

Chapitre 1

Acquisition des images Aspects physiques et instruments

Nous pouvons définir la photogrammétrie comme « toute technique de mesure qui permet de modéliser un espace 3D en utilisant des images 2D ». Bien sûr, c'est le cas lorsque l'on utilise des images photographiques, mais c'est encore le cas quand tout autre type d'acquisition 2D est utilisé, par exemple un radar, ou un appareil à balayage : le processus de photogrammétrie est fondamentalement indépendant du type d'image.

Pour cette raison, nous présenterons dans ce chapitre les aspects physiques généraux de l'acquisition de données en photogrammétrie numérique. Ceci commencera par une présentation des aspects géométriques de la photogrammétrie, ce qui est un problème classique mais dont la présentation est ici légèrement différente de celle des ouvrages traditionnels. On trouvera aussi des considérations au sujet de la réfraction atmosphérique, de la distorsion due aux optiques, et quelques règles pratiques pour organiser des missions aériennes si les images numériques sont utilisées (*cf.* section 1.1). Nous présenterons ensuite quelques impacts radiométriques de l'atmosphère et des optiques sur l'image, pour aider à mieux comprendre la nature physique des images aériennes (*cf.* section 1.2). Quelques lignes sur la colorimétrie seront alors nécessaires pour comprendre pourquoi les outils numériques utilisant des images panchromatiques noir et blanc n'ont aucune raison d'être les mêmes que les outils destinés à des images couleur (*cf.* section 1.3).

Puis nous présenterons les instruments destinés à obtenir les images numériques. En section 1.4 nous considérerons les contraintes géométriques sur

les acquisitions d'images optiques (aériennes et satellite). Les principaux appareils d'acquisition numérique seront ensuite présentés, caméras DTC (« CCD » en anglais) (*cf.* section 1.5), radars (*cf.* section 1.6), télémètres laser aéroportés (*cf.* section 1.7), scanners d'images photographiques (*cf.* section 1.8). Nous concluons ce chapitre par une analyse du problème-clé des relations entre la dimension du pixel et le rapport signal à bruit dans l'image.

1.1. Modèle mathématique de la géométrie de l'image aérienne¹

La géométrie des images est la base de tous les traitements de photogrammétrie, qu'ils soient analogiques, analytiques ou numériques. Bien entendu, la géométrie détaillée d'une image dépend essentiellement des caractéristiques physiques du capteur utilisé. En photogrammétrie analytique (la photogrammétrie numérique ne s'en distingue que par la nature numérique de l'image) la mise en œuvre d'une nouvelle technologie d'acquisition d'image passe donc toujours par une étude complète de ses caractéristiques géométriques et par l'écriture mathématique de la relation liant les coordonnées de l'image à celles du point terrain (et, si le logiciel est bien conçu, cela doit être la seule chose à faire).

On détaillera ici le cas de la photographie conique traditionnelle (que l'image soit argentique ou numérique), qui est encore aujourd'hui le plus courant et qui pourra servir de guide pour l'étude d'un capteur différent. Le principe retenu est d'approcher la géométrie réelle assez complexe par une formule mathématique simple (ici la perspective) et de considérer les écarts entre la réalité physique et cette formule comme des corrections (dites corrections de systématisme) étudiées indépendamment. Les systèmes imageurs dont la géométrie est différente sont présentés plus loin dans ce chapitre (*cf.* sections 1.4 à 1.7).

1.1.1. Perspective mathématique d'un point de l'espace

La perspective d'un point M de l'espace, de centre S sur le plan P est l'intersection m de la droite SM avec le plan P . Les coordonnées de M seront exprimées dans le repère terrain (O, X, Y, Z) , et celle de m dans le repère image (c, x, y, z) . La matrice rotation R correspond au changement de base $(O, X, Y, Z) \rightarrow (c, x, y, z)$. On notera F les coordonnées du sommet S dans le repère image.

1. Cette section a été rédigée par Yves EGELS.

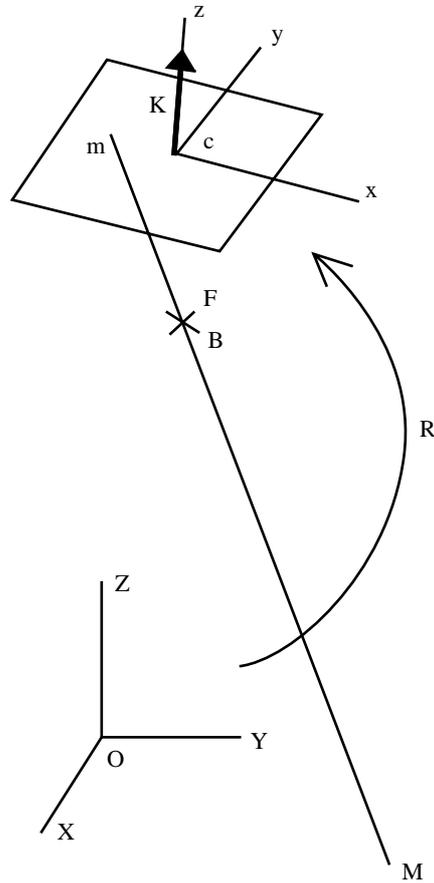


Figure 1.1. Systèmes de coordonnées pour la photogrammétrie

$$M = \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ p \end{pmatrix} \quad m = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$m \text{ image de } M \Leftrightarrow \overrightarrow{Fm} = \lambda \cdot \overrightarrow{SM}$$

Si l'on appelle K le vecteur unitaire orthogonal au plan du cliché, on peut écrire :

$m \in \text{cliché} \Leftrightarrow K^t m = 0$ d'où $\lambda = \frac{-K^t F}{K^t R(M - S)}$ d'où l'équation de base de

la photogrammétrie, dite *équation de colinéarité* :

$$m = F - \frac{K^t FR(M - S)}{K^t R(M - S)} \quad [1.1]$$

Si on le souhaite, cette équation peut être développée et réordonnée en fonction des coordonnées de M, sous la forme dite équation à onze paramètres, dont l'usage peut paraître plus simple, mais qui est en réalité à manier avec beaucoup de précautions :

$$x = \frac{a_1 X_M + b_1 Y_M + c_1 Z_M + d_1}{a_3 X_M + b_3 Y_M + c_3 Z_M + 1} \quad y = \frac{a_2 X_M + b_2 Y_M + c_2 Z_M + d_2}{a_3 X_M + b_3 Y_M + c_3 Z_M + 1} \quad [1.2]$$

1.1.2. Quelques outils mathématiques

1.1.2.1. Représentation des matrices rotation, exponentielle et axiateur

Dans les calculs de photogrammétrie analytique, les matrices rotation apparaissent de façon constante. Sur un espace vectoriel de dimension n, elles dépendent de $\frac{n(n-1)}{2}$ paramètres, mais ne forment pas un sous-espace vectoriel. Il n'existe donc malheureusement pas de formule linéaire liant une matrice rotation à ses « composantes ». Il est cependant indispensable de pouvoir exprimer une telle matrice en fonction de paramètres judicieusement choisis. Dans le cas de R^3 , il est habituel de décomposer la rotation en produit de trois rotations autour des trois axes de coordonnées (les angles ω , ϕ et κ familiers aux photogrammètres). Mais les formules obtenues sont assez laborieuses et sans symétrie, ce qui entraîne un développement inutile des formules.

On pourra définir physiquement une rotation de la manière suivante :

$$\text{Rotation d'angle } \theta \text{ autour d'un vecteur unitaire } \vec{\Omega} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}, \quad (\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} = 1)$$

Nous appellerons axiateur d'un vecteur la matrice du produit vectoriel par ce dernier :

$$\vec{\Omega} \wedge \vec{V} = \tilde{\Omega} V$$

on vérifiera que $\tilde{\Omega} = \begin{pmatrix} 0 & -c & b \\ c & 0 & -a \\ -b & a & 0 \end{pmatrix}$ [1.3]

Il est alors facile de contrôler que la rotation précédente peut s'écrire : $R = e^{\tilde{\Omega}\theta}$. En effet,

$$e^{\tilde{\Omega}\theta} = I + \tilde{\Omega}\theta + \dots + \frac{\tilde{\Omega}^n \theta^n}{n!} + \dots \quad [1.4]$$

donc, puisque $\tilde{\Omega}\Omega = \vec{\Omega} \wedge \vec{\Omega} = 0$ (propriété bien connue du produit vectoriel), $e^{\tilde{\Omega}\theta}\Omega = \Omega \rightarrow \vec{\Omega}$ est bien l'axe de rotation, seul invariant. On vérifiera aisément que $\tilde{\Omega}^3 = -\tilde{\Omega}$, $\tilde{\Omega}^4 = -\tilde{\Omega}^2$ etc. ; d'autre part, $\tilde{\Omega}^t = -\tilde{\Omega}$:

$$\begin{aligned} (e^{\tilde{\Omega}\theta})^t &= I + \tilde{\Omega}^t \theta + \dots + \frac{\tilde{\Omega}^{t^n} \theta^n}{n!} + \dots \\ &= I + \tilde{\Omega}\theta + \dots + (-1)^n \frac{\tilde{\Omega}^n \theta^n}{n!} + \dots \\ &= e^{-\tilde{\Omega}\theta} = (e^{\tilde{\Omega}\theta})^{-1} \end{aligned} \quad [1.5]$$

Cette matrice est donc bien une matrice orthogonale, et de plus, une matrice rotation puisque $\det \mathbf{R} = 1$ (puisque $\tilde{\Omega}^t = -\tilde{\Omega}$). On pourra également vérifier que l'angle de rotation est bien égal à θ , par exemple en calculant le produit scalaire d'un vecteur normal à ζ avec son transformé.

On voit alors que, en regroupant les termes pairs et les termes impairs du développement :

$$R = I + \tilde{\Omega}\theta - \frac{\tilde{\Omega}^2 \theta^2}{2!} + \dots + \frac{\tilde{\Omega}^2 \theta^2}{2!} - \frac{\tilde{\Omega}^2 \theta^4}{4!} + \dots$$

$$\boxed{R = I + \tilde{\Omega} \sin \theta + \tilde{\Omega}^2 (1 - \cos \theta)} \quad (\text{Formule d'Euler}) \quad [1.6]$$

Cette formule permettra un calcul très aisé des rotations. En effet, on peut choisir comme paramètres de la rotation les trois valeurs $a\theta$, $b\theta$ et $c\theta$.

On peut alors écrire :

$$\bar{\Theta} = \bar{\Omega}\theta = \begin{pmatrix} a\theta \\ b\theta \\ c\theta \end{pmatrix} \text{ et réciproquement } \theta = \|\bar{\Theta}\|, \bar{\Omega} = \frac{\bar{\Theta}}{\theta} \quad [1.7]$$

Si l'on exprime $\sin\theta$ et $\cos\theta$ en fonction de $\text{tg}\theta/2$ à l'aide des formules classiques de trigonométrie, il vient :

$$R = (I - \tilde{\Omega} \tan \frac{\theta}{2})^{-1} (I + \tilde{\Omega} \tan \frac{\theta}{2}) \quad \text{Formule de Thomson} \quad [1.8]$$

1.1.2.2. Différentielle d'une matrice rotation

Exprimée sous cette forme exponentielle, il est possible de différencier les matrices rotation :

$$dR \approx e^{\tilde{\Theta}} d\tilde{\Theta} = R d\tilde{\Theta} \quad [1.9]$$

Dans cette expression, la différentielle fait intervenir les paramètres de la rotation sous forme matricielle, ce qui n'est pas très commode. Appliquée à un vecteur, elle peut s'écrire (en tenant compte de l'anticommutativité du produit vectoriel) :

$$dR.A = R.d\tilde{\Theta}.A = -R.\tilde{A}.d\Theta \quad [1.10]$$

1.1.2.3. Relation différentielle liant m aux paramètres de la perspective

L'équation précédente n'est pas linéaire, et pour résoudre les systèmes correspondant à la photogrammétrie analytique (orientation des images, aérotriangulation), il est nécessaire de la linéariser. Les variables que l'on prendra en compte sont F , M , S et R .

Si l'on pose $A = M - S$ et $U = RA$:

$$dm = dF - \frac{K^t dF U}{K^t U} - \left(\frac{K^t F}{K^t U} - \frac{K^t F U K^t}{(K^t U)^2} \right) dU \quad [1.11]$$

$$dU = R(dM - dS) + dRA = r(dM - dS - \tilde{A}d\Theta) \quad [1.12]$$

D'autre part, $K^t F$ étant un scalaire, $K^t F U = U K^t F$ et $K^t dF U = U K^t dF$
On tire alors :

$$dm = \frac{K^t U - U K^t}{(K^t U)^2} [K^t U dF - K^t F R(dM - dS - \tilde{A} d\Theta)] \quad [1.13]$$

Si l'on pose $p = K^t F$, $U = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$ et $V = \begin{pmatrix} u_3 & 0 & -u_1 \\ 0 & u_3 & -u_2 \end{pmatrix}$, on tire en décomposant

les calculs :

$$\begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} = \frac{V}{u_3} dF + \frac{p}{u_3^2} VR(dS - dM) + \frac{p}{u_3^2} VR\tilde{A}d\Theta \quad [1.14]$$

Sous cette forme matricielle, l'implémentation informatique de cette équation ne nécessite que peu de lignes de code...

1.1.3. Géométrie réelle des images

Dans la réalité physique, la géométrie des images ne reproduit que de façon approximative la perspective mathématique dont les formules viennent d'être établies. Si l'on suit le rayon lumineux depuis son point de départ sur le terrain jusqu'à la formation de l'image sur le capteur, on trouvera un certain nombre d'écart entre le modèle perspectif et la réalité. Il est difficile d'être exhaustif dans ce domaine, et on ne citera ici que les principales causes de déformation dont les conséquences sont sensibles dans le processus photogrammétrique.

1.1.3.1. Correction de courbure de terre

La cause première de ce que les photogrammètres ont coutume de nommer correction de courbure de terre est que l'espace dans lequel opèrent les cartographes n'est pas l'espace euclidien dans lequel l'équation de colinéarité est établie. Il s'agit en effet d'un système cartographique, dans lequel la planimétrie est mesurée dans une représentation plane (souvent conforme) de l'ellipsoïde, et l'altimétrie dans un système d'altitude.

La meilleure solution pour tenir compte de ce fait est de réaliser le plus rigoureusement possible les passages de cartographique en tridimensionnel (il est habituellement plus pratique de choisir un repère tridimensionnel local tangent, ne serait-ce que pour écrire des relations d'appui planimétrique ou altimétrique de façon simple). Cette solution, si elle est la meilleure sur le plan

théorique, est cependant un peu difficile à mettre en œuvre de façon industrielle, car elle rend nécessaire de disposer d'une base de données des systèmes géodésiques, des algorithmes des projections (parfois bizarres) utilisées dans les pays clients, et d'un modèle de la surface de niveau 0 (proche du géoïde) du système altimétrique concerné.

Une solution approchée à ce problème peut néanmoins être trouvée, qui – l'expérience le prouve – est d'une précision compatible avec celle de cette technique de mesure. Elle repose sur le fait que toutes les projections conformes sont localement équivalentes à une similitude près. On peut donc tenter de remplacer la projection réelle dans laquelle sont exprimées les coordonnées du chantier par une projection conforme unique (et pourquoi pas simple !), par exemple une projection stéréographique oblique de la sphère de courbure moyenne sur le plan tangent au centre du chantier.

La formulation mathématique devient alors (la figure est tracée dans le plan diamétral de la sphère contenant le centre du chantier A et le point I à transformer) :

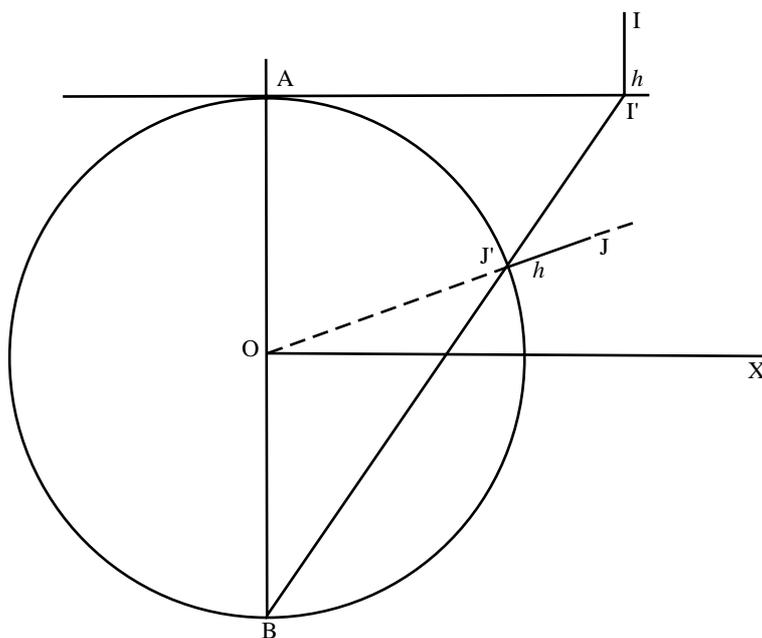


Figure 1.2. Figure tracée dans le plan diamétral de la sphère contenant le centre du chantier A et le point I à transformer

I est le point à transformer (cartographique), J le résultat (tridimensionnel), I' la projection de I sur le plan et J' la projection de J sur la sphère terrestre de rayon R. I' et J' sont inverses l'un de l'autre dans une inversion de pôle B et de puissance $4R^2$.

Posons :

$$I = \begin{cases} x \\ R+h \end{cases} \quad I' = \begin{cases} x \\ R \end{cases} \quad J' = \begin{cases} x' \\ y' \end{cases} \quad J = (1+\beta) \begin{cases} x' \\ y' \end{cases} \quad \alpha = \frac{x}{2R} \quad \beta = \frac{h}{R}$$

Le calcul de l'inversion donne :

$$\left. \begin{array}{l} \|BI'\| \|BJ'\| = 4R^2 \\ BJ' = \lambda BI' \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = \frac{4R^2}{BI'^2} = \frac{1}{1+\alpha^2} \approx 1 - \alpha^2 \quad [1.15]$$

$$J' = B + \lambda BI' = \begin{cases} x(1-\alpha^2) \\ R(1-2\alpha^2) \end{cases} \quad J = \begin{cases} (1-\alpha^2)(1+\beta)x \\ (1-2\alpha^2)(1+\beta)R \end{cases} \quad J - I = \begin{cases} (\beta - \alpha^2)x \\ -2\alpha^2 R \end{cases} \quad [1.16]$$

On peut considérer que J - I correspond à une correction à apporter aux coordonnées de I.

$$\Delta I_{courbure} = \begin{cases} xh/R - x^3/4R^2 \\ -x^2/2R \end{cases} \quad [1.17]$$

Dans les conditions courantes, le terme de correction altimétrique est de loin le plus significatif. Mais pour des aérotriangulations de grande étendue, les corrections planimétriques peuvent devenir importantes, et ne doivent pas être négligées. Si l'on appuie l'aérotriangulation sur des mesures de GPS aéroporté, il ne faut pas oublier d'effectuer aussi cette correction sur les coordonnées des sommets, qui devront de plus être corrigées de l'écart géoïde-ellipsoïde.

1.1.3.2. Réfraction atmosphérique

Avant de pénétrer dans la caméra photographique, les rayons lumineux traversent l'atmosphère, dont la densité, donc l'indice de réfraction, diminuent avec l'altitude.

H (km)	-1	0	1	3	5	7	9	11
(n - 1) 10 ⁶	306	278	252	206	167	134	106	83

Tableau 1.1. Co-indice de réfraction de l'atmosphère en fonction de l'altitude

Cette variation de l'indice provoque une courbure des rayons lumineux (orientée vers le bas) dont l'amplitude dépend des conditions atmosphériques (pression et température au moment de la prise de vues), qui ne sont généralement pas connues.

Malgré tout, cette déviation des rayons reste faible par rapport à la précision des mesures photogrammétriques (sauf aux très petites échelles). On pourra donc se contenter de corriger une réfraction correspondant à une atmosphère standard de référence. Pour évaluer l'influence de cette réfraction, il est indispensable de disposer d'un modèle donnant la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'altitude.

