratoire

On dispose d'une source d'étalonnage (lampe standard, alimentée suivant un courant stabilisé, d'une durée de stabilité connue) dont on connaît parfaitement l'éclairement monochromatique ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$) à une distance donnée (en général 1 mètre). On transforme ensuite cet éclairement en luminance. Deux dispositifs sont utilisés :

- (i) on équipe une sphère revêtue d'un matériau parfaitement réfléchissant d'une ou de plusieurs lampes standard et l'instrument optique, placée devant une ouverture aussi petite que possible, reçoit la lumière après des réflexions multiples dans la sphère. Plus la sphère est grande et meilleur sera le résultat car le trou percé pour voir à l'intérieur devient relativement moins important.
- (ii) on éclaire un panneau blanc quasi Lambertien (dont on connaît parfaitement les propriétés directionnelles pour une correction de second ordre) à une distance bien connue (afin de connaître parfaitement l'éclairement incident) avec notre lampe standard et on mesure alors la luminance réfléchie. Cet étalonnage en laboratoire présente l'avantage d'être bien contrôlé et d'être répétable. Il est moins précis dans le bleu-violet car les lampes standard présentent en général des niveaux d'éclairement faibles sinon très faibles. Si les procédures d'étalonnage sont bien respectées, on peut espérer obtenir une précision relative absolue de 1% à 2%.

3.3.1.2. Etalonnage à bord

L'étalonnage laboratoire est le standard pour les instruments aéroportés puisqu'il peut être effectué à demande. Pour les capteurs satellitaires, on a maintenant des dispositifs d'étalonnage embarqués. Le soleil est bien souvent la source. Sa lumière est réfléchie sur un panneau de référence dont la réflectance est connue avec précision.

3.3.1.3. Etalonnage vicair

En absence d'étalonnage bord, ou pour valider ses performances, l'étalonnage vicair se propose d'évaluer le signal d'entrée du capteur. Cette prédiction se fait en général à l'occasion de campagnes de mesures durant lesquelles toutes les composantes du signal sont quantifiées : réflectance de surface, influence de l'atmosphère, ...

3.3.1. Etalonnage spectral

La plupart du temps, on observe une scène dans différentes bandes spectrales qu'il est nécessaire de caractériser en longueur d'onde (pour le moins, la longueur d'onde moyenne du filtre). Cette caractérisation spectrale peut être obtenue en laboratoire par exemple à l'aide d'un monochromateur. Il est techniquement difficile d'embarquer dans l'espace un dispositif de laboratoire. L'utilisation de plus en plus répandue de spectromètre embarqué permet cet étalonnage spectral en regardant des cibles qui présentent des raies d'absorption bien définies. C'est le cas du spectre solaire avec les raies de Fraunhofer. C'est aussi les bandes étroites d'absorption de certains gaz atmosphériques (par exemple l'oxygène à 761 nm). En se recalant sur ces bandes étroites d'absorption, on effectue un étalonnage spectral de l'instrument.

3.4 Correction atmosphérique

Il est difficile dans ce chapitre traitant de la qualité des données radiométriques de ne pas évoquer la nécessaire correction des effets atmosphériques ; effets parasites si l'on s'intéresse à la surface. Ces effets sont particulièrement importants pour les observations au-dessus de l'océan puisque le signal atmosphérique dans le visible représente entre 60% et 80% du signal. Les surfaces terrestres sont plus réfléchissantes que l'eau. Il ne reste pas moins que l'application de corrections atmosphériques est un facteur décisif de qualité des images.

Pour comprendre ce problème, partons d'une formulation simplifiée du signal satellitaire:

$$\mathbf{r}^* = T_g (\mathbf{r}_{atm} + T_{atm}(\mathbf{m}_s) \frac{\mathbf{r}_G}{1 - \mathbf{r}_G S_{atm}} T_{atm}(\mathbf{m}_v)) \quad [\text{X.14}]$$

La transmission gazeuse T_g est associée à l'absorption de l'ozone (bande de Chapuis entre 0.55 μm et 0.7 μm) et on sait facilement la corriger. Dans certains cas les bandes spectrales utilisées évitent l'absorption gazeuse et $T_g=1$.

\mathbf{r}_{atm} , T_{atm} and S_{atm} sont respectivement, pour l'atmosphère, sa réflectance (le signal satellitaire sur un sol parfaitement noir), sa transmittance (l'atténuation de la lumière lors de sa traversée) et son albedo sphérique (la proportion de lumière réfléchi par l'atmosphère vers le sol). L'atmosphère est composée de molécules dont on connaît le nombre (via la connaissance de la pression barométrique) et les propriétés de diffusion (diffusion Rayleigh). Les molécules diffusent surtout dans le bleu (d'où le bleu du ciel). On a aussi des aérosols dont la variabilité spatio temporelle est grande. On est donc amené à les connaître au moment de la prise de vue. C'est pour cela que des bandes spectrales sont destinées à la seule connaissance des aérosols. Ces bandes spectrales pour la télédétection des aérosols sont choisies pour minimiser la contribution de la surface. Elles sont en rouge et proche infra rouge pour l'océan qui est noir dans ce domaine spectral. Elles sont en bleu et rouge où dessus des terres car la végétation y est sombre (absorption dans le bleu et dans le rouge des pigments chlorophylliens pour la photosynthèse). Une fois les aérosols identifiés, on introduit leurs propriétés de diffusion dans les routines de correction atmosphérique.

La correction atmosphérique décrite au-dessus correspond à un sol homogène spatialement et lambertien. Elle améliore notablement la qualité des données et elle est de plus en plus implantée dans le traitement des images. Pour des paysages très colorés avec une résolution spatiale de l'ordre du mètre, la dégradation des contrastes par les effets atmosphériques est plus complexe (effets d'environnement).

4. Bibliographie

[CON 97] CONSEIL INTERNATIONAL DE LA LANGUE FRANCAISE., « Terminologie de Télédétection et Photogrammétrie », *Editions PUF*, Paris ; 1997.

[RIA 02] RIAZANOFF S., « *SPOT123-4-5 Geometry Handbook* », 82 pages; 35 figures; 32 équations ; SPOT IMAGE, Toulouse ; 2002.