De nombreuses formules existent permettant d'évaluer la variation de la densité de l'air en fonction de l'altitude. Aucune n'est certainement meilleure que l'autre. On pourra par exemple utiliser ici formule publiée par l'OACI (Organisation internationale de l'aviation civile) :

$$n = n_0(1 + ah + bh^2) \text{ avec } a = -2,560 \cdot 10^{-8} \quad b = 7,5 \cdot 10^{-13} \quad n_0 = 1.000278 \quad [1.18]$$

ou celle-ci, dont l'intégration est plus simple :

$$n = 1 + ae^{-bh} \text{ avec } a = 278 \cdot 10^{-6} \quad b = 105 \cdot 10^{-6} \quad [1.19]$$

Le calcul de la correction de réfraction peut se faire de la façon suivante : le rayon lumineux issu de M paraît venir du point M' situé sur une même verticale, tel que $MM' = y$. On pourra ainsi modifier l'altitude du point objet M de la correction y pour l'amener en M'. Cette méthode de calcul a l'avantage de ne pas supposer que l'axe de prise de vues est vertical, et fonctionne en photogrammétrie oblique ou terrestre (cf. figure 1.3).

$$dy = \frac{h - h_M}{\sin v \cdot \cos v} dv, \text{ d'où } y = MM' = \int_M^S \frac{h - h_M}{\sin v \cdot \cos v} dv \quad [1.20]$$

La formule de Descartes nous donne la variation de l'angle de réfraction :

$$n \cdot \sin v = cte \text{ soit } dn \sin v + n \cos v dv = 0 \text{ ou encore } dv = -\frac{dn}{n} \operatorname{tg} v \quad [1.21]$$

Dans le cas de la photographie aérienne, on pourra supposer la terre plate, le gradient d'indice sera donc toujours vertical (cette approximation n'est pas valable en imagerie spatiale). Le rayon étant peu courbé, on pourra assimiler l'arc et la corde, l'angle v et l'indice de réfraction étant considérés comme constants pour l'intégration.

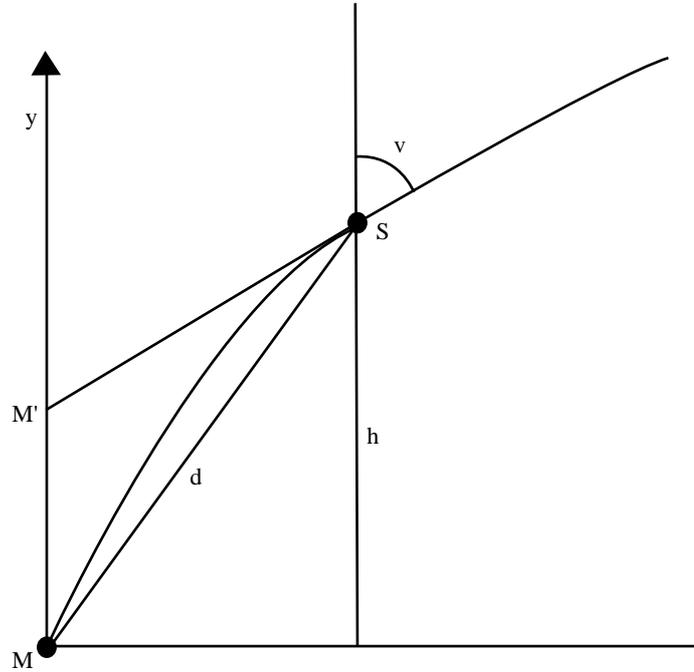


Figure 1.3. Rayon optique dans l'atmosphère, courbure très exagérée

$$MM' = - \int_M^S \frac{(h - h_M) \sin v}{\sin v \cdot \cos v} \frac{dn}{\cos v \cdot n} = - \int_M^S \frac{(h - h_M) dn}{\cos^2 v \cdot n} = \frac{-1}{\cos^2 v} \int_M^S (h - h_M) \frac{dn}{dh} dh$$

[1.22]

Avec la seconde formule de réfraction, le calcul de l'intégrale donne :

$$\frac{dn}{dh} = -abe^{-bh}, \int \frac{dn}{dh} dh = ae^{-bh} = n - 1 \text{ et } \int h \frac{dn}{dh} dh = (h + \frac{1}{b})(n - 1) \quad [1.23]$$

$$y = - \frac{D^2}{H^2} \left[\frac{n_S - n_M}{b} + H(n_S - 1) \right] \text{ avec } D = \|SM\| \text{ et } H = h_S - h_M \quad [1.24]$$

Pour des photos aériennes au 1/50 000 en focale 152 mm, cette correction est d'environ 0,20 m au centre, et atteint 0,50 m en bord de cliché. Elle est bien entendu sensiblement moins importante aux grandes échelles.

Cette formule permet également la correction de réfraction avec des axes de visée obliques ou horizontaux (photogrammétrie terrestre), ce qui n'est bien évidemment pas le cas des formules apportant une correction radiale aux coordonnées cliché. On pourra vérifier que lorsque $h_M \rightarrow h_S$, la limite de y

est : $y_H = (n_s - 1) \frac{b}{2} D^2$ réfraction d'une visée horizontale.

1.1.3.3. À l'entrée dans l'avion

Lorsque l'avion est pressurisé, deux phénomènes peuvent se produire. Tout d'abord, les rayons lumineux traversent le hublot placé devant l'objectif. Ce hublot de verre, donc de faible conductivité thermique, est soumis à des différences de température importantes et se courbe sous l'effet des dilatations différentielles. Il prend alors une forme grossièrement sphérique, et se comporte donc alors comme une lentille, qui introduit une distorsion optique. Malheureusement, si le phénomène peut être mis en évidence expérimentalement (et le calcul montre que son influence n'est pas négligeable), il est pratiquement impossible à quantifier, la forme réelle du hublot dépendant de l'histoire du vol. Il existe cependant des techniques de calcul qui seront évoquées en paragraphe 1.1.3.6 (inconnues de systématisme a posteriori) permettant de le modéliser et d'en éliminer l'influence dans l'aérotriangulation.

Par ailleurs, le rayon lumineux est réfracté une seconde fois à l'entrée dans la cabine, où la pression est plus élevée qu'à l'extérieur à l'altitude de vol (la différence de pression est fonction de l'avion utilisé). On peut de même modéliser cette réfraction de façon analogue à la réfraction atmosphérique (le signe est opposé à la précédente, car le rayon arrive dans un milieu d'indice supérieur).

En notant n_c l'indice de réfraction à l'intérieur de la cabine, et en supposant que le hublot est horizontal :

$$dv = -(n_c - n_s) \tan v = -(n_c - n_s) \frac{R}{H} \quad [1.25]$$

$$dy = -\frac{D^2}{H^2} (n_c - n_s) H \quad [1.26]$$

En combinant cette équation avec celle de la réfraction atmosphérique, on voit qu'il suffit de remplacer l'altitude du sommet par l'altitude cabine dans le second membre :

$$y = -\frac{D^2}{H^2} \left[\frac{n_S - n_M}{b} + H(n_c - 1) \right] \quad [1.27]$$

Reste à calculer l'indice de réfraction cabine. D'après les aviateurs, la pressurisation conduit à une différence de pression limitée à une valeur ΔP_{\max} (6 psi, soit 41 370 Pa dans le cas des Beechcraft de l'IGN) entre l'intérieur et l'extérieur de l'avion ; en dessous d'une altitude limite, la pression est la pression sol (environ 4 300 m dans le cas précédent).

Le co-indice N de réfraction est lié à la pression et la température par la relation :

$$N = (n - 1)10^6 = 790 \frac{P}{T}, \quad P \text{ en kPa et } T \text{ en K}$$

La température décroît avec l'altitude suivant la loi empirique : $T = T_0 - 6,5 \cdot 10^{-3} Z$. Si l'on prend $T_C = T_0 = 298K$, on peut calculer le co-indice cabine par :

$$N_C = N_S(1 - 2,22 \cdot 10^{-5} Z_S) + 2,696 \Delta P$$

On le limitera à sa valeur sol (278), dans le cas où l'on est sous l'altitude de pressurisation.

On voit que, dans les conditions de vol courantes (prise de vues à 5 000 m, début de pressurisation à 4 300 m), cette correction totale est presque opposée à la correction calculée sans pressurisation cabine.

1.1.3.4. *Distorsion de l'optique*

En optique élémentaire (conditions de Gauss : lentilles minces, rayons peu inclinés sur l'axe, optique peu ouverte), tout rayon passant par le centre de l'objectif n'est pas dévié. C'est ce que reproduit la perspective mathématique. Malheureusement, les optiques réelles utilisées en prise de vues photogrammétriques ne remplissent aucune de ces conditions.

Dans le cas des optiques parfaites (dioptries sphériques centrés) le rayon d'entrée, le rayon de sortie, et l'axe de l'optique sont coplanaires. Mais les rayons incident et émergent ne sont pas parallèles. Cet écart de parallélisme constitue la distorsion de l'objectif. C'est une caractéristique permanente et stable de l'optique, qui peut être mesurée préalablement à la prise de vues, et corrigée lors des calculs de photogrammétrie.

La mesure de cette distorsion peut être réalisée sur un banc optique muni de collimateurs, ou par visée d'un réseau à travers l'objectif. Ces méthodes, assez lourdes et onéreuses, sont utilisées par les fabricants pour fournir les certificats d'étalonnage des caméras aériennes qu'ils produisent. Il est également possible de déterminer la distorsion (ainsi que le centrage et la distance principale) par photographie d'un polygone tridimensionnel de points très bien connus en coordonnées, et par calcul des équations de colinéarité, auxquelles on ajoute des inconnues de distorsion suivant le modèle choisi.

Dans le cas d'un objectif parfait, la distorsion se modélise très bien par une correction symétrique polynomiale radiale autour du point principal de symétrie (intersection de l'axe optique avec le plan du capteur). De plus, on peut démontrer aisément que ce polynôme ne contient que des termes impairs. Le terme de premier degré peut être choisi arbitrairement, car il est lié au choix de la distance principale : on le prend souvent nul (distance principale au centre de l'image) ou de façon à ce que la distorsion maximale dans le champ soit la plus faible possible.

Si l'optique ne peut pas être considérée comme parfaite (c'est parfois le cas si l'on tente d'employer des appareils photographiques grand public pour des opérations photogrammétriques), la distorsion peut perdre son caractère radial et symétrique, et nécessite des moyens d'étalonnage et de modélisation beaucoup plus complexes. De plus, dans le cas des zooms (que l'on évitera...), cette distorsion ne reste pas toujours constante dans le temps en raison des variations de centrage apportées par le déplacement du véhicule pancratique (équipage mobile permettant le déplacement des lentilles). Toute modélisation devient alors très aléatoire.

1.1.3.5. *Déformations du capteur*

L'équation de la perspective suppose que le capteur est un plan, et que l'on peut y définir un référentiel de mesure permanent. À ce point de vue, il faudra opposer les capteurs photochimiques (émulsion photographique) et les capteurs électroniques (matrices DTC). Ces derniers sont pratiquement indéformables, et l'image qu'ils acquièrent est définitivement stable (en tout cas sur le plan géométrique). Les remarques suivantes s'appliqueront donc uniquement aux capteurs photochimiques.

La planéité de l'émulsion était autrefois obtenue par utilisation de plaques de verre, mais cette solution n'est plus employée, sauf peut-être dans certains systèmes de photogrammétrie terrestre. Elle n'était d'ailleurs pas très satisfaisante. On a pratiquement toujours recours aujourd'hui à l'aspiration sous vide du film sur une plaque de fond de chambre perforée. Cette méthode est très satisfaisante, à condition qu'il n'y ait pas de poussière interposée entre le film et

la plaque, ce qui est malheureusement assez difficile à obtenir. Lorsqu'il en reste, il s'ensuit une déformation locale de l'image, difficile à détecter (sauf dans des zones radiométriquement uniformes, où apparaît un effet d'ombre) et impossible à modéliser.

L'indéformabilité de l'image au cours du temps, si elle s'est améliorée avec l'usage de supports dits « stables », est tout à fait insuffisante pour l'usage des photogrammètres. Des déformations dix fois supérieures à la précision des mesures nécessaires sont fréquentes. La seule parade efficace est la mesure des coordonnées images de points connus (les repères de fond de chambre) et la modélisation de la déformation par une transformation bidimensionnelle. On choisit habituellement une affinité (transformation linéaire générale), qui représente assez bien la partie principale de la déformation. Mais cette déformation n'est ainsi mesurée que sur le bord de l'image, en un petit nombre de points (8 en général). La prolongation à l'intérieur de l'image est donc d'une assez faible fiabilité.

1.1.3.6. *Modélisation des défauts non quantifiables*

Les principales corrections à apporter au modèle simpliste de la perspective centrale ont été passées en revue. Certaines d'entre elles peuvent être considérées comme parfaitement connues – la courbure de terre par exemple – d'autres peuvent être calculées approximativement : réfraction, déformation du film, d'autres enfin sont totalement inconnues, la distorsion du hublot par exemple.

Lorsque la reconstitution géométrique précise est indispensable – c'est notamment le cas en aérotriangulation, où le cumul d'erreurs systématiques peut engendrer des imprécisions intolérables – une parade consiste à ajouter à l'équation de colinéarité et à ses termes correctifs, un modèle paramétrique de déformation (souvent polynomial), contenant un petit nombre de paramètres, choisis de façon à représenter au mieux l'influence des défauts non directement modélisables. Ces inconnues supplémentaires (inconnues de systématisme a posteriori) seront résolues simultanément avec les inconnues principales du système photogrammétrique que sont les coordonnées des points terrain, les sommets de prise de vue, et la rotation des images. Cette technique permet habituellement un gain de 30 à 40 % sur la précision altimétrique de l'aérotriangulation.

1.1.4. *Quelques règles pratiques*

Les règles de bonne mise en œuvre de la photogrammétrie aérienne sont connues depuis plusieurs décennies, et l'on se contentera donc ici d'en rappeler

l'essentiel. D'ailleurs, les variables sur lesquelles on peut intervenir sont peu nombreuses. Elles découlent pour l'essentiel de la précision que l'on cherche à atteindre, qui peut être spécifiée dans le cahier des charges, ou se déduire de l'échelle du levé (même si celui-ci est numérique, on peut lui attribuer une échelle correspondant à sa précision, qui est conventionnellement de 0,1 mm à l'échelle). La pratique montre que l'ensemble des erreurs qui se cumulent au cours du processus photogrammétrique limite sa précision, dans des travaux courants, à environ 15 à 20 microns sur l'image (sur des points bien définis) pour chacune des deux coordonnées planimétriques. Ce chiffre peut être sensiblement amélioré (jusqu'à 2 à 3 μm) en choisissant des modes opératoires plus contraignants (et simultanément plus onéreux). Pour l'altimétrie, ce chiffre doit être grosso modo divisé par le rapport entre la base (distance entre les points de vue) et l'éloignement (de ces points de vue à l'objet photographié). Ce rapport dépend directement de l'angle de champ choisi pour la caméra : plus le champ est large, plus ce rapport sera élevé, plus la précision altimétrique sera proche de la précision planimétrique. À titre d'exemple, le tableau 1.2. récapitule les valeurs caractéristiques des caméras aériennes les plus courantes (en format 24 x 24 cm) avec des valeurs de base standard (recouvrement de 55 %) :

Focale	88 mm	152 mm	210 mm	300 mm
Angle de champ	120°	90°	73°	55°
B/H	1,3	0,66	0,48	0,33
Hauteur de vol (1/10 000)	880 m	1 520 m	2 100 m	3 000 m
Précision plani (1/10 000)	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
Précision alti (1/10 000)	15 cm	30 cm	40 cm	60 cm

Tableau 1.2. *Précisions obtenues pour différents types courants de prises de vues aériennes*

Connaissant la précision demandée au levé, il est alors très simple de déterminer l'échelle de prise de vue. Le choix de la focale sera guidé par la considération suivante : plus la focale est longue, plus l'altitude de vol sera élevée, plus les parties cachées seront faibles (essentiellement les pieds des immeubles en ville, sinon le sol complet des rues), mais simultanément plus la précision altimétrique sera dégradée, et plus l'influence radiométrique de l'atmosphère sera gênante.

En pratique, on utilisera prioritairement la focale de 152 mm. La focale plus courte sera réservée aux très petites échelles, pour lesquelles l'altitude de vol peut constituer une limitation (le gain en précision altimétrique est en réalité tout à fait théorique, dans la mesure où la médiocre qualité des optiques fait perdre ce que l'on avait gagné en géométrie). Les focales longues seront réservées la plupart du temps aux levés orthophotographiques en zone urbaine, dans lesquels la perte de qualité altimétrique n'est pas un gros handicap. Dans le cas de photographie en couleurs, il faudra néanmoins prendre garde à l'augmentation du voile atmosphérique, qui aura surtout pour conséquence pratique de limiter le nombre de jours de prise de vues disponibles. Une autre façon (moins économique) de pallier le problème des parties cachées est d'utiliser une caméra de focale normale, en choisissant des recouvrements plus importants : on peut ainsi concilier une bonne précision altimétrique, un faible voile et des déformations dues au sursol acceptables.

On trouvera au paragraphe 1.5.4 les éléments complémentaires spécifiques aux acquisitions d'images aériennes numériques.

1.2. Effets radiométriques de l'atmosphère et des optiques²

1.2.1. Diffusion atmosphérique : diffusion Rayleigh et diffusion de Mie

L'atmosphère est généralement opaque aux très courtes longueurs d'onde, sa transmission ne débutant que vers 0,35 μm . Ensuite, l'atmosphère présente plusieurs « fenêtres » plus ou moins larges qui se répartissent jusque vers 14 μm , l'absorption redevenant pratiquement totale entre 14 μm et 1 mm. Enfin, la transmission réapparaît progressivement entre 1 mm et 5 cm, pour devenir pratiquement parfaite aux longueurs d'onde plus grandes (ondes radio).

La basse atmosphère, dans la bande visible, n'est pas parfaitement transparente, et de ce fait, lorsqu'elle est illuminée par le Soleil, elle diffuse à son tour une certaine partie du rayonnement qu'elle reçoit : tout un chacun peut observer la couleur blanc laiteux du ciel près de l'horizon et au contraire sa couleur bleue très marquée en montagne vers le zénith. Ces émissions lumineuses sont des données importantes pour bien comprendre les images utilisées en photogrammétrie, et en particulier l'éclairage diffus venant du ciel dans les zones d'ombre, ou encore le voile atmosphérique et sa variation selon l'altitude de prise de vues. Nous commencerons par une présentation des mécanismes de diffusion présents dans l'atmosphère, pour évaluer ensuite les effets de cette diffusion sur des images obtenues en avion ou depuis un satellite.

2. Cette section a été rédigée par Michel KASSER.

1.2.1.1. Diffusion Rayleigh

La diffusion par les gaz atmosphériques (souvent appelée absorption, de façon erronée, puisque l'énergie lumineuse prélevée sur un faisceau lumineux est simplement redistribuée dans toutes les directions, mais pas transformée en chaleur) est généralement due à des transitions électroniques ou vibrationnelles des atomes et des molécules présents dans l'atmosphère. Dans l'ensemble, les transitions électroniques des atomes provoquent une diffusion généralement située dans l'ultraviolet (résonances très amorties à cause des importants couplages entre atomes dans chaque molécule, et ainsi dont l'effet est encore sensible à des fréquences bien plus basses), alors que les transitions vibrationnelles des molécules provoquent plutôt des diffusions situées à des fréquences plus basses, donc dans l'IR (et ce sont alors des résonances aiguës, car il n'y a presque pas de couplage entre les résonateurs élémentaires que sont les molécules, et donc les flancs des raies sont très raides). La diffusion Rayleigh, particulièrement importante aux fréquences élevées, correspond à ces résonances atomiques. Nous avons donc là un facteur d'atténuation d'un rayonnement lumineux lorsqu'il traverse l'atmosphère, et en même temps une source appréciable de lumière parasite, puisque la lumière prélevée sur le faisceau incident est réémise dans toutes les directions, de sorte que l'atmosphère devient ainsi aussi une source lumineuse secondaire.

La diffusion Rayleigh se modélise de façon très satisfaisante. Elle est caractérisée sommairement par deux aspects :

- son efficacité est en λ^{-4} ce qui, composé avec la sensibilité spectrale de l'œil humain est responsable de l'apparence bleue du ciel ;
- le diagramme de réémission de la lumière diffusée est symétrique entre l'avant et l'arrière, avec une diffusion vers l'avant ou l'arrière deux fois plus importante que vers les côtés.

1.2.1.2. Diffusion par les aérosols (diffusion de Mie)

On appelle aérosols toutes les particules, gouttelettes d'eau, poussières qui sont sans arrêt chassées dans l'atmosphère par le vent balayant le sol, mais qui peuvent également provenir de la mer (sous forme d'embruns qui deviendront des particules de sel), de volcans (lors d'explosions cataclysmales), des activités humaines (pollutions industrielles, automobiles, feux de forêts, ...) et également provenir de l'extérieur de notre globe : météorites et leurs débris. La caractéristique essentielle de ces *aérosols*, puisque tel est le nom générique que l'on donne habituellement à tous ces composants non gazeux de l'atmosphère, est que leur répartition est à la fois très variable avec l'altitude (présentant un maximum très accentué au voisinage du sol) mais également très variable avec le site et avec le temps.

Vapeurs, fumées	0.001 – 0.5 μm
Fumées industrielles	0.5 – 50 μm
Brume, poussières	0.001 – 0.5 μm
Brouillards, nuages	2 – 30 μm
Crachin	50 – 200 μm
Pluie	200 – 2 000 μm

Tableau 1.3. À titre indicatif, taille caractéristique et nature des aérosols courants

Cela étant, chaque aérosol diffuse la lumière, un peu comme le font les molécules gazeuses. Cependant, une différence importante est que les molécules présentent des dimensions beaucoup plus faibles que la longueur d'onde des rayonnements qui nous intéressent ici, ce qui entraîne que la diffusion Rayleigh par les molécules (ou les atomes) est pratiquement isotrope. Au contraire, la diffusion par les aérosols, dont les dimensions sont souvent du même ordre que les longueurs d'onde considérées, présente une assez forte variation avec la direction d'observation. En même temps, l'intensité de la diffusion par les aérosols – que l'on appelle également la *diffusion de Mie* – dépend fortement de la dimension de la particule diffusante. L'intérêt de calculs exacts est très limité, puisqu'en pratique, la teneur de l'atmosphère en aérosols est très variable en fonction de l'altitude, mais surtout en fonction du temps. En tout état de cause, on est tout à fait incapable en général de la prévoir.

En pratique, c'est au contraire à partir de mesure de diffusion lumineuse que l'on estime la densité (en nombre de particules/cm³) des aérosols en fonction de l'altitude.

Le tableau 1.4 en donne une idée, mais il faut bien remarquer que cette répartition, qui entraîne une atténuation n'est à peu près stable qu'à une altitude supérieure à 5 km. Dans les premiers kilomètres de l'atmosphère au contraire, l'influence du vent, des activités humaines (fumées, carrières...) est telle que les chiffres ci-après n'ont plus qu'une valeur tout à fait indicative.

La diffusion de Mie est caractérisée par un diagramme directionnel qui varie beaucoup avec la taille des aérosols. Pour des particules très petites devant la longueur d'onde de la lumière, le diagramme est très voisin de celui de la diffusion Rayleigh. Pour des particules de plus en plus grosses, il devient de plus en plus dissymétrique entre l'avant et l'arrière, pour donner une rétrodiffusion négligeable devant l'importance de la diffusion vers l'avant (*cf.* figure 1.4).

h (km)	Densité d'aérosols (particules par cm^3)
0	200
1	87
2	38
3	16
4	7.2
5	3.1
6	1.1
7	0.4
8	0.14
9	0.05

Tableau 1.4. Valeurs typiques de densités d'aérosols avec l'altitude

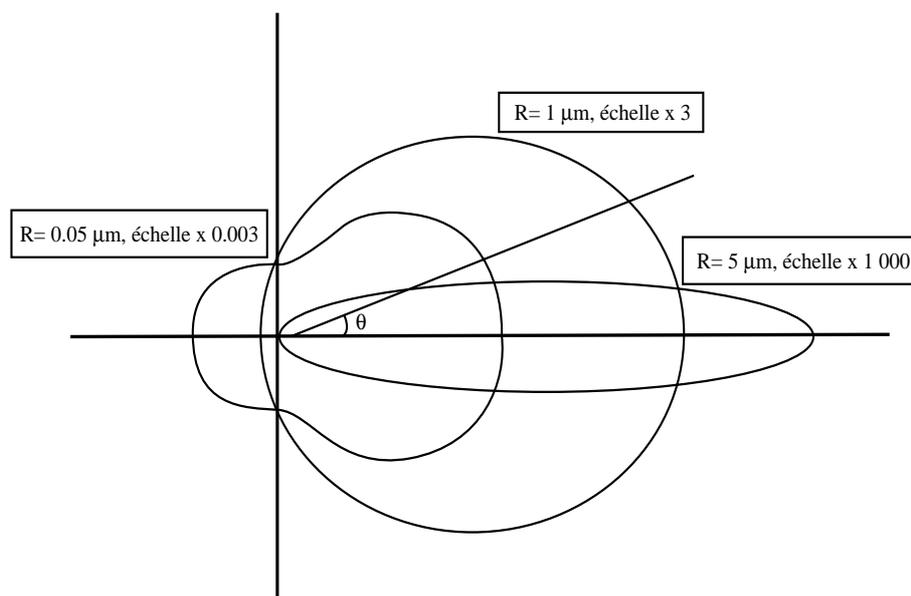


Figure 1.4. Distribution angulaire de la diffraction de Mie pour une longueur d'onde de $0.5 \mu\text{m}$ et pour trois dimensions de particules : 0.05 , 0.1 et $0.5 \mu\text{m}$

Pour évaluer l'importance du phénomène sur les prises de vues aériennes, on évalue alors l'atténuation apportée à un faisceau lumineux cheminant vers le haut, à partir de l'atténuation observée horizontalement, évidemment bien plus accessible. On caractérise celle-ci par la « *visibilité météorologique* », qui est la distance V à laquelle l'intensité d'un faisceau collimaté à $\lambda = 0.555 \mu\text{m}$ (longueur d'onde du maximum de sensibilité de l'œil) tombe à 2 % de sa valeur initiale. Dans ces conditions, la pratique montre que la diffusion qui accompagne l'atténuation fait disparaître tout détail de la zone observée, qui se fond en une plage d'intensité uniforme.

La diminution d'intensité d'un faisceau lumineux ne dépendant, physiquement, que du nombre de particules traversées, l'atténuation résultante est bien décrite par la loi de Beer :

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot x} \quad [1.28]$$

(où x est la distance parcourue dans le milieu absorbant, et k le coefficient d'absorption).

La visibilité V , facilement appréciable à l'œil pour un observateur un peu entraîné, permet de calculer $K_M + K_R$ et donc la part d'atténuation due aux aérosols, par différence entre le coefficient observé K_{obs} tel que : $e^{-K_{\text{obs}} \cdot V} = 0.02$ et celui K_R facile à calculer, résultant de la diffusion Rayleigh.

$$I = I_0 \cdot e^{-(K_R + K_M) \cdot x} = I_0 \cdot e^{-K_R \cdot x} \cdot e^{-K_M \cdot x} \quad [1.29]$$

À partir de la visibilité V , on établit de façon empirique le coefficient d'atténuation pour différentes longueurs d'ondes. On aboutit ainsi à la formule (en km^{-1} , pour λ en μm et V en km) :

$$K_M = \frac{3.91}{V} \left(\frac{0.555}{\lambda} \right)^{0.585} V^{\frac{1}{3}} \quad [1.30]$$

dont le tableau 1.5 donne les résultats numériques pour diverses longueurs d'ondes.

Si l'on veut passer de l'atténuation horizontale à l'atténuation verticale, pour évaluer l'effet sur un faisceau lumineux allant du sol à un avion, on admet en outre que la densité des aérosols, en fonction de l'altitude, suit une loi exponentielle. La figure 1.5 montre la relation entre le coefficient d'extinction (qui est le coefficient k de la loi de Beer) et la visibilité.

λ (μm)	k_{Rayleigh} (km^{-1})	k_{Mie} (km^{-1})		
		V=1 km	V=5 km	V=10 km
0.4	0.044	4.7	1.1	0.58
0.6	0.008 3	3.7	0.72	0.35
0.8	0.002 6	3.1	0.54	0.24
1.0	0.000 6	2.8	0.43	0.18

Tableau 1.5. Coefficients d'atténuation Mie et Rayleigh pour différentes longueurs d'ondes et visibilité

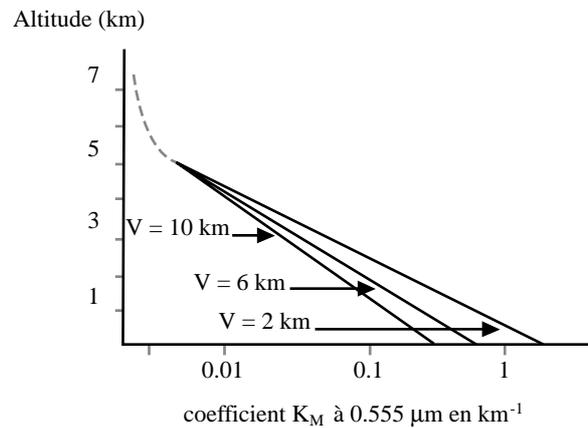


Figure 1.5. Variations du coefficient d'atténuation à $0.555 \mu\text{m}$ pour trois valeurs de la visibilité au sol

La figure 1.6 illustre le résultat du calcul d'intégration pour une traversée verticale de la couche diffusante, effectué pour une atténuation $K_M = 10^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$ à $h = 5 \text{ km}$ (altitude au-dessus de laquelle la concentration des aérosols cesse d'être notablement influencée par les perturbations au sol, et peut être considérée comme constante).

On notera aussi que, dans le domaine visible, la teneur en vapeur d'eau ne change rien à la visibilité.

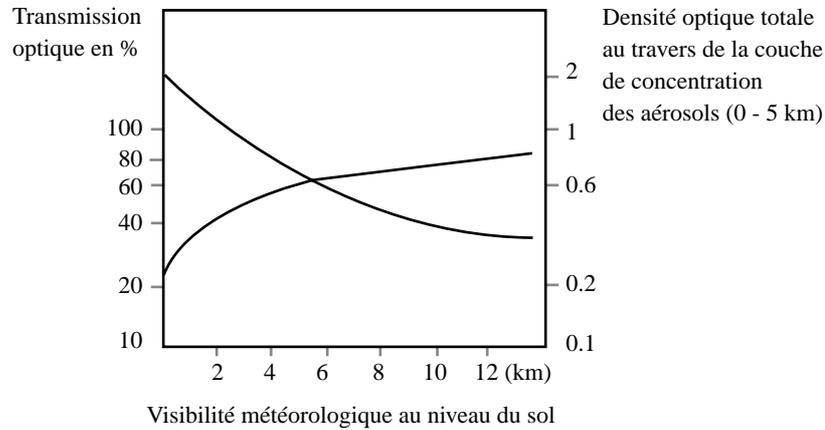


Figure 1.6. Transmission optique et épaisseur optique pour une traversée verticale de l'atmosphère diffusante pour diverses valeurs de la visibilité au sol

1.2.2. Effets de la diffusion atmosphérique en prise de vues aériennes

La diffusion de la lumière par les molécules des gaz atmosphériques et par les aérosols de toutes sortes dispersés dans l'atmosphère n'est pas seulement responsable d'une atténuation de la lumière. De fait, la portion d'atmosphère traversée par le faisceau d'observation se comporte, lorsqu'elle est éclairée par le soleil, comme une source lumineuse dont le rayonnement parvient en partie sur le détecteur.

Étant étranger au sol que l'on se propose généralement d'observer, ce rayonnement peut être qualifié de « parasite » et constitue souvent une des principales sources de « bruit » en traitement d'image dans le domaine visible. Cette diffusion est aussi difficile à calculer que l'atténuation correspondante, puisque, comme elle, elle dépend de la répartition par tailles et de la nature des diffuseurs, et que, de surcroît, elle fait aussi intervenir, dans le cas des aérosols de dimensions non négligeables par rapport à λ , l'angle entre direction d'observation et direction d'éclairage. La contribution de la diffusion Rayleigh, surtout importante aux courtes longueurs d'ondes, est donc la seule facile à calculer.

Il reste à déterminer la fraction de ce flux renvoyée vers l'instrument d'observation. En première approximation, on pourra admettre que la diffusion est isotrope. La diffusion (somme des contributions des diffusions Mie et Rayleigh) intervient finalement dans les trois aspects suivants :

– *éclairage apporté par le ciel dans les zones à l'ombre*, source diffuse qui comprend au minimum la diffusion Rayleigh, et qui est donc toujours importante dans le bleu, mais qui est dans tous les cas caractéristiques du contraste des ombres. Si ce contraste est fort, c'est que les ombres sont peu éclairées, et donc que la diffusion est faible. Plus le Soleil est bas sur l'horizon, moins l'éclairage solaire direct est fort et plus la diffusion atmosphérique devient prédominante. À titre indicatif, entre une surface au soleil et la même surface à l'ombre, les différences d'éclairage typiques sont de : 2 (Soleil à 20° sur l'horizon, ciel assez brumeux, $V = 2$ km), 3 (Soleil à 45°, $V = 5$ km), 10 (cas extrême, Soleil très haut et $V > 10$ km, cas assez fréquent par exemple en haute montagne) ;

– *atténuation des faisceaux lumineux utiles*, allant du sol éclairé vers l'appareil de prises de vues. Cette atténuation dépend de la hauteur de vol H et de la valeur de V . Par exemple pour $H > 4$ km, l'atténuation est la même que celle du rayonnement solaire direct, pouvant aller d'une valeur de la transmission de 0,90 ($V = 10$ km par exemple) à 0,70 ($V = 3$ km) voire moins. Et pour des hauteurs de vol plus basses, la décroissance exponentielle de K avec les altitudes croissantes montre que ce coefficient est proche de 1 pour des vols bas (grandes échelles, $H = 1\ 500$ à $2\ 000$ m). Par contre, pour des valeurs de $H > 4$ ou 5 km, l'atténuation est la même que pour un satellite imageur ;

– *superposition d'un voile atmosphérique* à peu près uniforme sur l'image utile formée dans le plan focal. Ce flux lumineux parasite peut se calculer selon le raisonnement suivant dans le cas où l'avion est entièrement au-dessus de la couche diffusante ($H > 4$ ou 5 km) : (1) la diffusion est à peu près symétrique avant/arrière ; (2) cette diffusion est alimentée essentiellement par la lumière prélevée sur le rayonnement solaire direct, entre 10 % et 50 % selon nos remarques précédentes ; (3) la moitié de ce flux représente donc la source de lumière, provenant donc de tout le demi-espace inférieur ; (4) on fait l'hypothèse que ce flux est isotrope dans tout ce demi-espace et on calcule, compte tenu de l'ouverture de la pupille de la caméra, le flux F qui s'y présente en provenance de tout ce demi-espace ; (5) on calcule l'angle solide sous lequel est vu un pixel au sol par la caméra ; (6) on corrige enfin F du rapport formé par cet angle solide et $2\ \pi$ (angle solide formé par un demi-espace). Ce flux est évidemment à minorer si l'avion vole plus bas, comme mentionné précédemment, mais on est généralement surpris lorsqu'on effectue ce calcul de voir combien le voile atmosphérique est important devant le signal utile, car dans des conditions courantes pour, $H > 5$ km, il lui est fréquemment supérieur, ce qui donne presque toujours aux images couleur non corrigées un aspect blanc laiteux qui fait disparaître largement l'apparence même des couleurs.

1.2.3. Problèmes radiométriques liés aux optiques employées

Dans les calculs d'énergies optiques que l'on effectue en imagerie aérienne, il faut aussi tenir compte des effets classiques liés aux optiques des caméras. Les caméras traditionnelles nous ont en effet habitués à corriger ces effets de façon quasi parfaite, essentiellement parce que la chaîne photogrammétrique en aval était autrefois incapable de corriger le moindre défaut radiométrique de l'optique. Les prises de vues numériques permettent d'aborder ces problèmes avec des matériels bien plus courants optimisés pour la qualité de l'image, et non pour des aspects typiquement photogrammétriques comme la distorsion, en corrigeant ensuite ces défauts par calcul. Les remarques qui suivent récapitulent ces quelques points :

- la courbure de champ est très pénalisante, puisqu'elle implique que la zone de meilleure netteté n'est pas plane : ce défaut doit donc être d'autant plus réduit que l'on travaille avec des pixels petits dans le plan image. Dans cette logique, il faut faire attention aux glaces disposées devant le capteur DTC lorsqu'on travaille en champ large, ce qui est la règle en photogrammétrie : cette lame à faces parallèles, induit une distorsion radiale assez facilement observable, quoique non pénalisante puisqu'elle peut être incluse dans la calibration ;

- la distorsion a obligatoirement une symétrie de révolution. On la décrit par un polynôme de degré impair, et actuellement, on s'inquiète assez peu de son importance, mais plutôt des résidus observés entre le polynôme et les mesures de calibration ;

- le vignettage est responsable sur les optiques dans l'approximation de Gauss d'une perte d'éclairement de la surface sensible suivant le \cos^4 de l'angle entre les rayons et l'axe optique, ce qui réduit beaucoup la luminosité dans les angles d'un cliché. Cet effet est assez bien corrigé aujourd'hui, y compris sur les optiques grand public, et peut lui aussi faire l'objet d'un étalonnage radiométrique de l'appareil photographique considéré, en utilisant comme source lumineuse une sphère intégrante ;

- l'obturateur est également une pièce importante. S'il est au centre optique de l'objectif, ses temps d'ouverture et de fermeture ne posent généralement pas problème, mais alors il y a un obturateur dans chaque objectif employé, ce qui accroît de beaucoup leur coût. Pour des caméras numériques utilisant des matrices DTC, on notera que la très grande sensibilité de ces dispositifs rend nécessaire d'avoir accès à des temps de pose très courts, et pas forcément réalisables lors de forts ensoleillements, compte tenu de la relative lenteur de ces dispositifs mécaniques. On est alors parfois obligé de rajouter des densités neutres devant l'objectif pour limiter le flux reçu. Par ailleurs, si l'on emploie avec ce type de caméra un obturateur à rideau, il faut évidemment veiller à ce que le défilement du rideau aille dans le sens du défilement des charges du

DTC et à ce que la compensation électronique de filé (qui consiste à faire défiler les charges dans le plan focal à la vitesse physique de défilement de l'image dans le plan focal) soit activée pendant toute la durée de mouvement du rideau (généralement $1/125^{\circ}$ de seconde), et non pendant le temps d'exposition locale du DTC (qui peut descendre jusqu'à $1/2\ 000^{\circ}$ de seconde au besoin). Si le rideau est orienté dans une autre direction, il en résulterait en effet une importante distorsion de l'image. Si sa direction est bonne mais que la compensation électronique de filé n'est pas activée sur la bonne durée, seule une partie de l'image qui sera correcte, en netteté comme en éclaircissement ;

– finalement, sur les caméras numériques, il faut noter qu'il est facile d'étalonner la sensibilité des pixels individuellement, et d'appliquer ensuite une correction systématique, ce qui améliore la linéarité de la mesure. Par ailleurs, dans les systèmes matriciels, la compensation électronique de filé amène à moyenner les réponses de plusieurs pixels, ce qui améliore encore l'homogénéité de la réponse des pixels.

1.3. Colorimétrie³

1.3.1. Introduction

Le mot « couleur » est un vocable dangereux parce que revêtant des sens très divers. Nous avons tous une compréhension intuitive de cette notion et pensons savoir ce que sont le vert ou l'orange. En fait, le mot couleur recouvre deux notions fondamentalement différentes :

– d'une part, la sensation visuelle que nos yeux reçoivent de la surface d'un objet éclairé,

– d'autre part, la courbe spectrale d'un rayonnement fixant, pour chaque longueur d'onde, la quantité de lumière émise, réfléchi ou transmise par un objet.

La première grandeur est éminemment subjective et dépendante de nombreux paramètres. La seconde est entièrement objective : elle correspond à des mesures physiques. Le fait que la langue ne propose qu'un seul terme pour ces deux notions est une source de confusion. Nous devons avoir toujours à l'esprit que nos yeux ne nous communiquent qu'une transcription de la lumière perçue se limitant à la fourniture de trois valeurs et ne sont donc pas capables d'analyser des courbes spectrales définies par un grand nombre de points.

L'objectif de cette présentation est d'attirer l'attention du lecteur sur la complexité des situations qui seront rencontrées lorsque certains traitements

3. Cette section a été rédigée par Yannick BERGIA et Michel KASSER.

numériques vont s'appliquer, non pas sur des images noir et blanc, mais sur des images en couleur. Ce sera particulièrement le cas, en photogrammétrie numérique, dans les traitements de compression d'image et de corrélation automatique. Il est en effet certain que pour de tels traitements, c'est dès la conception des algorithmes qu'il faut prendre en compte un type d'espace colorimétrique donné, et qu'il faut le choisir en fonction, par exemple, des problèmes de métrique qu'il pose.

Les couleurs que nos yeux sont capables de différencier, si elles ne sont pas en nombre infini, sont néanmoins extrêmement nombreuses. Pour les comparer ou les mesurer, on se réfère à des couleurs théoriques de base (souvent appelées primaires) qui sont définies comme suit. On découpe le spectre visible en trois sous-domaines, pour lesquels on définit les couleurs avec un niveau de rayonnement constant sur toute une plage spectrale :

- entre 0.4 et 0.5 micron, le bleu ;
- entre 0.5 et 0.6 micron, le vert ;
- entre 0.6 et 0.7 micron, le rouge.

Une lumière est donc dite bleue (respectivement verte, rouge) si elle est composée de parts égales de rayonnements de longueurs d'ondes comprises entre 0.4 et 0.5 micron (respectivement de 0.5 à 0.6 et de 0.6 à 0.7 μm) et ne contient aucune autre longueur d'onde du spectre visible (on ne présage pas du reste du spectre). On définit aussi, à côté de ces couleurs « fondamentales », les couleurs dites « complémentaires » de base :

- le cyan, dont les longueurs d'ondes s'étendent de 0.4 à 0.6 μm ;
- le magenta, de 0.4 à 0.5 μm et de 0.6 à 0.7 μm ;
- le jaune, de 0.5 à 0.7 μm .

1.3.2. La vision trichromatique

La notion de vision trichromatique est un des principes de base de la colorimétrie. Elle repose sur le fait que l'œil humain possède trois types de récepteurs (les *cônes*) sensibles à la couleur (l'œil possède aussi d'autres récepteurs, les bâtonnets qui sont eux sensibles à la luminosité), chacun des trois types de cônes ayant une sensibilité spectrale différente. Ce principe postule qu'une couleur peut être représentée quantitativement par seulement trois valeurs. D'ailleurs, les expériences prouvent que trois quantités sont à la fois nécessaires et suffisantes pour spécifier une couleur. En outre, elles introduisent les notions d'additivité et de proportionnalité des couleurs et confèrent ainsi les propriétés intrinsèques d'un espace vectoriel de dimension trois à tout espace où l'on chercherait à représenter des couleurs.

1.3.3. Modélisation des couleurs

Spécifier une couleur, c'est donc associer au spectre de distribution de puissance d'une lumière émise un triplet de valeurs qui le représenteront dans ce qui sera alors un espace colorimétrique. Compte tenu des résultats des expériences, on peut considérer que se donner trois couleurs respectant les conditions d'indépendance mutuelle (et qui seront alors les trois primaires de l'espace) peut suffire à définir un espace colorimétrique : pour une couleur donnée, les coefficients multiplicateurs des trois intensités des sources associées aux primaires à l'équilibre (*i.e.* quand la couleur reconstituée correspond à la couleur considérée) seront les coordonnées de la couleur dans l'espace ainsi construit. Une autre façon de le faire est de revenir à la donnée physique qui contient l'information couleur et d'intégrer la distribution spectrale de puissance sur les longueurs d'onde visibles en utilisant trois fonctions de pondération linéairement indépendantes pour définir trois canaux. Ainsi, l'on peut par exemple construire un espace colorimétrique fictif ABC en définissant trois fonctions de pondération $a(\lambda)$, $b(\lambda)$, $c(\lambda)$ comme suit :

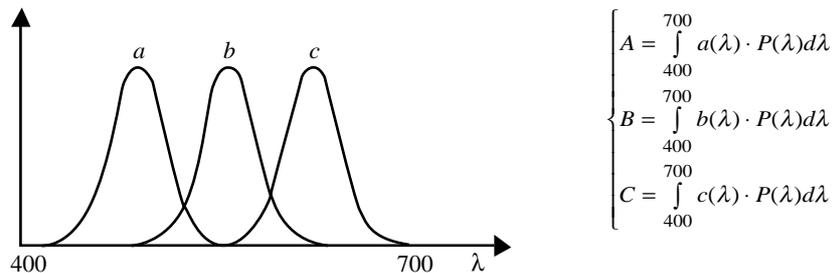


Figure 1.7. Définition d'un espace colorimétrique fictif

Par suite, toute transformation, linéaire ou non, d'un espace colorimétrique ainsi construit sera également un espace colorimétrique. Il en existe donc une infinité, mais on se contentera dans ce qui suit de ne présenter que certains couramment rencontrés.

1.3.4. Étude d'espaces colorimétriques classiques, le RVB, l'ITS et le $L^*a^*b^*$

1.3.4.1. L'espace RVB

C'est l'espace colorimétrique le plus rencontré ; il est utilisé en particulier pour les écrans d'ordinateurs ou de téléviseurs, sous forme de synthèse dite « additive » (par opposition à la synthèse « soustractive » obtenue en partant

d'une lumière blanche et en lui soustrayant une partie du spectre par des filtres, ce qui est par exemple le cas en imprimerie, où chaque encre se comporte comme un filtre sur le papier blanc). Sa définition repose sur le choix de trois primaires : le rouge, le vert et le bleu.

D'un point de vue informatique pratique, l'espace RVB est représenté comme un cube discrétisé de 255 unités de côté. Toutes les couleurs réalisables pour les applications informatiques sont donc représentées par un triplet (R,V,B) de l'espace discret $[0 \dots 255] \times [0 \dots 255] \times [0 \dots 255]$. À noter la particularité de la première diagonale du repère où se répartissent les couleurs dont les trois canaux R, V et B ont la même valeur : c'est l'axe des gris ou axe achromatique.

Cet espace ne présente pas de particularité notable, mais c'est celui que nous impose l'environnement matériel courant : la grande majorité des images en vraies couleurs susceptibles de faire l'objet de traitements sont codées dans ce système. De fait, on présentera à titre d'exemple les méthodes de conversion depuis RVB vers un système très courant, l'espace ITS.

1.3.4.2. L'espace ITS

1.3.4.2.1. Définitions

L'Intensité, la Teinte et la Saturation, qui constituent les trois composantes de ce système, sont des notions relativement intuitives qui permettent de mieux décrire l'expérience de la couleur. Des définitions plus ou moins théoriques peuvent en être données.

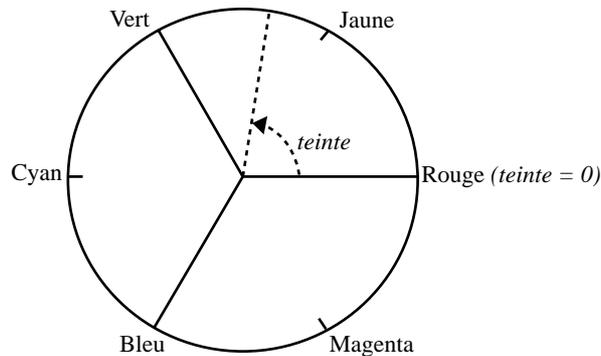


Figure 1.8. Répartition des couleurs de base sur le cercle des teintes

L'intensité peut être présentée comme une mesure linéaire de la puissance de la lumière émise par l'objet qui produit la couleur. Elle permet naturellement de distinguer les couleurs sombres des couleurs claires.

La teinte est définie par la CIE (Commission internationale de l'éclairage) comme l'attribut de la perception visuelle selon lequel une zone apparaît similaire à une des couleurs parmi le rouge, le jaune le vert et le bleu ou à une combinaison de deux d'entre elles. Il s'agit d'une sorte d'indice de similitude aux couleurs connues et sur lesquelles il est facile de s'accorder. Selon cette donnée, les couleurs peuvent se représenter sur un cercle. Le rouge, le vert et le bleu y sont équirépartis (le rouge ayant par convention une teinte nulle). La figure 1.8 illustre cette répartition.

La saturation, enfin, permet de déterminer la pureté d'une couleur. C'est en faisant varier la saturation d'une couleur de teinte nulle par exemple, que l'on va aller du rouge pur (le plus saturé) – que l'on peut placer sur la circonférence du cercle des teintes – vers le gris neutre au centre en passant par tous les tons roses le long du rayon du disque. D'un point de vue plus physique, on peut dire que si la longueur d'onde dominante d'un spectre de distribution de puissance définit la teinte de la couleur, alors, plus ce spectre sera centré autour de cette longueur d'onde, plus la couleur sera saturée.

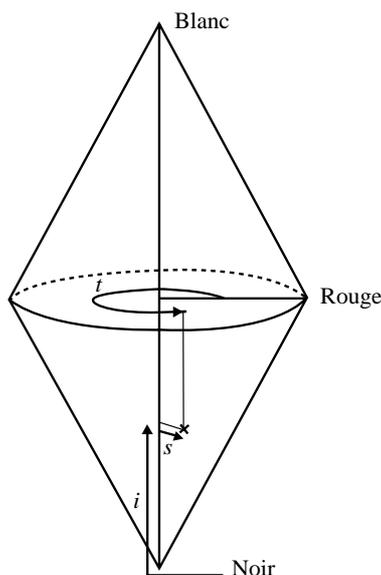


Figure 1.9. Représentation théorique de l'espace ITS

Compte tenu de ces définitions, les couleurs spécifiées dans l'espace ITS (HSV en anglais) peuvent se représenter dans un espace cylindrique et se répartissent dans un double cône dont on donne la représentation sur la figure 1.9.

1.3.4.2.2. Distance dans l'espace ITS

Pour pouvoir exploiter cet espace pour des applications de traitement, il faut définir une distance. Naturellement, la distance euclidienne n'y a aucun sens, la non-linéarité évidente de sa topologie cylindrique, en particulier les discontinuités rencontrées au voisinage de l'axe d'intensité et au passage de la teinte nulle sont rédhibitoires. On a convenu de considérer comme distance entre deux points quelconques dans ce double cône la longueur du plus petit arc d'hélice régulière qu'il est possible de tracer entre eux.

Considérons deux points de l'espace *ITS*, $P_1(I_1, T_1, S_1)$ et $P_2(I_2, T_2, S_2)$. On se place dans un repère euclidien orthogonal dont l'axe vertical (Z) est confondu avec l'axe des intensités et dont le premier axe (X) est dirigé par le vecteur de teinte du point dont l'intensité est la plus petite (supposons qu'il s'agit de P_1). On note ΔI la différence positive d'intensité entre les deux points (soit dans notre cas $\Delta I = I_2 - I_1$), ΔS la différence de saturation ($\Delta S = S_2 - S_1$) et θ le plus petit secteur angulaire défini par les deux angles de teintes.

On se place alors dans la situation illustrée par la figure 1.10. où l'on a précisément représenté l'arc d'hélice dont on doit calculer la longueur :

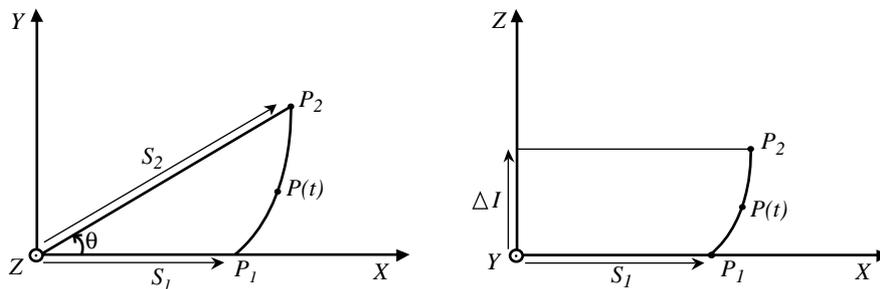


Figure 1.10. Portion d'hélice pour calculer une distance dans l'espace colorimétrique ITS

On peut dans ces conditions proposer la représentation paramétrique suivante de cet arc :

$$P(t) = \begin{cases} X(t) = (S_1 + t \cdot \Delta S) \cos(t \cdot \theta) \\ Y(t) = (S_1 + t \cdot \Delta S) \sin(t \cdot \theta) \\ Z(t) = t \cdot \Delta I \end{cases}$$

La longueur de l'arc est alors donnée par le calcul de l'intégrale curviligne $D_h = \int_0^1 \left\| \frac{\partial P(t)}{\partial t} \right\| dt$ qui fournit le résultat suivant :

$$D_h = \frac{1}{2\Delta S} \cdot \left[\begin{aligned} & \left(S_2 \cdot \sqrt{\Delta S^2 + \Delta I^2} + S_2 \cdot \theta^2 - S_1 \cdot \sqrt{\Delta S^2 + \Delta I^2} + S_1 \cdot \theta^2 \right) \\ & + \frac{\Delta S^2 + \Delta I^2}{\theta} \cdot \left(\operatorname{argsh} \left(\frac{S_2 \cdot \theta}{\sqrt{\Delta S^2 + \Delta I^2}} \right) - \operatorname{argsh} \left(\frac{S_1 \cdot \theta}{\sqrt{\Delta S^2 + \Delta I^2}} \right) \right) \end{aligned} \right] \quad [1.31]$$

1.3.4.2.3. Mise en œuvre technique de l'espace ITS

Il n'existe pas un unique espace ITS à proprement parler, mais de nombreuses définitions ou spécifications dérivées. En effet, plusieurs quantités déduites par exemple des valeurs R , V et B d'une couleur spécifiée dans l'espace RVB peuvent correspondre aux définitions très subjectives de teinte, d'intensité et de saturation qui ont été données. Conceptuellement, tous ces espaces sont bien les mêmes, au sens où ils répondent tous au besoin de spécifier facilement une sensation de couleur en termes de teinte, d'intensité et de saturation ou de notions voisines et équivalentes.

La définition la plus couramment utilisée est celle que l'on trouve par exemple chez Gonzales [GON 93] : le calcul s'effectue sur des valeurs r , v et b comprises entre 0 et 1 (il s'agit des valeurs R , V et B de départ divisées par 255). Si $r = v = b$, la couleur considérée est une nuance de gris, et l'on impose par convention : $t = s = 0$; ceci n'affecte en rien le caractère réversible de la transformation.

$$i = \frac{r + v + b}{3} \quad , \quad t = \begin{cases} \arccos \left(\frac{(r - v) + (r - b)}{2 \cdot \sqrt{(r^2 + v^2 + b^2 - rv - vb - br)}} \right) , & \text{si } v \geq b \\ 2\pi - \arccos \left(\frac{(r - v) + (r - b)}{2 \cdot \sqrt{(r^2 + v^2 + b^2 - rv - vb - br)}} \right) , & \text{si } b > v \end{cases}$$

$$s = 1 - \frac{\min\{r, v, b\}}{i} \quad [1.32]$$

1.3.4.3. L'espace $L^*a^*b^*$

$L^*a^*b^*$, défini par la CIE en 1976, a pour but de fournir un espace de travail dans lequel la distance euclidienne ait un sens réel : il s'agissait de développer un espace uniforme à la perception, c'est-à-dire dans lequel deux verts et deux bleus séparés par la même distance induiraient la même sensation de différence pour l'œil humain, ce qui ne sera pas le cas par exemple dans le système de base RVB, attendu que nous avons une plus grande sensibilité dans les bleus que dans les verts. Cette affirmation a été vérifiée par l'expérience des appariements chromatiques de Wyszecki [WYS 82] dont les résultats sont présentés sur le diagramme chromatique de la figure 1.11. Les ellipses qui y sont tracées (dont la taille a été néanmoins exagérée) représentent, en fonction de la position dans le diagramme, les zones dont les couleurs n'ont pas pu être discernées par les observateurs.

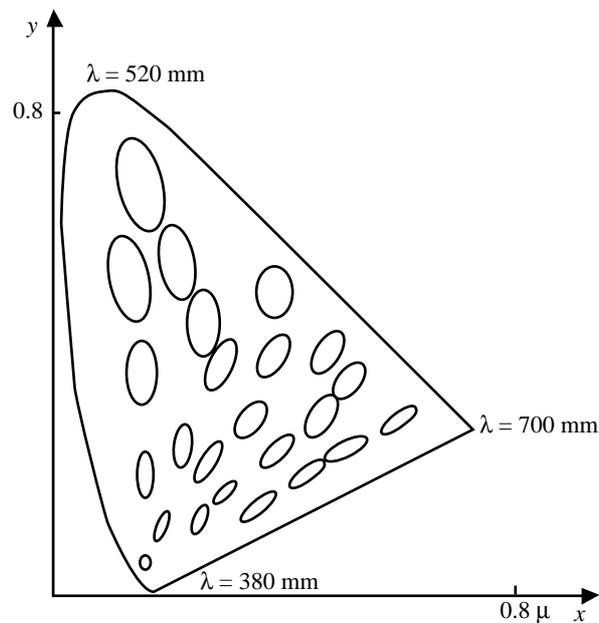


Figure 1.11. Discernement des couleurs dans le diagramme chromatique

La transformation vers $L^*a^*b^*$ tendra à déformer l'espace, de sorte que ces ellipses deviennent des cercles de rayon constant sur l'ensemble du diagramme. C'est cette propriété importante de linéarité de perception qui forme son intérêt essentiel : si l'on travaille dans une métrique qui reproduit les mécanismes de la vision humaine, on peut s'attendre à ce que le résultat des segmentations

obtenues soit relativement satisfaisant au sens où il correspondra alors davantage aux délimitations qu'un opérateur humain aurait pu tracer à la main en voyant l'image.

1.3.5. Répartition des couleurs d'une image dans les différents espaces

Afin de replacer cette étude des espaces colorimétriques dans le contexte du traitement d'images, nous avons trouvé intéressant de représenter une image dans ces différents espaces. Naturellement, quel que soit l'espace dans lequel l'image est codée, son aspect doit rester le même, mais il n'en est rien de la distribution de ses couleurs dans les espaces trois dimensions de représentation des couleurs.

On considère à titre d'exemple la photographie aérienne de zone urbaine suivante :



Figure 1.12. Exemple d'image (présentée ici en noir et blanc)

On donne ensuite la représentation du nuage des couleurs qui y sont présentes dans plusieurs espaces colorimétriques classiques, dont ceux vus précédemment (cf. figure 1.13).

Cette comparaison horizontale impose une constatation : si le nuage de points conserve, à l'orientation près, la même allure dans les deux espaces qui dérivent linéairement de RVB (KL et XYZ), sa géométrie dans les deux espaces uniformes de la CIE ($L^*a^*b^*$ et $L^*u^*v^*$) est radicalement différente. Le changement d'espace a pour conséquence une modification profonde de la métrique qui peut permettre d'anticiper des résultats très variables pour les applications de traitements automatiques selon l'espace de travail choisi.

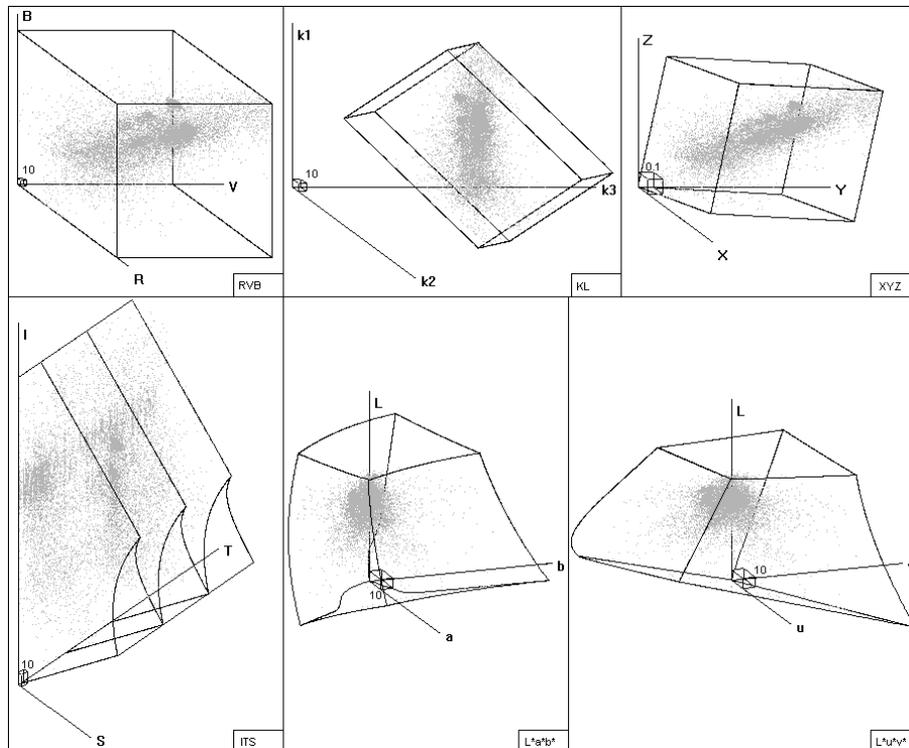


Figure 1.13. Répartition des couleurs de l'image dans les différents espaces colorimétriques

1.3.6. Conclusion

Il est donc important de ne pas sous-estimer les problèmes posés par l'emploi de la couleur en imagerie numérique, en particulier pour les traitements photogrammétriques. Il s'agit au minimum de savoir exploiter le passage d'un espace à une dimension (le noir et blanc) à un espace à au moins trois dimensions. Il est certain qu'il y aura dans peu d'années à disposition des usagers des images spatiales à pixel petit, intéressant donc les photogrammètres, et disposant de plus de trois bandes spectrales. Les traitements mis au point pour le noir et blanc pourront toujours être réemployés avec des images multispectrales, mais ce sera au prix d'une perte considérable d'informations. En fait, il faudra systématiquement reprendre à zéro l'analyse du phénomène étudié pour tirer le meilleur parti possible des bandes spectrales disponibles, et dans cette optique, il faudra chaque fois adopter un espace de couleurs avec une métrique adaptée au problème posé : compression d'image,

corrélation automatique, segmentation automatique, reconnaissance de formes automatique, etc. Ici nous avons présenté certaines particularités de la colorimétrie trichrome, parce qu'elle a nécessairement été très bien étudiée pour l'œil humain. Il faut donc bien noter qu'un travail équivalent devra être mené pour un nombre différent de bandes spectrales, à chaque fois que le cas se présentera.

1.4. Géométrie des images aériennes et spatiales⁴

Les images numériques utilisables en photogrammétrie proviennent actuellement de trois sources : les photographies argentiques traditionnelles numérisées, les images numériques issues de caméras DTC à matrices ou à barrettes aéroportées, et les images spatiales à haute et très haute résolution (entre 10 m et 0.8 m de taille de pixel), elles aussi à matrices ou à barrettes. Les géométries de ces différents types d'images sont assez variées, et seront présentées ici en fonction de leurs particularités.

1.4.1. Images à *champ large* et images à *champ étroit*

Ce qui distingue les images d'origine spatiale de celles issues de capteurs aéroportés est uniquement le champ angulaire, évidemment beaucoup plus étroit dans le cas des premiers cités. Ceci a ensuite une influence sur plusieurs aspects des images, en particulier :

– sur la direction d'observation qui est à peu près constante dans une image par rapport au rayonnement solaire pour les capteurs spatiaux, alors qu'elle varie considérablement dans le cas des images à champ large. C'est ainsi que l'on met en évidence un phénomène de zone brillante, appelée « hot spot » en anglais, et qui est lié au fait que lorsque la direction d'observation se rapproche de la direction du rayonnement solaire, on n'observe évidemment plus aucune zone d'ombre quelle que soit la rugosité du sol, ou du sursol formé par la végétation ou les bâtiments. Cette direction a une probabilité très faible de se rencontrer dans une image en champ étroit ; en revanche, on la rencontre très souvent dans des images aériennes en champ large dès que le soleil est haut sur l'horizon, et elle se matérialise par une zone de l'image où la réflectance du sol devient bien plus élevée qu'ailleurs. Par ailleurs, la direction de réflexion du soleil sur les surfaces d'eau libre est, pour les mêmes raisons de taille du champ de vision du capteur, susceptible de provoquer un éblouissement ponctuel des capteurs à champ large, situation qui est statistiquement peu fréquente sur les imageurs spatiaux à haute résolution ;

4. Cette section a été rédigée par Michel KASSER.

– sur les phénomènes de réfraction : les rayons lumineux captés par un imageur spatial sont pratiquement tous parallèles (le champ angulaire d'Ikonos, lancé en 1999 est de 0.9°), et les phénomènes de réfraction différentielle entre les rayons extrêmes sont très faibles, sinon négligeables. Cette réfraction, malgré tout, n'a que très peu d'effet sur le pointage absolu du capteur dans l'espace, puisqu'elle n'induit une courbure que dans les derniers kilomètres près du sol, donc avec un effet angulaire négligeable depuis le satellite qui est entre 500 et 800 km de distance au minimum. Ces aspects sont tout à fait différents pour les imageurs aéroportés à champ large (cf. section 1.1) ;

– en revanche, sur les phénomènes liés à la diffusion atmosphérique (cf. section 1.2.), il n'y a aucune différence entre une image obtenue sur un capteur aéroporté volant à une altitude supérieure à 4 ou 5 km et une image obtenue à bord d'un satellite, puisque, dans les deux cas, toute la couche diffusante a été traversée ;

– l'acquisition de scènes stéréoscopiques se fait en avion de façon très simple, essentiellement parce que l'avion ne peut guère acquérir d'images que lorsqu'il est sur un axe rectiligne. En fonction du taux de recouvrement longitudinal souhaité et de la vitesse de l'avion par rapport au sol, on choisit une cadence de déclenchement des acquisitions d'images. Et l'axe de prise de vue est pratiquement vertical dans tous les cas. Par contre, sur un satellite on peut obtenir une stéréoscopie selon plusieurs modes, le long de la trace ou entre deux orbites différentes. Lorsqu'on travaille en stéréoscopie le long de la trace (stéréoscopie dite « avant-arrière » entre deux instruments semblables pointés vers l'avant et l'arrière, ou avec un instrument capable de se dépointer très vite dans le sens de la trace), compte tenu de la vitesse du satellite sur son orbite (de l'ordre de 7 km/s), les images sont sensiblement synchrones. Dans ce cas, la direction de la base stéréoscopique est forcément celle de la trace du satellite, qui est imposée par les lois de la mécanique céleste et qui est à peu près impossible à changer. Mais une même scène peut être imagée depuis plusieurs orbites en exploitant des possibilités de dépointage latéral du satellite depuis son orbite, et il peut alors s'écouler un temps considérable entre les acquisitions, ce qui complique parfois beaucoup le travail de restitution : par exemple la position du soleil est différente et donc les ombres ont beaucoup changé (ce qui induit des difficultés avec les corrélateurs automatiques), la végétation a évolué (repousse ou perte des feuilles), les cultures sont complètement différentes, les niveaux d'eau dans les fleuves, les lacs, voire la mer (marées) ne sont plus les mêmes, les véhicules ont changé de place, etc. Pour acquérir les images le plus vite possible, les satellites sont obligés d'avoir recours au dépointage latéral ainsi qu'à la stéréoscopie avant-arrière, mais il faut bien en comprendre toutes les conséquences pour les images acquises lorsqu'on envisage des traitements photogrammétriques.

1.4.2. Géométries des images dans les capteurs

Il y a essentiellement deux géométries de capteurs parmi ceux qui sont employés pour des traitements photogrammétriques : la géométrie conique et la géométrie cylindro-conique.

1.4.2.1. Géométrie conique : utilisation de films ou de matrices DTC

Elle est bien connue, puisque c'est aussi bien celle de la vision humaine que celle employée depuis l'invention par Niepce de la photographie ou par les frères Lumière du cinéma. Elle implique essentiellement un mécanisme séquentiel pour acquérir une image : un temps d'exposition très bref, suivi d'un temps mort techniquement nécessaire pour réapprovisionner une longueur vierge de film, ou pour transférer et stocker les valeurs numériques correspondant à chaque pixel sur caméra numérique. Ce temps mort est mis à profit sur les satellites pour réorienter le système de visée afin d'imager le plus de scènes possibles par rapport au plan de travail qui est demandé.

Si le temps d'exposition nécessaire est trop long, il se produit un phénomène de « filé », parce que l'image bouge continuellement dans le plan focal avec le mouvement de l'avion ou du satellite, ce qui transforme l'image d'un point en un petit segment. Pour corriger cet effet, la correction de filé sur les chambres utilisant des films argentiques se fait en bougeant le film pendant la période d'exposition. Ce film est en effet aspiré par dépression sur une surface bien plane (le fond de chambre), et un mécanisme met en mouvement ce fond de chambre de façon à lui faire accompagner le mouvement de l'image dans le plan focal pendant la courte période d'ouverture de l'obturateur. Pour les matrices DTC, c'est encore plus simple, il suffit de provoquer un transfert des charges à vitesse adaptée pour qu'un paquet de charges donné ait été créé par une seule tache élémentaire au sol : au fur et à mesure que l'image de cette tache se déplace, on fera mouvoir les charges créées à la même vitesse. La correction de filé, dans ces deux cas présentés, exige absolument la connaissance du vecteur vitesse de l'image dans le plan focal, ainsi qu'une orientation mécanique générale du capteur pour que sa capacité de compensation du filé soit parallèle à ce vecteur vitesse. Il n'est pas forcément facile de connaître ce vecteur vitesse dans un avion, puisque la dérive de l'avion sous l'effet de vents latéraux doit aussi être connue. Ces paramètres de vitesse pourront évidemment avantageusement être fournis par le système de navigation de l'avion, actuellement le GPS. Sur un satellite, ces paramètres sont directement déduits de l'orbite parcourue et des coordonnées de la scène visée.

1.4.2.2. Géométrie cylindro-conique : utilisation de barrettes DTC

Cette géométrie, bien connue en télédétection (radiomètres aéroportés, satellites Landsat...), a été aussi pratiquée en photogrammétrie grâce à des satellites Spot sans discontinuer depuis 1986, puis sur Ikonos depuis 1999. Cette géométrie est obtenue naturellement par chaque capteur linéaire (barrette DTC) placé au foyer de l'optique perpendiculairement au vecteur vitesse de l'image dans le plan focal. C'est donc l'avancement de l'avion ou du satellite qui permet de décrire l'une des dimensions de l'image. Les particularités géométriques de ces capteurs employés en photogrammétrie reposent surtout sur la plus ou moins bonne constance dudit vecteur vitesse.

Dans un satellite, la trajectoire est localement très exactement une orbite keplerienne, il n'y a aucun aléa à craindre sur le paramètre de position. Par contre, le satellite est souvent équipé de panneaux solaires qui se réorientent fréquemment de façon automatique grâce à de petits moteurs, ce qui crée en contrecoup de petits changements d'attitude. Et il est généralement impossible de garantir une stabilité parfaite du pointé pendant l'acquisition d'image, ce qui se traduit par une petite distorsion, qui pourra être corrigée lors des traitements géométriques les plus poussés.

Mais sur un avion, les petits mouvements en roulis, tangage et lacet sont permanents, avec une amplitude et une fréquence qui dépendent directement de la turbulence de l'air. On a donc recours obligatoirement à un enregistrement permanent au moins de l'attitude, sur les trois axes, du capteur. En fait, on est également amené à mesurer en permanence les coordonnées tridimensionnelles aussi précises que possible du centre optique du capteur, en utilisant le système inertiel et un récepteur GPS précis dont les données sont tout à fait complémentaires. Une fois les données acquises, on peut alors reconstituer l'image comme on l'aurait acquise si la trajectoire de l'avion avait été parfaitement régulière. Mais cette correction, malgré les efforts menés en la matière en utilisant d'excellentes centrales inertielles, ne parvient pas à corriger parfaitement ces mouvements dès qu'il y a un peu de turbulence, ce qui est très souvent le cas pour des levés urbains, généralement effectués à basse altitude et donc dans une zone de vol assez instable. Ceci se traduit par des arêtes de bâtiments qui ne sont pas rectilignes, et finalement par des distorsions d'images résiduelles qui peuvent atteindre couramment plusieurs pixels. En particulier, il peut y avoir de véritables lacunes de données, dues à des mouvements angulaires trop rapides de l'avion, et à l'inverse des repliements de l'image, un point étant imagé sur plusieurs lignes. De telles discontinuités sont parfois impossibles à corriger par calcul et la seule ressource possible est alors de « combler » ces lacunes par des interpolations entre bandes voisines, mais ce n'est effectivement pas très satisfaisant en termes de qualité d'image. Le seul

recours possible pour éviter de telles situations consiste à installer le capteur sur une plate-forme asservie corrigeant en temps réel les mouvements de l'avion, ce qui est évidemment à l'origine d'un surcoût considérable pour le matériel embarqué.

En contrepartie, cette technologie permet de combiner les données venant de plusieurs barrettes DTC, avec virtuellement pas de limite au nombre de pixels mesurés le long d'une ligne.

Dans cette géométrie cylindro-conique, il faut bien noter un point, qui est absolument capital dans les usages photogrammétriques des images acquises. Contrairement à ce qui se produit dans une géométrie conique, les points ne sont jamais vus sur plusieurs images consécutives, puisqu'en fait chaque ligne de données est géométriquement indépendante de la précédente. Ceci rend obligatoire la connaissance exacte de la trajectoire, et la détermination d'une quantité considérable d'inconnues (typiquement plus d'un millier par seconde) pour pouvoir mettre en correspondance des groupes de points vus par les différentes barrettes. La trajectographie et l'attitude sont donc des éléments essentiels de la géométrie permettant de reconstituer le relief, et la seule donnée des images n'est pas suffisante pour procéder à une restitution photogrammétrique. La seule validation possible de ces paramètres de trajectoire, qui deviennent ici tellement importants, consiste effectivement à utiliser trois directions d'observation afin d'en tirer une certaine redondance de détermination du MNT, ce qui valide en grande partie l'ensemble des paramètres introduits dans le calcul. Ce point est fondamentalement différent de la géométrie habituelle avec les caméras traditionnelles, puisque la base stéréoscopique n'a alors pas besoin d'être connue (même si on peut trouver un intérêt économique appréciable à employer un récepteur GPS dans l'avion ainsi qu'une centrale inertielle pour obtenir une orientation absolue des images et donc se passer assez largement de points de référence au sol toujours coûteux à déterminer), et qu'elle est de toutes les façons redéterminée par le calcul lorsqu'on forme le modèle.

Les images obtenues par de tels dispositifs peuvent être acquises en bandes très longues, de façon continue si besoin est, ce qui supprime les soucis de raccords entre les images dans le sens longitudinal, parallèle à l'axe de vol. Le découpage en clichés successifs est donc artificiel et peut être modifié par l'utilisateur sans aucun problème. Notons ici qu'une calibration très rigoureuse de la réponse des différents pixels est, comme pour les scanners de numérisation de photographies aériennes, absolument nécessaire, sous peine de former dans les images des artefacts linéaires très désagréables pour les usagers. C'est ainsi que le satellite Ikonos a inclus un dispositif de calibration activé séquentiellement, qui expose l'ensemble des pixels du capteur à la lumière solaire.

Comme pour les systèmes matriciels, la stéréoscopie peut être obtenue en mode « avant-arrière », mais aussi pour des satellites en exploitant des visées latérales (cas des satellites Spot). Les systèmes aéroportés suivent le principe de stéréoscopie « avant-arrière » et sont décrits au paragraphe 1.5.2.

La géométrie cylindro-conique exige des algorithmes assez différents de ceux employés en géométrie conique classique pour la restitution photogrammétrique. Ces algorithmes ont été largement explorés pour la restitution des images Spot dès les années 80. Néanmoins ils restent peu connus et interdisent *de facto* l'emploi de matériels et de logiciels qui ne seraient pas conçus pour cette géométrie, ce qui empêche ainsi l'emploi de ces données sur les appareils de restitution qui n'intègrent pas cette possibilité.

1.4.3. Conclusion

Les différentes géométries employées pour acquérir des images ont des conséquences importantes lorsqu'il s'agit d'en faire ensuite un traitement photogrammétrique. Il ne s'agit souvent pas de points de détail, puisque, si l'on ne prend pas les précautions voulues, on peut aisément se retrouver dans l'impossibilité de valider de façon interne les résultats obtenus. Une grande attention doit donc être portée aux conséquences pratiques des choix d'images, en particulier avec la venue sur le marché d'images spatiales apparemment très semblables à des images aériennes, mais qui ont de tout autres propriétés géométriques. Dans le domaine de l'imagerie aéroportée à champ large, les systèmes à barrettes sont surtout destinés à fournir de l'image à très haute résolution mais dont la métrique n'est pas très critique (pour de la photo-interprétation par exemple). En revanche, les systèmes matriciels, fournissant une géométrie extrêmement rigoureuse, seront bien plus adaptés à des utilisations photogrammétriques.

1.5. Acquisition d'images numériques par des caméras aéroportées à DTC⁵

1.5.1. Introduction

Actuellement la plupart des processus de photogrammétrie se tournent vers un emploi le plus large possible d'images sous forme numérique. Compte tenu de la fiabilité et de la qualité des matériels de prise de vues aériennes employés depuis maintenant plusieurs décennies, mais aussi compte tenu de l'excellente connaissance que nous avons des défauts de cette chaîne d'acquisition des images, les laboratoires de recherche et les constructeurs ont sagement

5. Cette section a été rédigée par Michel KASSER.

commencé par un réemploi des acquis antérieurs. Ils ont donc proposé de numériser les images obtenues lors de prises de vues aériennes sur film argentique traditionnel. Néanmoins cette solution n'est qu'une solution d'attente, et comme nous le verrons en section 1.8, la scannérisation de films est une opération délicate, assez onéreuse, et qui apporte son propre lot de dégradations aux images. C'est donc tout naturellement que des recherches ont été menées depuis les années 80 au DLR en Allemagne initialement pour l'exploration martienne, puis en France depuis 1990, pour obtenir des images directement numériques au sein même de l'avion. Les recherches se sont orientées dans deux directions simultanées, utilisant toutes les deux des dispositifs à transfert de charge (DTC, ou CCD en anglais) : les barrettes, suivant le modèle de capteur popularisé par les imageurs spatiaux de type SPOT, en tirant parti de l'avancement de l'avion pour balayer une des dimensions de l'image, et les matrices, qui sont une recopie moderne conceptuellement assez simple de la photographie traditionnelle.

Ces deux directions de recherche ont donné lieu à des réalisations d'abord de laboratoires (capteur HRSC à plusieurs barrettes du DLR, caméras matricielles de l'IGN-F), puis à des réalisations industrielles (ADS 40 de LH Systems et MDC de Zeiss Intergraph). Les premières études ont montré de façon assez nette les champs d'intérêt de ces deux techniques, ainsi que leurs limitations. Par ailleurs, elles ont aussi montré combien la communauté des photogrammètres avait des difficultés à imaginer l'avenir avec des outils très différents des anciens : cette communauté est prête à remplacer un maillon de la chaîne photogrammétrique à la fois, mais pas plus, ce qui du reste est fort compréhensible. Elle a par exemple clairement montré ses inquiétudes, non par rapport à des images directement numériques, mais par rapport à des situations entièrement nouvelles où son savoir-faire empirique serait à reconstituer en partant de zéro, en particulier en se mettant entièrement à la merci des éditeurs de logiciels. Par exemple, les systèmes à barrettes donnent une géométrie d'image assez différente à traiter.

Les caméras numériques développées selon ces deux grands types sont présentées sommairement ci-après (*cf.* figures 1.14 à 1.16 et cahier couleur). Elles ont en commun l'emploi de DTC, qui offrent une extraordinaire linéarité de réponse lumineuse si l'on compare avec les processus argentiques habituels : il s'agit de véritables radiomètres, parfaitement étalonnables, qui rendent par exemple beaucoup plus faciles les raccords radiométriques entre clichés voisins lors de la réalisation de mosaïques ou d'orthophotographies. L'avantage de cette linéarité est aussi très clair lorsqu'il s'agit de supprimer par traitement numérique le voile atmosphérique : cette opération est extrêmement simple et efficace avec des capteurs DTC, alors qu'elle est impossible à automatiser sur des clichés argentiques couleur.

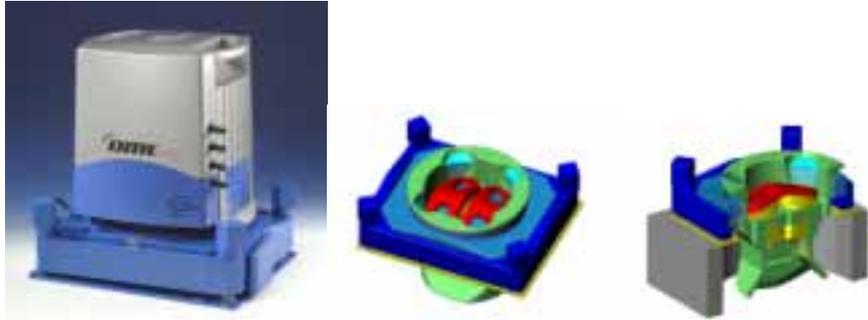


Figure 1.14. La Digital Modular Camera DMC 2001 de Zeiss-Intergraph

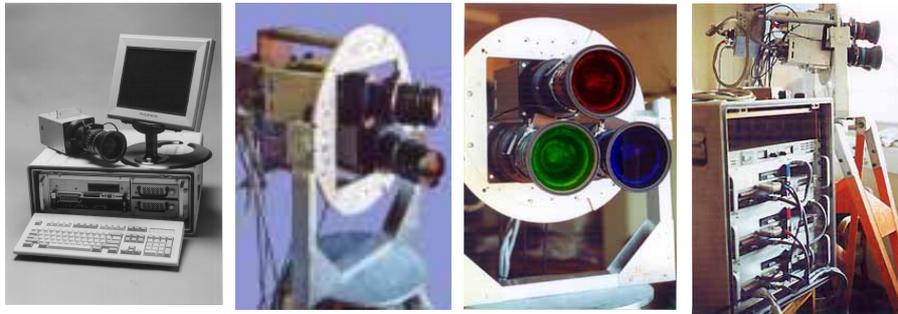


Figure 1.15. Trois caméras numériques de l'IGN-F : (de gauche à droite) avec une (1995), avec deux et avec trois caméras séparées (2000), utilisant des matrices KAF 6300 (2k x 3k pixels) ou KAF 16800 (4k x 4k), ou KAF 16801 (4k x 4k avec anti-éblouissement) de chez Kodak

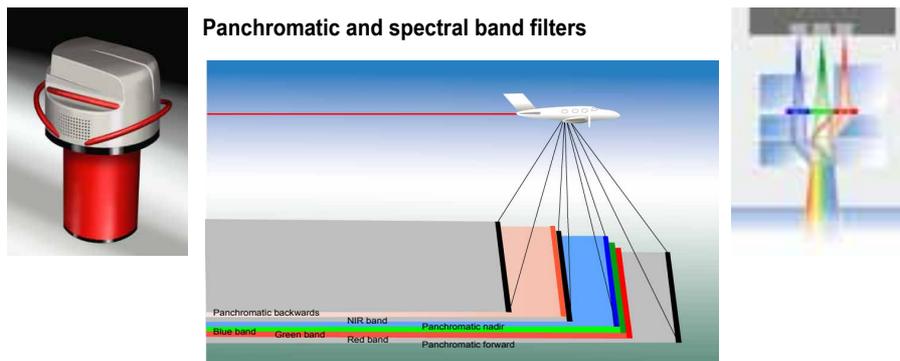


Figure 1.16. La ADS-40, caméra numérique de Leica-Helava (gauche), les lignes DTC observant diverses longueurs d'ondes (centre), et le sous-système optique pour répartir la lumière visible en 3 couleurs RVB (droite)

Voir aussi cahier couleur

Actuellement les deux solutions (barrettes et matrices) semblent avoir des domaines d'applications un peu différents, et comme nous l'avons déjà évoqué en section 1.4, les systèmes à barrettes sont surtout destinés à fournir de l'image à très haute résolution mais dont la métrique n'est pas très critique (pour de l'exploitation purement visuelle et sans mesures précises par exemple, qui représente une très grande partie du marché de l'imagerie aérienne). Par contre, les systèmes matriciels, fournissant une géométrie extrêmement rigoureuse (et même bien meilleure que ce que l'emploi de photographies argentiques, numérisées ou non, a permis), sont bien plus adaptés à des utilisations photogrammétriques. Mais seule la réaction du marché durant plusieurs années à ces offres permettra de conclure valablement, et il n'est pas encore possible aux auteurs de pousser plus loin l'analyse à l'heure de la rédaction de cet ouvrage. Certains éléments d'analyse déjà présentés en section 1.4 ne seront pas repris ici, et nous y renvoyons le lecteur si besoin est.

1.5.2. Capteurs DTC en barrette

C'est afin de préparer une mission vers Mars, qui finalement n'a pas volé, que le DLR (Allemagne) a étudié de façon très approfondie l'outil HRSC (High Resolution Stereo Camera). Cet outil, qui a donc été conçu pour des applications spatiales, a ensuite été essayé avec succès dans des missions aéroportées. Il est employé industriellement depuis 1999 en production au sein de la société Istar (France), et la caméra numérique ADS 40 de LH Systems est basée sur les mêmes concepts.

Le principe est le suivant : au plan focal d'une optique de grande qualité est installé un ensemble de barrettes, qui permettent à un instant donné d'imager le sol dans plusieurs directions. Le prototype de l'ADS 40 [fri 99] utilise par exemple quatre barrettes ou groupes de barrettes de 12 000 éléments, l'une qui image à la verticale de l'avion, et chacune des autres qui image suivant un angle fixe par rapport à la verticale (plusieurs angles sont possibles, selon les usages recherchés) vers l'avant et vers l'arrière de l'appareil. Ainsi, un point du sol est vu successivement sous trois angles différents, ce qui bien évidemment permet ensuite une reconstitution stéréoscopique du relief. Certains de ces capteurs travaillent en mode panchromatique, d'autres sont équipés de filtres spectraux. Certaines barrettes employées en mode panchromatique sont formées de deux barrettes juxtaposées, décalées d'un demi-pixel, ce qui peut permettre de reconstruire l'équivalent du signal fourni par une barrette de 24 000 pixels. On est alors en présence d'une résolution qui est sans commune mesure avec aucun autre capteur aéroporté jamais employé, même si la qualité géométrique de telles images autorise quelques distorsions.

Compte tenu de la trajectoire de l'avion, qui est bien entendu assez aléatoire et sujette à des mouvements imprévisibles et importants, il est nécessaire de connaître dans l'espace à tout instant et avec une très grande précision la position réelle des capteurs : ce problème, qui ne se pose guère à bord d'un satellite (dont la trajectoire est extrêmement stable), implique pour un avion l'emploi de systèmes additionnels puissants capables de corriger en temps différé les effets des mouvements de l'avion dans l'image enregistrée, qui serait sans cela complètement inexploitable. Pour ce faire, on adjoint au système une centrale inertielle ainsi qu'un capteur GPS, la fusion des données issues de ces deux sources exploitant un filtrage de Kalman. Notons tout de même que le couplage GPS + centrale inertielle ne permet pas forcément de recalibrer de façon satisfaisante l'axe de lacet de l'avion : celui-ci ne serait bien déterminé par le filtre de Kalman que si l'avion ne restait pas longtemps en ligne droite, ce qui est malencontreusement inévitable. Et les systématismes à longue distance du GPS (par exemple s'il est employé en mode trajectographie), se répercutent intégralement dans le lever réalisé. En outre, il ne faut pas surestimer les performances opérationnelles du GPS, et de très courtes pertes de signal peuvent se produire en vol, qui conduisent lors du traitement à des interruptions brèves du recalage de la centrale inertielle : ceci crée de façon quasi immédiate une série de déformations irrécupérables de l'image acquise. Il n'est donc pas envisageable d'obtenir une précision géométrique, exprimée en pixels, comparable à ce que la photographie numérique fournit habituellement avec des imageurs en perspective conique. Typiquement on peut compter dans des cas équivalents sur des erreurs résiduelles de plusieurs pixels sur les images obtenues sur des capteurs à barrettes, contre 0.1 pixel sur des images matricielles.

Les résultats publiés en 2000 montrent que les limitations et les attraits de ce type de capteur (ADS 40) sont typiquement les suivants :

- possibilité d'imager avec un nombre de points résolus au sol assez voisin de celui fourni par des photographies aériennes argentiques scannérisées (12 000 pixels de fauchée sont à peu près équivalents à ce que fournit une photographie aérienne 24 cm x 24 cm scannérisée à 20 μ m de pixel) ;
- les distorsions géométriques dues aux insuffisances des systèmes inertiels sont faibles, mais restent généralement visibles (quelques pixels) : la métrique de l'image présente donc de légers défauts ;
- la dynamique de l'image est satisfaisante, mais la nécessité de transférer les charges dans la barrette à une vitesse très élevée implique un temps d'exposition très limité, ce qui ne permet pas d'atteindre des dynamiques aussi élevées que sur les matrices. Les images offrent néanmoins une excellente linéarité de réponse ;

– la géométrie des images (perspective cylindro-conique) implique de nouveaux modes de traitements numériques des données, qui semblent tout à fait adaptés à la fabrication automatisée de modèles numériques de surfaces (MNS), mais interdit l'emploi des logiciels standard des stations de photogrammétrie classiques ;

– la restitution de la couleur est obtenue en rajoutant dans le plan focal des barrettes équipées de filtres. Par exemple, la barrette qui image selon la verticale est en fait remplacée par trois barrettes parallèles et très proches équipées des trois filtres habituels RVB. D'autres barrettes peuvent être équipées d'autres filtres, par exemple pour l'infrarouge.

1.5.3. Capteurs DTC matriciels

Le principe de tels capteurs consiste à conserver la géométrie habituelle de la prise de vue classique (perspective conique) et à utiliser une matrice DTC aussi grande que possible dans le plan focal de l'optique. Les recherches menées à l'IGN-F depuis le début des années 90 [THO 99] ont permis de montrer comment de telles images pouvaient s'insérer dans les chaînes photogrammétriques classiques, et quels étaient les limitations et les avantages de telles caméras matricielles :

– les matrices DTC se prêtent très bien à la compensation des effets de filé, et même avec bien plus de simplicité que les caméras aéroportées traditionnelles puisque cela se fait électroniquement, sans aucun mouvement mécanique. Ceci permet d'atteindre des temps de pose longs (plusieurs dizaines de millisecondes au besoin), compatibles avec des éclaircissements très faibles (prises de vues hivernales ou crépusculaires) tout en conservant un excellent rapport signal/bruit ;

– la sensibilité des CCD, couplée à la possibilité d'employer des temps de pose longs, est à l'origine d'une dynamique de l'image qui peut atteindre des valeurs considérables, une numérisation sur 12 bits étant à peine suffisante. C'est évidemment très différent des performances de l'image argentique qui, numérisée dans les meilleures conditions, ne mériterait pourtant guère que 6 bits. Ceci est un atout essentiel pour retirer aisément le voile atmosphérique en post-traitement, pour observer de façon satisfaisante dans les ombres comme dans les zones très lumineuses. C'est aussi un atout essentiel pour les outils de corrélation automatique, puisqu'avec une telle dynamique on ne trouve quasiment plus de surfaces uniformes, de très nombreux détails avec des différences de radiométrie très modestes restant discernables ;

– les matrices les plus grandes commercialement accessibles en 2000 ont des dimensions de l'ordre de 7 000 x 9 000 pixels. Ceci représente un nombre de pixels plus modeste que celui issu d'une image argentique scannérisée.

Néanmoins, les cas d'emploi de telles images à très grande dynamique ont été évalués sur des applications de cartographie courante à moyenne échelle : un service équivalent à une taille donnée de pixel sur une image argentique scannérisée est fourni par un pixel de côté à peu près deux fois plus grand sur une image numérique à très grande dynamique. À service rendu équivalent à une image traditionnelle, correspond donc une image numérique environ deux fois plus petite seulement. Notons qu'avec les remarquables performances de ces images, il serait tout à fait acceptable et logique d'interpoler des pixels de dimension deux fois plus petite, ce qui donnerait ainsi l'équivalent d'une image 8 000 x 8 000 à partir d'une matrice 4 000 x 4 000. On obtiendrait ainsi un contenu assez voisin de celui d'une image argentique numérisée, quoique de radiométrie incomparablement plus linéaire. Néanmoins, pour un chantier donné, ceci peut impliquer malgré tout, selon la taille de matrice choisie, plus d'axes de vol que lors d'une prise de vue classique, ce qui est source de surcoûts. Les développements de matrices de grandes dimensions, par chance, suivent les besoins considérables de photographie numérique grand public, de sorte que leurs évolutions sont rapides. Apparemment, les formats habituels de la photographie amateur (24 x 36) et professionnel (60 x 60) sont actuellement à peu près couverts par les matrices 2 000 x 3 000 et 4 000 x 4 000. Les évolutions probables iront vers une forte diminution des coûts, la trichromie, et peut-être une augmentation des tailles des matrices courantes, mais pas nécessairement très importante (plutôt pour les photographes professionnels, ce qui représente un marché quand même assez réduit), sachant que le stockage de données n'est plus guère une limitation pour ces marchés au niveau actuel de disponibilité de mémoires. La voie choisie par la société ZI (caméra DMC) donne la possibilité de combiner divers sous-ensembles matriciels modulaires basés sur des matrices environ 4 000 x 7 000, permettant de reconstituer des images 8 000 x 14 000, avec éventuellement des matrices supplémentaires équipées de filtres autorisant la restitution des couleurs. Les matrices élémentaires sont équipées d'optiques individuelles visant selon des axes divergents et assurant un recouvrement léger entre chacune des quatre images. La géométrie résultante est équivalente, à environ 0.1 pixel près, à une image acquise d'un seul bloc par une seule optique ;

– la restitution de la couleur peut être obtenue de deux façons : soit sur certaines matrices un ensemble de filtres est déposé directement devant les pixels, soit on utilise trois matrices équipées séparément de filtres. La première solution pose des problèmes délicats de reconstitution de la couleur et exige des logiciels très évolués pour ne laisser que peu d'artefacts (par exemple sur les bordures, ou sur les détails très ponctuels n'éclairant qu'un seul pixel). La seconde solution est plus onéreuse, car elle se traduit finalement par l'équivalent de trois caméras complètes regroupées ensemble, mais elle permet une reconstitution parfaite des couleurs en toutes circonstances ;

– la métrique de l'image est absolument excellente, sans doute même assez supérieure aux métriques accessibles sur les caméras classiques. En effet, ces dernières sont quasiment parfaites en termes de distorsion, mais le film représente un intermédiaire dont les déformations sont loin d'être négligeables. Ces distorsions sont dues aux traitements lors du développement et du séchage, qui étirent le film de façon anisotrope. Elles sont également dues, et ce phénomène est peu connu, aux poussières sur le fond de chambre qui empêchent un bon plaquage du film sur la table à dépression et créent des bosses significatives lors de la prise de vue. Ceci provoque des déformations locales de l'image qui sont de purs artefacts, quasiment impossibles à modéliser. Dans les caméras numériques matricielles, l'étalonnage se fait de la même façon que pour une chambre photographique classique, mais comme le capteur est monolithique, plus aucune déformation ne peut se produire ensuite par sa faute, et on observe donc une précision dans les calages qui est généralement meilleure que 0.1 pixel ;

– les optiques disponibles offrent un choix beaucoup plus vaste que pour les caméras aériennes classiques. Pratiquement toutes les optiques adaptées au format 60 x 60 (photographie professionnelle) sont satisfaisantes, à des coûts évidemment bien plus modestes. En effet, les défauts classiques des optiques, distorsion, vignettage, etc. peuvent être corrigés par calcul a posteriori, et seule la résolution de l'optique et sa stabilité dimensionnelle dans le temps restent des paramètres importants.

1.5.4. Cahiers de charges de prises de vues aériennes numériques

L'emploi de caméras numériques aéroportées entraîne de grandes nouveautés en termes de spécification des prises de vues. Les notions de hauteur de vol et de taille de pixel sont à décorréliser complètement, en particulier par les choix d'optiques disponibles. La notion même d'échelle disparaît complètement, avec tout le corpus de savoirs empiriques qui lui est attaché. *L'angle maximal de champ* de l'image sera choisi en fonction des parties cachées acceptables et du besoin de précision sur une restitution de l'altimétrie, exprimé en particulier au travers du rapport B/H de la distance entre positions successives de la caméra lors de deux acquisitions successives d'images, divisé par l'altitude de vol. La *taille de pixel* sera choisie en fonction de la taille et de la nature des objets à lever et à détecter, et de la dynamique de l'image accessible avec la caméra considérée. C'est avec ces deux paramètres que l'on prévoira le plan de vol, et en particulier l'altitude.

On pourra noter quelques règles empiriques, qui seront détaillées en section 1.9 : la précision de pointé d'un objet se fait en général à mieux que 0.3 pixel, et pour identifier facilement un objet il est souhaitable qu'il ne soit

pas plus petit que 3 x 3 pixels. Ceci permet de spécifier assez bien les tailles de pixel réellement nécessaires.

Par exemple, avec une caméra matricielle à très grande dynamique, pour réaliser une orthophotographie sur zone urbaine où un MNT est déjà disponible, on choisira une focale longue pour limiter les parties cachées des immeubles, et la taille brute de pixel sera choisie à 50 cm pour avoir une description satisfaisante des bâtiments, ou de 30 cm si l'on veut en tirer un outil de gestion du mobilier urbain. Ces tailles de pixels seront réduites si la dynamique d'image est faible (resp. 30 cm et 15 cm pour une image argentique numérisée).

Dans une prise de vue traditionnelle, la hauteur de vol intervient également par le niveau de voile atmosphérique, plus ou moins acceptable, qui en résulte : obtenir un voile très faible avec une hauteur supérieure à 4 000 m relève parfois de la mission impossible sous certaines latitudes en photographie classique. En imagerie numérique, si la dynamique est suffisante, elle permet en particulier de retirer le voile atmosphérique en conservant une bonne qualité des couleurs et une bonne capacité à travailler dans les zones d'ombres. Ceci permet alors de réduire considérablement les délais liés aux aléas météorologiques, mais aussi de libérer la contrainte de hauteur de vol si besoin est.

1.6. Utilisation d'images radar en photogrammétrie⁶

1.6.1. Introduction

Les images obtenues à partir d'un radar à synthèse d'ouverture (RSO, pour lequel nous utiliserons le terme équivalent anglais SAR) sont très sensibles aux ondulations du terrain, et cette sensibilité a été à la base du développement de plusieurs techniques de cartographie qui utilisent une ou plusieurs images radar, à savoir, la radargrammétrie, l'interférométrie et la radarclinométrie [POL 91]. Chacune de ces techniques a été proposée initialement il y a plus de 25 années et leurs bases théoriques ont été établies dans les années 80. Le dernier cri en matière de cartographie radar a été présenté en détail par Leberl (1990), basé sur les campagnes aéroportées et sur des campagnes SAR exploratoires comme SEASAT (1978), SIR-A (1981) et SIR-B (1984), mais la capacité réelle de techniques du radar est longtemps restée peu connue, dû au manque de données SAR avant les années 90. Le lancement de plusieurs SARs spatiaux dans les dernières années (ERS, JER-S, RADARSAT, SIR-C) a permis d'avancer au travers de diverses expériences vers une meilleure estimation de l'exactitude de MNS radar.

6. Cette section a été rédigée par Laurent POLIDORI.

Les propriétés spécifiques des capteurs radar doivent être mentionnées pour expliquer leur capacité de cartographie.

1.6.1.1. *Un appareil actif*

Un capteur radar en général, et un radar à synthèse d'ouverture en particulier, fournit sa propre énergie et la transmet à travers une antenne : cela contribue à faire du radar une sonde « tout temps » en autorisant des acquisitions même la nuit. De plus, comme les orbites de jour et de nuit correspondent à des orbites ascendantes et descendantes, cela contribue aussi aux capacités de vue depuis un autre côté, de sorte que les régions cachées sont considérablement réduites.

1.6.1.2. *Précision de localisation absolue*

L'attitude (*i.e.* tangage, roulis et lacet) qui dans le cas d'images optiques est un générateur majeur d'erreur de localisation absolue, n'a aucun effet de localisation dans une image SAR. En effet, le calcul d'emplacement du point de l'image dans une image SAR exige seulement une distance oblique et un décalage Doppler de fréquence, et ces grandeurs ne dépendent pas de l'attitude de la sonde.

1.6.1.3. *Sensibilité au relief*

La localisation de l'image du radar est basée sur la distance oblique entre l'antenne et chaque élément de terrain visé : c'est pourquoi l'élévation du terrain a un effet direct sur la localisation de l'image. Ces effets peuvent être décrits comme un rapport proportionnel entre une variation de la hauteur Dz et une variation de distance oblique ΔR localement pour un angle d'incidence donné :

$$\Delta R = \frac{\Delta z}{\cos \theta}$$

où θ est l'angle entre la verticale locale et la direction d'observation.

À échelle du pixel, ΔR est une parallaxe qui peut être mesurée pour calculer une élévation : c'est la base de la radargrammétrie. À échelle de la longueur d'onde, ΔR peut être estimé à partir d'un changement de la phase entre deux échos : c'est la base de l'interférométrie. À part cette sensibilité géométrique, une sensibilité radiométrique peut être mentionnée, puisque l'orientation du terrain a un impact sur l'intensité de l'écho radar : c'est la base de la radarclinométrie (ou forme radar à partir de ombres).

1.6.1.4. *Cohérence*

Les signaux du radar sont cohérents, ce qui signifie qu'ils sont déterminés en amplitude et phase. La génération d'une image SAR ne serait pas possible autrement. Cette caractéristique rend les capteurs radar très sensibles au relief à cause de capacités de l'interférométrie.

1.6.1.5. *Effets atmosphériques*

Les effets de l'atmosphère et en particulier la troposphère peuvent être négligés à échelle de l'image élémentaire, *i.e.* une image du radar peut être acquise et peut être localisée correctement quelles que soient les conditions météorologiques. Au contraire, ces effets ne peuvent pas être négligés à échelle de la longueur d'onde, et ils produisent des artefacts en interférométrie. Par exemple, un écho du radar acquis sous conditions de forte pluie peut avoir un retard de phase de plusieurs fois 2π même si la géométrie n'a pas changé.

1.6.2. *Radargrammétrie*

La radargrammétrie est une adaptation des principes de photogrammétrie au cas d'images radar. En effet, elle est basée sur les dimensions de la parallaxe entre deux images acquises avec des points de vue différents. Cependant, la radargrammétrie ne peut pas être traitée avec les outils de la photogrammétrie, pour deux raisons principales.

En premier lieu, la géométrie SAR est modélisée par les équations spécifiques : cela implique que les restituteurs photogrammétriques analogiques ne sont pas utilisables, et les premières mises en œuvre rigoureuses ont été accomplies avec les restituteurs photogrammétriques analytiques [RAG 84].

La deuxième raison est que la vision stéréo envisagée est difficile et inconfortable avec des images radar, particulièrement dans le cas de terrain accidenté. Ceci est dû au fait que les points clairs et les ombres se déplacent d'une image à l'autre à cause de la différence d'illumination. Cependant, les capacités de vision stéréo peuvent être acquises avec entraînement, comme la perception du relief est fondamentalement un processus psychologique [TOU 97a].

La faisabilité de la radargrammétrie a été démontrée pour les données de radar aéroporté [LEB 87] aussi bien qu'avec des données de radar spatial [LEB 86]. D'après les expériences faites sur des paysages différents, il est bien admis maintenant que cette technique peut fournir une mesure 3D d'une exactitude de quelques pixels, *i.e.* autour de 20 m avec un SAR aéroporté [TOU 97b] et entre 20 et 50 m avec ERS [TOU 96], [RAG 93] ou RADARSAT [SYL 97], [MAR 97].

Comme prévu, l'erreur en radargrammétrie a tendance à augmenter en cas de relief escarpé.

1.6.3. Interférométrie

L'interférométrie SAR consiste à calculer l'élévation du terrain à partir de la différence de la phase entre deux échos du radar acquis entre deux positions très proches de l'antenne [ZEB 86], [MAS 93]. Les deux images peuvent être obtenues ou bien depuis deux antennes contraintes à rester sur des trajectoires parallèles (c'est le cas pour les systèmes aéroportés généralement) ou bien de la même antenne lors de deux passages. Si ces images sont enregistrées correctement, la différence de la phase peut être calculée pour chaque image élémentaire et peut être enregistrée dans un interférogramme. Bien que la différence de la phase ait un rapport simple avec la différence de distance oblique et par conséquent avec l'élévation, le relief ne peut pas être calculé facilement à cause de deux limitations sévères :

- la première limitation est la dépendance de phase du radar sur des facteurs non topographiques, tels que variations atmosphériques [GOL 95], [KEN 96], changements dans le couvert végétal ou défaut de calibration du capteur [MAS 95] : ces contributions au déphasage contaminent l'interférogramme, peuvent être converties en élévation, et contribuent à l'erreur de la production du MNS. C'est le cas généralement quand l'intervalle de temps entre les acquisitions est trop long, lorsque les changements importants se sont produits dans l'indice de réfraction atmosphérique, ainsi que dans la rugosité de la surface ou ses propriétés électromagnétiques ;

- la deuxième limitation est due au fait que la phase du radar n'est pas connue de façon absolue mais seulement modulo 2π , de sorte que les interférogrammes montrent des franges qui généralement doivent être « déroulées ».

La qualité du déroulement de phase dépend principalement du rapport B/H, c'est-à-dire le rapport entre la base stéréoscopique et la hauteur du vol :

- quand B/H est plus petit, les franges sont plus larges : il devient plus facile de les dérouler, mais une pente donnée a moins d'impact sur la phase du radar ce qui signifie que l'interférogramme est moins sensible au relief ;

- quand B/H est plus grand, les franges deviennent étroites et bruyantes : elles sont trop sensibles au relief et sont plus difficiles à dérouler.

Dans la configuration la plus courante, les images interférométriques sont acquises avec une seule antenne à des dates différentes. Le problème est alors que la ligne de base ne peut pas être prédite. Par conséquent, l'exactitude de la

méthode, qui peut être déterminée a posteriori, ne peut pas être prédite avant les acquisitions.

Les résultats les plus exacts, qui sont près des limites théoriques, sont généralement obtenus avec les acquisitions simultanées de deux antennes. Les traitements interférométriques développés, basés sur le système TOPSAR aéroporté [ZEB 92], ont fourni une précision d'environ 1 m dans les régions plates et 3 m dans les régions accidentées [MAD 95], et la double antenne SAR du système CCRS a fourni une exactitude de 10 m dans des régions montagneuses et glaciaires [MAT 94].

L'interférométrie avec une seule antenne fournit des résultats très hétérogènes, dû à la double influence de la ligne de base spatiale (qui ne peut pas être prédite) et l'intervalle du temps (lequel est généralement trop long) [vac 95]. Ces influences varient d'après les caractéristiques du paysage, et les exactitudes dépendent de la pente et du couvert végétal. Comme ces caractéristiques sont souvent hétérogènes sur des scènes latérales de 100 km, évaluer une exactitude de l'interférométrie sur une si grande région n'est pas très significatif. Sous conditions convenables (relief modéré, temps bref entre acquisitions, aucune variation atmosphérique), l'erreur de produits interférométriques peut être aussi petite que 5 m avec des données ERS [DUP 97] et 7 m avec des données RADARSAT [MAT 98]. Mais si les conditions idéales ne sont pas accomplies, les erreurs augmentent souvent jusqu'à plusieurs dizaines de mètres.

Pendant la fabrication d'un interférogramme radar, un produit associé, appelé image de cohérence, est habituellement aussi calculé pour afficher la corrélation entre les deux échos complexes. Ce produit fournit une information utile sur l'exactitude de l'interférométrie, parce que le bruit de la phase augmente proportionnellement à l'erreur sur la hauteur déterminée. En outre, la corrélation est aussi un produit thématique très intéressant, parce que la corrélation est un indicateur de stabilité de la surface. Par exemple, les paysages rocheux et les structures urbaines sont très stables, de sorte qu'ils sont généralement cartographiés avec une forte corrélation interférométrique, alors que les régions boisées et, par dessus tout les surfaces d'eau, ont une corrélation très basse parce que la géométrie de la surface dans chaque image élémentaire a des changements permanents comparables à la longueur d'onde [ZEB 92].

1.6.4. Radarlinométrie (mesure de formes à partir des ombres)

Alors que la radargrammétrie et l'interférométrie sont basées sur le principe de stéréoscopie, et par conséquent sur la géométrie des images radar, la

radarclinométrie fait usage de l'intensité de l'image et peut fournir un MNS qui utilise une seule image radar.

La radarclinométrie est un cas particulier de mesure de formes à partir des ombres, dans la mesure où elle détermine l'orientation absolue de chaque facette de terrain en fonction de son intensité dans l'image radar. En fait, cette technique est une application quantitative de la perception visuelle de relief qu'il faut pratiquer pour regarder une image radar.

Le lien entre l'orientation du terrain et l'intensité de l'image du radar est décrit par un modèle de rétrodiffusion, dans lequel l'intensité est exprimée comme une fonction de l'angle d'incidence (entre la direction d'observation et la perpendiculaire à la surface du terrain) et le coefficient de rétrodiffusion (semblable à la réflectance pour une image optique). La radarclinométrie est fondamentalement une inversion d'un tel modèle. Cependant, pour inverser un modèle de rétrodiffusion, on est contraint par deux limitations majeures :

- l'intensité de l'image dépend de l'angle d'incidence mais aussi du coefficient de rétrodiffusion et par conséquent des caractéristiques du sol (couvert végétal, rugosité, humidité...) qui dans la plupart des cas ne sont pas connus ;

- une valeur particulière de l'angle d'incidence correspond à une infinité d'orientations possibles du terrain, parce que l'azimut de la surface ou sa pente contribuent à l'angle d'incidence.

À cause de ces ambiguïtés, tout algorithme de radarclinométrie doit injecter des contraintes externes ou des hypothèses pour permettre l'inversion. Pour mentionner les hypothèses les plus classiques, la première ambiguïté est résolue en supposant un couvert végétal généralement homogène (ce qui implique que les variations de l'intensité sont causées seulement par les variations de l'inclinaison) et le deuxième en négligeant la composante de l'inclinaison orientée le long de l'orbite. Plusieurs algorithmes ont été proposés pour vaincre ces difficultés [FRA 87], [THO 89], [GUI 90], [PAQ 97].

Guindon (1990) a obtenu une erreur d'altitude de 200 m avec des données SEASAT (avec q autour de 20° *i.e.* une très forte incidence) sur une région montagneuse avec des pentes escarpées : ce sont les conditions les plus mauvaises pour la radarclinométrie. Au contraire, Paquerault et Maître (1997) ont obtenu une erreur de l'ordre de 20 m en utilisant RADARSAT sur la Guyane Française où le paysage est boisé uniformément avec des petites collines : cela correspond aux conditions idéales pour la radarclinométrie.

Finalement, il faut noter que l'erreur d'altitude n'est pas significative pour évaluer la performance de la radarclinométrie qui est fondamentalement une

technique qui dresse une carte de l'inclinaison. Le fait que l'erreur de hauteur soit souvent utilisée seule comme un critère de la qualité des MNS implique que des surfaces très lisses sont généralement préférées, alors que la radarclinométrie est très sensible aux microreliefs, ce qui est effectivement regrettable.

1.7. Emploi de télémètres laser aéroportés pour la détermination de MNS⁷

1.7.1. Technologies employées, performances

La télémétrie laser aéroportée (TLA) actuelle est l'héritière de matériels employés au début des années 70, les profileurs laser aéroportés (APR) qui fournissaient en continu une distance verticale avion-sol très précise (par exemple Geodolite de Spectra-Physics), le positionnement de l'avion étant alors obtenu par des moyens photographiques assez peu précis en planimétrie, et la référence altimétrique étant directement la surface isobare au niveau de l'avion. Ces procédés, tombés en désuétude dès le début des années 80 à cause du positionnement de précision alors insuffisante, ont repris de l'intérêt lorsque le GPS est apparu comme un moyen de localisation très précis en temps différé. Plusieurs offres d'ensembles matériels sont disponibles en 2000, incluant le TLA, son système de balayage, une centrale inertielle et un récepteur GPS ; bien entendu, l'essentiel de l'originalité de chaque offre réside dans les progiciels proposés.

Le principe de fonctionnement est le suivant :

– le TLA fournit de façon continue, à des cadences allant de 2 à 100 kHz, le temps de propagation d'une impulsion laser émise par une diode laser puissante travaillant dans le proche IR. Ce télémètre est solidaire de l'avion, auquel il est fixé de façon aussi rigide que possible. Il peut en général, selon les besoins, fournir des distances différentes, par exemple celle sur le premier écho reçu (pour mesurer des objets au-dessus du sol, comme une ligne électrique), ou au contraire sur le dernier (pour mesurer le sol sous la végétation), ou encore tous les échos reçus (mais alors la quantité de données s'accroît beaucoup). La précision du télémètre est de l'ordre de quelques centimètres dans l'absolu, mais en fait, ce qui compte c'est l'interaction du faisceau laser avec l'objet cible, qui est géométriquement assez mal définie dans la plupart des cas (exemple des hautes herbes, des bordures de bâtiments, ...). Le faisceau est assez divergent (typiquement 1 mrad), et même si l'avion ne peut voler haut compte tenu de la faible puissance optique que l'on peut émettre pour ne pas créer de risques oculaires, la tache d'analyse fait tout de même plusieurs décimètres de

7. Cette section a été rédigée par Michel KASSER.

diamètre. Une variante de cette technologie doit être mentionnée, elle fait appel à une source laser continue modulée par un jeu de fréquences permettant les levés d'ambiguïtés (sur le modèle de l'ancien Geodolite déjà cité), mais elle reste assez peu employée ;

- un dispositif de scanner optico/mécanique permet d'envoyer séquentiellement le faisceau du laser dans différentes directions, ce qui permet avec l'avancement de l'avion de réaliser un balayage du sol dans une bande autour de la trace au sol de celui-ci ;

- afin de connaître la position dans l'espace de chaque tir du laser malgré les mouvements mal connus de l'avion, le TLA est couplé de façon rigide à une centrale inertielle. Celle-ci fournit des informations à une cadence compatible avec les mouvements de la plateforme, typiquement de 200 à 500 Hz. Elle doit être initialisée (quelques minutes ou dizaines de minutes), pour que ses composants sensibles soient en régime thermique stationnaire. Ses données sont caractérisées par une dérive proportionnelle au carré du temps, ce qui implique un recalage très fréquent ;

- afin de recalibrer la centrale inertielle qui sans aide externe dériverait rapidement de valeurs excessives, un récepteur GPS précis est ajouté à l'ensemble. Ce récepteur fournit, en mode différentiel, des positions de son antenne aussi souvent que possible, généralement entre 1 et 10 Hz de cadence, et le post-traitement doit donner des précisions compatibles avec les besoins du chantier, ce qui implique naturellement aussi la localisation du récepteur GPS de référence par rapport à la zone levée ;

- en complément de cet équipement, il y a bien entendu une unité informatique pour prétraiter et stocker les grandes quantités de données fournies, une aide à la navigation, etc.

Le post-traitement des mesures est une opération assez lourde. Le calcul GPS puis la fusion des données GPS avec les données inertielles sont des opérations assez facilement automatisables. Par contre, il faut ensuite traiter les échos, c'est-à-dire filtrer les échos non pertinents, et cette opération ne s'automatise pratiquement pas. Par exemple, pour obtenir un MNT sous des arbres, il faut identifier « à la main » quels échos viennent probablement du sol et lesquels n'en viennent pas. Compte tenu du nombre d'échos à traiter, cette opération même avec une bonne assistance du logiciel est très fastidieuse. Le caractère impersonnel et systématique de l'acquisition des distances est l'une des caractéristiques fondamentales de ce mode de levé, pouvant exiger de lourds traitements ultérieurs dans certaines configurations.

1.7.2. Comparaisons avec la photogrammétrie

Les levés par TLA se différencient assez nettement des levés photogrammétriques, que ces derniers utilisent une imagerie traditionnelle numérisée ou directement numérique. Ces levés sont dans une période semi-expérimentale, dans laquelle les informations diffusées et publiées ne sont pas nécessairement toutes pertinentes compte tenu des enjeux commerciaux qui y sont associés. Les levés par TLA ont donc encore une maturité assez faible comparativement à la photogrammétrie. On peut néanmoins assez bien identifier les pôles d'intérêt et de faiblesse comparés de ces deux techniques. Une excellente étude sur ce sujet est celle de Baltisavias [BAL 99], dont nous reprenons ici certains éléments. Les éléments principaux de la comparaison entre TLA et levés photogrammétriques doivent inclure aussi les types de traitement de données qui sont à des stades semi-expérimentaux dans les deux domaines, ce qui inclut donc par exemple les développements en cours en matière de corrélation automatique et de multi-stéréoscopie.

Les points que nous retiendrons dans cette comparaison sont les suivants :

- les MNT issus de TLA peuvent être disponibles, quand le chantier s'y prête bien, très peu de temps après le vol. Par exemple pour des levés de chantiers linéaires sans végétation (corps de rues, lignes haute tension), le post-traitement peut être entièrement automatisé et la fourniture des données géométriques peut se faire en une ou deux heures. À l'opposé, la fourniture de MNT par corrélation automatique exige des traitements qui ne sont pas encore complètement automatiques, et toujours assez longs ;

- le matériel employé en TLA est un matériel sophistiqué et assez coûteux, et certains composants de centrales inertielles peuvent avoir des limitations d'exportation assez contraignantes selon leurs pays d'origine (USA par exemple). La maintenance en cours d'exploitation n'est donc pas toujours très aisée. Nous sommes en présence de technologies dont certaines sont très récentes, ce qui évidemment contraste fortement avec la photogrammétrie où les appareils de prises de vues aériennes sont très bien industrialisés, et d'une fiabilité à toute épreuve ;

- l'installation du matériel de TLA ou de photogrammétrie à bord d'un avion ou d'un hélicoptère est une phase délicate, qui nécessite par exemple une visée vers le sol pas facile à mettre en place. De plus, le matériel de TLA présente le besoin impératif d'une antenne GPS (délicate à installer sur certains hélicoptères) et consomme une puissance électrique qui n'est pas toujours disponible sur les avions courants. Le rattachement géométrique des différents sous-ensembles (antenne GPS, centrale inertielle, TLA) est une opération de métrologie assez délicate mais qui par chance peut être aisément vérifiée par les mesures aéroportées elles-mêmes si le logiciel de calcul le prévoit ;

– le lever par TLA est une technologie active, qui n'exige pas l'éclairage par le soleil. Il n'y a donc pas de limitations aux horaires de vol autres que celles dictées par la sécurité de la navigation aérienne. Les vols se font nécessairement à basse altitude, donc dans des zones qui parfois posent peu de problèmes d'autorisation de vol (on est hors de l'espace aérien commercial), mais qui sur les villes sont au contraire de plus en plus difficiles à obtenir. Néanmoins cette possibilité de travailler le matin, le soir ou en hiver ne présente plus le même avantage comparatif maintenant que l'on emploie des caméras numériques, dont la sensibilité à la lumière est telle que l'on peut acquérir sans difficulté d'excellentes images avec peu de lumière ambiante (soleil bas, vol sous les nuages). Tant qu'il s'agit de fournir des MNT, de tels vols sous faible éclairage sont tout à fait acceptables et concurrents de la TLA, mais le problème courant est qu'on demande très souvent à une prise de vues aériennes *aussi* de servir de base à de la photo-interprétation, et même la confection d'orthophotographies, ce qui en revanche exige un bon ensoleillement. Or la TLA ne peut pas en général fournir une image, en complément du MNT : c'est un outil à faire des MNT et rien de plus. Elle ne permet par exemple pas de discerner de façon simple une maison d'un arbre, ce qui limite beaucoup son champ d'application. Et si l'on ajoute une caméra dans l'avion, compte tenu de la hauteur de vol, ceci conduit à une quantité d'images très conséquente, qu'on ne saurait ensuite traiter avec les moyens actuels pour en faire une mosaïque ou une orthophotographie, même si toutes les données nécessaires sont disponibles ;

– les interactions de la TLA avec la végétation sont intéressantes et nombreuses. Au chapitre des problèmes, notons que les échos obtenus dans de l'herbe haute sont très difficiles à attribuer à une couche bien définie, que l'on travaille avec le premier ou le dernier écho détecté. Par contre, en milieu forestier, la TLA est *la seule* technique qui permette, dans pratiquement tous les types de forêts (même tropicales), de lever un MNT du sol en traversant les feuilles et les branches. Ceci présente donc un intérêt majeur pour les aménagements en zones équatoriales, où l'hydrologie est capitale et ne peut pas être bien traitée sans de telles données (*cf.* figure 1.17) ;

– une particularité de la TLA réside dans sa capacité à mesurer des échos même sur des objets très petits. L'exemple le plus spectaculaire est celui des levers de lignes à haute tension. Il serait impossible en photogrammétrie de lever les lignes elles-mêmes, non pas parce qu'on ne les voit pas (avec une caméra numérique on voit aisément des câbles même fins grâce à la dynamique considérable de l'image), mais parce qu'il n'y a aucun moyen de pointer sur le câble quand la base stéréoscopique est parallèle à celui-ci, ce qui est forcément le cas pour un lever linéaire de ce type. Dans des levers de lignes à haute tension par TLA, il est ainsi possible de lever de façon entièrement automatisée

les lignes et la zone de terrain et de végétation qui en est proche, ce qui permet d'identifier à temps les interventions d'élagage qui pourraient s'avérer utiles ;

– sur la plupart des autres domaines, il a peu de différences entre l'obtention de MNT par TLA ou par photogrammétrie. Certains auteurs considèrent qu'en milieu urbain la TLA présente des avantages marqués, mais on peut aisément noter de nombreux contre-exemples, et préciser que la multicorrélation (corrélation automatique avec plus de deux images) sur des images à grande dynamique donne en ville aussi d'excellents résultats, avec des avantages et inconvénients qui sont différents ;

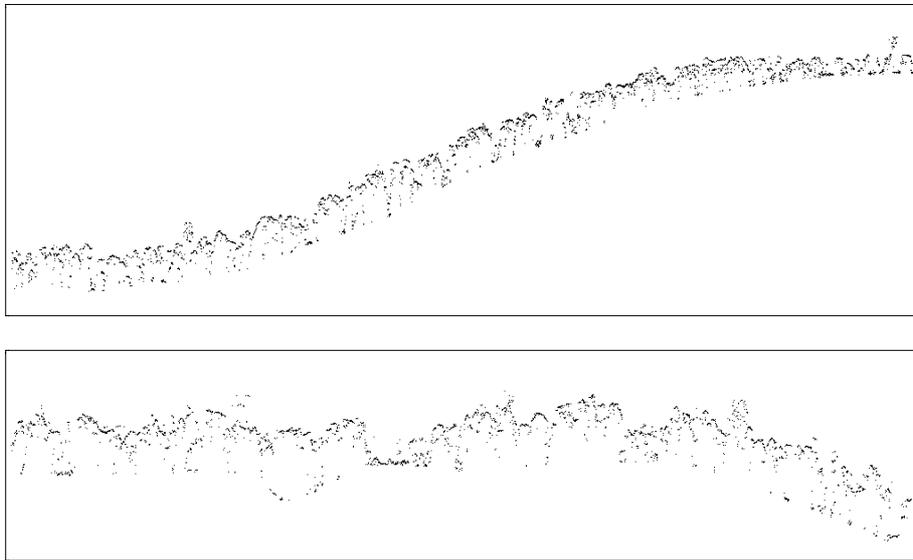


Figure 1.17. Deux profils bruts obtenus par le TLA ALTOA® en Guyane (végétation tropicale d'environ 40 m de haut). On peut noter que les tirs atteignant le sol décrivent très finement la topographie, et que dans un tel terrain un lever photogrammétrique des têtes des arbres, avec soustraction d'une hauteur constante (1) ignorerait des détails topographiques importants en milieu humide comme des petits cours d'eau, et (2) engendrent des erreurs significatives puisque les hauteurs d'arbres sont loin d'être constantes.

– enfin insistons sur le fait que les modèles d'erreurs ne sont pas du tout les mêmes, et que là encore il n'y a pas une des deux techniques qui dépasse franchement l'autre. Par exemple, les fautes ponctuelles sont rares en photogrammétrie, et nombreuses en TLA (lignes électriques, oiseaux, réflexions sur les plans d'eau, ...). La précision de mesure d'un bord de bâtiment s'analyse également de façon assez différente dans les deux cas : la corrélation

automatique trouvera bien les bords mais aura des ennuis à cause des parties cachées, la TLA ne décrira pas bien les bords à cause de la largeur de la tâche d'analyse. Par exemple en ce qui concerne des mesures d'altimétrie pure, on ne peut pas établir de bénéfice franc en termes de précision, la TLA étant localement exacte, mais susceptible de ne pas identifier des fossés ou de petits ruisseaux évidemment très importants sur de tels chantiers. Les données issues de TLA ou de corrélation automatique en photogrammétrie ne sont, par essence, originellement pas structurées. Par contre, de nombreuses études sont en cours pour les structurer de façon automatique au moins pour les cas simples (bâtiments par exemple) et, dans ce domaine, les méthodes photogrammétriques tirent largement parti des possibilités d'analyse automatique de chaque image, alors que les données issues de TLA sont bien plus difficiles à analyser.

1.7.3. Perspectives, conclusions

On est donc en présence d'une technologie nouvelle, dont les cas d'emploi optimaux doivent sans doute encore être approfondis, mais que l'on peut quand même assez bien cerner dès maintenant [ACK 99]. La TLA doit être considérée comme un complément à la photogrammétrie, qui convient particulièrement dans quelques cas d'emploi :

- levés sous la végétation ;
- MNT linéaires et de fourniture très rapide de zones étroites ;
- levés de lignes à haute tension ;
- MNT de surfaces nues.

Il y a une grande quantité de recherches en cours pour améliorer la productivité de cette technique, et les coûts ne tarderont sans doute pas à se préciser mieux, compte tenu de leur instabilité actuelle.

1.8. Emploi d'analyseurs à balayage (scanners) pour numériser des photographies aériennes⁸

1.8.1. Introduction

Le besoin actuel en images numériques destinées à des traitements photogrammétriques ne va cesser de croître dans les prochaines années. Il a dans un premier temps été très lié aux développements du marché de l'orthophotographie numérique depuis les années 80. Ce développement est loin

8. Cette section a été rédigée par Michel KASSER.

d'être terminé, surtout parce que les usagers peuvent depuis peu de temps manier sans difficultés de grosses quantités de données numériques sur des micro-ordinateurs de faible coût, et en particulier des images. Ainsi dans beaucoup de SIG urbains où les données doivent être remises à jour fréquemment, il est courant de travailler sur une couche de base formée par une orthophotographie, qui est peu onéreuse et peut donc être changée souvent. Les couches vecteur sont alors remises à jour localement, à partir de l'orthophotographie, directement par l'utilisateur lui-même. Ceci crée évidemment un marché important pour des images aériennes numériques. Par ailleurs, depuis le début des années 90, de nombreux développements logiciels ont vu le jour, destinés à effectuer tout le traitement de restitution photogrammétrique directement sur des micro-ordinateurs, ainsi transformés en stations de travail photogrammétriques (SPN, décrites en section 2.5) de coût de plus en plus réduit. Les usagers de telles SPN ne sont plus uniquement les sociétés de photogrammétrie, mais de plus en plus des usagers techniques venant de secteurs tout à fait externes à la photogrammétrie, qui effectuent eux-mêmes la restitution des objets qui les intéressent. La diffusion des SPN a elle aussi créé une demande pour des images numériques, demande qui devrait elle aussi considérablement augmenter.

Ce besoin en images numériques est actuellement traité de deux façons : par la numérisation d'images argentiques traditionnelles, et par l'emploi de plus en plus fréquent de caméras aériennes numériques (voir la section 1.5). Les images obtenues par ces caméras sont de bien meilleure qualité (tant radiométrique que géométrique), mais leur rareté rend encore nécessaire pour plusieurs années l'emploi d'analyseurs à balayage permettant de numériser des clichés neufs acquis par les caméras aériennes traditionnelles (qui sont en général très fiables et de grande longévité) ; ces appareils resteront longtemps nécessaires de toute façon pour permettre le traitement de clichés anciens.

Nous allons analyser les techniques employées par ces scanners afin de bien comprendre leurs défauts et leurs qualités. Ces matériels sont évidemment eux aussi en évolution régulière, mais celle-ci s'est sensiblement ralentie et les technologies employées semblent assez stables, sans doute parce qu'il n'y a pas eu depuis quelques années d'innovation applicables à ces appareils dans le domaine des capteurs. Nous décrivons ici bien entendu la situation en l'an 2000 : il s'agit de deux classes d'analyseurs à balayage complètement différents, adaptés à des images aériennes 24 cm x 24 cm. Il y a ceux qui ont été développés spécifiquement pour la photogrammétrie qui sont très précis et très onéreux compte tenu de leur faible diffusion [KÖL 99], et à l'opposé les scanners de format A3 grand public moins précis, à des prix évidemment bien plus modestes, et qui peuvent aussi être employés.

Le cahier de charges de ces scanners est le suivant : permettre de traiter des images aériennes 24 cm x 24 cm, images sur papier ou sur film, pixel d'analyse inférieur ou égal à 30 μm , en couleur ou en noir et blanc, avec une grande précision géométrique. La possibilité de traiter des films originaux directement sous forme de rouleaux est aussi une spécification importante pour une partie du marché.

1.8.2. Technologie des analyseurs à balayage

1.8.2.1. Les capteurs

Les capteurs employés par les appareils fournis en 2000 sont tous basés sur des dispositifs à transfert de charge (DTC, appelés CCD en anglais, déjà vus en section 1.5), ceci étant combiné avec une analyse à plat des clichés. Les photomultiplicateurs employés auparavant allaient de pair avec un montage de clichés sur un tambour, ce qui était beaucoup moins commode, mais cette génération de matériels n'est plus commercialisée. Ces DTC sont employés de trois façons : en barrette, en matrices, ou éventuellement en barrettes « TDI ». Voyons ces capteurs en détail :

– les barrettes DTC sont employées de façon à permettre d'aligner jusqu'à 10 000 ou 12 000 détecteurs, soit sur une seule barrette, soit en aboutant plusieurs barrettes plus courtes. Pour obtenir une analyse de couleurs, on utilise trois de ces barrettes parallèles juxtaposées, chacune équipée d'un des trois filtres RVB. L'ensemble formé par ces barrettes et l'optique nécessaire est alors déplacé selon un seul axe par rapport à l'image à numériser, soit qu'il se déplace devant le cliché fixe, soit l'inverse. L'analyse de toute une photographie exige en général plusieurs passages successifs, qui doivent donc être parfaitement raccordés entre eux ;

– les matrices DTC employées ont des dimensions de l'ordre de 2 000 x 2 000. Il existe des matrices bien plus grandes, mais leur coût élevé ne les a pas fait choisir jusqu'ici car leur emploi n'accélérerait pas beaucoup le processus. Le détecteur et son optique se déplacent de façon séquentielle selon deux dimensions devant le cliché à traiter de façon à couvrir toute la surface utile (il faut selon la taille du pixel de numérisation choisie couvrir jusqu'à 30 000 x 30 000 points d'analyse) ; là encore le déplacement mécanique doit permettre un raccord excellent entre les sous-images ;

– les barrettes DTC fonctionnant selon le mode TDI (*Time Delay Integration*, un sigle assez malencontreux car n'expliquant rien). On exploite alors une matrice rectangulaire (par exemple 2 048 x 96 pixels), et on s'en sert comme une barrette (ici de 2 048 pixels), en la faisant avancer régulièrement pendant la numérisation comme si c'était une barrette normale, et en transférant les

charges produites de façon régulière d'une ligne à la suivante (ici 96 fois), exactement à la même vitesse que le déplacement de l'image dans le plan du DTC, de façon qu'un ensemble de charges récupéré à la sortie n'ait été engendré que par un seul point de la photographie analysée. Ainsi ces charges ont été obtenues par l'action successive de nombreux détecteurs (ici 96), ce qui homogénéise de façon remarquable les réponses de tous les détecteurs. C'est un peu le même mode de fonctionnement qui a été vu en section 1.5 pour effectuer la compensation de filé sur les caméras aéroportées matricielles. On obtient donc ainsi une réponse très régulière de tous les détecteurs lors de l'analyse.

Ces dispositifs présentent des avantages différents. Par exemple, le temps de passage d'un pixel face à la photographie analysée pourra être bien plus long pour une matrice que pour une barrette simple, ce qui permettra d'employer un éclairage moins puissant pour illuminer le film et évitera ainsi les effets thermiques pénalisants lors de l'emploi de lampes puissantes. L'analyse de la couleur par trois barrettes voisines équipées de filtres est plus simple à réaliser qu'avec une matrice, pour laquelle il faut séquentiellement commuter une série de filtres avant chaque acquisition d'une zone élémentaire. Par contre, si les filtres sont déposés directement sur les barrettes, ce qui est généralement le cas, cela interdit de les modifier, et par ailleurs, il n'y a aucun moyen d'effectuer un réglage différent de l'éclairage pour chaque canal, ce qui à l'opposé est évidemment possible avec un système à matrice. Évidemment, il faut que la mise au point de l'optique soit très soignée, et avec des systèmes à barrettes, elle doit être la même pour les trois barrettes, ce qui n'est pas facile compte tenu des différences de longueurs d'ondes et donc des effets de diffraction, très sensibles pour des taches d'analyse extrêmement petites.

Notons que les irrégularités de réponse radiométrique des détecteurs peuvent évidemment être corrigées par un étalonnage préalable, mais que celles qui subsistent (poussières, défauts d'étalonnage) vont de toutes les façons créer des artefacts périodiques gênants :

- pour les barrettes, cela entraîne des bandes parallèles sur tout le document, parmi lesquelles on notera aussi celles liées aux passages successifs des barrettes ;

- pour les matrices, il s'agira d'une répétition selon un pavage régulier des défauts et de discontinuités radiométriques entre positions successives de la matrice. Ces défauts seront généralement moins spectaculaires que pour les barrettes.

En outre, derrière chaque DTC il y a une électronique de sortie (amplificateur courant-tension, convertisseur analogique numérique) qui doit être optimisé afin que le bruit de lecture du DTC soit aussi faible que possible,

avec un échantillonnage numérique pouvant aller de 8 jusqu'à 12 bits. Mais cet échantillonnage très soigné n'est guère nécessaire compte tenu du bruit propre au processus photographique, qui ne justifie au mieux que 6 bits utiles. On retrouve bien entendu dans les données tous les défauts classiques des DTC qui sont décrits dans la littérature technique correspondante (Kodak, Dalsa, Phillips, Toshiba, Thomson, ...).

1.8.2.2. Conception mécanique

Ce n'est pas une opération simple que de déplacer un ensemble optique et de le repositionner ailleurs à quelques microns près. C'est d'ailleurs là l'une des difficultés technologiques majeures des analyseurs à balayage. Que l'on utilise des barrettes ou des matrices ne crée pas de différences majeures à cet égard. Il s'agit donc de problèmes de mécanique, qui sont généralement résolus en utilisant des mécanismes ayant des jeux extrêmement réduits, réalisés en matériaux ne donnant qu'un faible coefficient de dilatation thermique différentiel entre les divers sous ensembles : on ne demande à cette mécanique que d'être extrêmement reproductible dans ses erreurs. On procède à un étalonnage très soigné de l'ensemble en observant une mire régulière et connue avec une très grande précision (mires sur plaque de verre, connues à 1 μm près environ). On en déduit un jeu de paramètres de correction à appliquer à l'assemblage des différentes sous-images afin d'atteindre une précision compatible avec le cahier de charges (généralement quelques μm). Mais il convient d'être très prudent avec le vieillissement de ces structures, tant à cause des effets mal maîtrisés des poussières sur les mouvements, qu'à cause des jeux qui peuvent apparaître et compromettre la validité des tables de paramètres de correction.

1.8.3. Taille de pixel d'analyse

Les tailles de pixels disponibles sont très variables, allant de 4 μm sur les appareils les plus résolus jusqu'à plus de 300 μm lorsqu'on cherche à réaliser un échantillonnage grossier. Généralement ces dimensions de pixel sont atteintes par des regroupements des données obtenues sur le plus petit pixel d'analyse possible. Cet emploi généralisé d'un pixel très petit avec son regroupement par logiciel est aussi mis à profit pour effectuer les mises en géométrie des sous-images entre elles sans avoir recours à des rééchantillonnages toujours très coûteux en temps calcul et en espace mémoire.

Les tailles de pixels recommandées dépendent évidemment de la qualité du cliché à numériser et du travail photogrammétrique à en tirer. En section 1.9 sont étudiés les problèmes liés au rapport signal/bruit des émulsions photographiques, on y verra que plus le pixel est petit, plus le rapport

signal/bruit devient mauvais, et ceci bien au-delà des éventuels défauts de l'analyseur à balayage. Une taille de $30\ \mu\text{m}$ est satisfaisante dans la plupart des travaux de type aérotriangulation, MNT, orthophotographie, etc. Si l'on passe à des tailles plus petites ($15\ \mu\text{m}$ par exemple), les gains en précision sont souvent modestes [BAL 98] avec des complications informatiques bien plus grandes.

1.8.4. Qualité radiométrique, mesure des couleurs

Compte tenu de la qualité radiométrique très médiocre des photographies (avec une fidélité à l'objet original qui est faible à cause du processus chimique employé), il est certain qu'il n'y a pas beaucoup de difficultés conceptuelles à réaliser une analyse de clichés qui n'apporte pratiquement aucune détérioration des données disponibles. En particulier la restitution des couleurs, dans de telles conditions, fait beaucoup plus appel au sens artistique de l'opérateur (fournir un document satisfaisant l'œil du client) qu'à un respect rigoureux de lois physiques. Les appareils disponibles offrent donc en général une large palette d'outils permettant d'équilibrer au mieux les composantes RVB. Notons toutefois que certains défauts mécaniques peuvent conduire à un petit décalage géométrique des composantes colorées, ce qui pourra alors engendrer des artefacts locaux, visibles surtout sur des objets contrastés à bords francs, ponctuels ou linéaires.

1.8.5. Analyseurs à balayage A3 grand public

Il existe sur le marché des analyseurs à balayage au format A3, qui sont donc largement capables de numériser une photographie aérienne entière, et destinés au grand public technique. Ils sont incomparablement moins chers que les appareils spécialisés pour photogrammètres (près de 50 fois moins) et il est intéressant de noter leurs possibilités d'emploi. Ceux accessibles à la date de rédaction ont des tailles de pixel allant de 30 à $40\ \mu\text{m}$, utilisant une barrette triple avec filtres RVB, ce qui permet une numérisation en un seul passage et donc une bonne homogénéité géométrique, avec des défauts maximaux aux environs de 2 pixels qui créent généralement une déformation affine de l'image. Il est à noter que de telles déformations sont typiques aussi des films, à cause des traitements qu'ils subissent lors du développement et séchage, et qu'elles font l'objet systématiquement d'un paramétrage dans les phases d'aérotriangulation. Il est donc possible de se servir de tels scanners pour certains chantiers photogrammétriques n'exigeant pas la précision maximale, et une évaluation fine de leurs limites et des stabilités temporelles des modèles d'erreur est à effectuer pour chacun d'entre eux.

1.9. Relations entre précision radiométrique et précision géométrique en imagerie numérique⁹

1.9.1. Introduction

Un des premiers problèmes auxquels se trouve confronté l'utilisateur d'images numérisées est celui de la taille du pixel qu'il va utiliser pour son scannage. Intuitivement, il sent bien que, plus petit sera le pas de scannage, meilleure sera la précision, au moins relative, du résultat, au prix malheureusement d'un volume de données plus important. Mais il ne sait en général pas que cette plus grande résolution se paye aussi, nous le verrons, en termes de qualité radiométrique. Cette perte de précision radiométrique a aussi une conséquence indirecte mais certaine sur la précision géométrique, qui est l'objet de ce paragraphe. On sent bien que, selon le principe que « qui peut le plus, peut le moins » (on peut toujours rassembler des petits pixels pour en faire des gros...), on ne risque quand même pas paradoxalement d'obtenir un moins bon résultat avec des petits pixels qu'avec des gros. Mais comme la taille finalement choisie est toujours le résultat d'un compromis entre la précision géométrique et le coût (volume de donnée et temps de traitement, etc.), il est clair que l'on doit tenir compte de l'effet de la radiométrie sur la géométrie pour trouver le bon compromis.

Ce qui est vrai pour les images numérisées l'est encore plus pour les images directement numériques, c'est-à-dire issues de caméras numériques, et cela de deux façons. Premièrement, la meilleure résolution géométrique se paye beaucoup plus cher, car elle intervient directement, et à peu près linéairement, sur le coût de la prise de vue : il ne s'agit pas là d'un simple réglage de scanner, mais cela s'apparente plutôt au choix de l'échelle de prise de vue dans le cas classique. Deuxièmement, la qualité radiométrique des images numériques est bien meilleure que celle des images numérisées (dans les conditions habituelles de numérisation). On comprend bien alors que l'effet précité est encore plus crucial dans ce cas.

Une mauvaise radiométrie a évidemment des effets sur d'autres aspects que la précision géométrique, par exemple l'esthétique et l'interprétabilité de l'image ; ils sortent du cadre de cette étude car ils sont trop subjectifs pour être modélisés de manière un peu rigoureuse. Pourtant, ils ne lui sont pas complètement étrangers car la précision géométrique que l'on peut atteindre dans une image a certainement une influence sur son interprétabilité et peut-être sur son esthétique.

9. Cette section a été rédigée par Christian THOM.

1.9.2. La précision radiométrique

Cette notion est relativement simple. La radiométrie est la mesure des énergies émises par les objets d'une scène. Sa précision est donc bien définie, comme pour toute mesure. Toutefois, dans le contexte de cette étude, la radiométrie en elle-même ne nous est pas toujours accessible. En effet, si les capteurs d'image numériques sont presque toujours radiométriques, ce n'est pas le cas du film numérisé, où les données numériques de l'image sont des fonctions de la radiométrie, croissantes et bornées, mais mal connues, et qui, de plus, dépendent des conditions de développement de l'émulsion. Heureusement, cela n'aura que peu d'impact sur notre étude, car nous cherchons à évaluer la précision de localisation de détails visibles dans des images, et que celle-ci sera toujours fonction du rapport entre le bruit et le contraste du détail, qui pourront être évalués plus ou moins directement dans l'image.

Si la notion est simple, son estimation l'est moins, surtout dans le cas des images numérisées. Si, en effet, les modèles de bruit sont bien connus pour les capteurs numériques, ils le sont peu dans le cas des numérisations, où se superposent le bruit du scanner, les bruits liés à l'émulsion et à son traitement. Ici, nous nous servirons de données que nous avons acquises d'expérience, et de mesures sur la caméra numérique de l'IGN-F. Toutefois, il faut nous interroger sur l'origine de ces bruits, car certains aspects ont un impact sur notre étude.

1.9.2.1. Caméra numérique

Le modèle de bruit est ici très simple. Les deux sources de bruits sont :

- le bruit de lecture du capteur, dû à l'électronique de numérisation, essentiellement gaussien ;
- le bruit de photon, dû à la nature corpusculaire de la lumière, suivant une loi de Poisson ;
- les différences de sensibilité des pixels (corrigeables par étalonnage) ;
- les différences de courant d'obscurité (corrigeables aussi par étalonnage).

En général, c'est le bruit de photon qui domine. Il croît selon la racine carrée du signal, et sa valeur dépend du nombre total de photons que peut contenir chaque pixel. Par exemple, dans le cas du capteur Kodak utilisé à l'IGN-F, ce nombre vaut 85 000. Le rapport signal/bruit à pleine exposition vaut donc 300.

1.9.2.2. Images digitalisées

Les sources de bruits sont ici plus nombreuses et moins bien connues :

- bruit issu du numériseur. Il dépend du matériel employé, de la taille de pixel, du niveau de gris obtenu, etc. ;
- bruit provenant de l'émulsion.

Voyons plus en détail ce dernier. On sait que le processus photographique est basé sur une détection de la lumière par des ions argent, puis à une amplification du signal par le révélateur, qui fait croître chaque germe créé par un photon détecté en un grain d'argent d'une certaine taille (quelques microns). Le film est ensuite analysé par le numériseur qui évalue sa densité optique, c'est-à-dire en fait la proportion de lumière qui passe entre les grains d'argent. On voit tout de suite de nombreuses conséquences :

- la réponse du film n'est pas linéaire. En effet, le processus photochimique de production des grains n'est pas linéaire, car il faut plusieurs photons pour qu'un grain puisse être créé, provoquant une insensibilité du film pour les basses illuminations. Mais même si l'on supposait ce processus linéaire, lorsque la densité des grains d'argent croît, ceux-ci finissent par se « faire de l'ombre », lorsqu'un grain en occulte un autre. La sensibilité marginale pour une proportion de grain R sera de $1-R$. Cela nous donne une courbe de réponse en fonction de l'illumination i de $R(i) = 1 - \exp(-k \cdot i)$. La densité optique, qui est proportionnelle au logarithme de $1-R$, est donc bien proportionnelle aussi à l'illumination de l'émulsion ;

- si on se place à la moitié de la dynamique du film ($R=1/2$), pour une taille de pixel d'analyse S et une taille caractéristique de grain de s , si i est exprimé en nombre de photons détectés, on a :

Surface du pixel : S^2

Surface du grain : s^2

pour i faible on constate que $k = s^2/S^2$

pour $R = 1/2$, $i = \log(1/R)/k = \log(2) \cdot S^2/s^2$

le rapport signal sur bruit est $r = \sqrt{i} = \sqrt{\log(2)} \cdot S/s$

Prenons pour exemple les valeurs suivantes : $S = 20 \mu\text{m}$, $s = 1 \mu\text{m}$, on a alors $r = 16,6$. Rappelons que dans des conditions similaires, un capteur directement numérique bénéficie d'un rapport signal/bruit d'environ 150. Cela donne une idée du problème...

Au vu des valeurs obtenues, il nous paraît justifié de négliger pour ce qui suit le bruit propre au scanner, d'autant que nous ne le connaissons pas et qu'il dépend du type d'appareil utilisé.

On remarque de plus sur cette formule que r est proportionnel à la dimension de la tache d'analyse. En général la tache d'analyse sur un scanner est plus grande que le pas d'échantillonnage, pour éviter le repliement de spectre, ce qui améliore un peu le chiffre ci-dessus, au prix d'une moins bonne FTM (Fonction de transfert de modulation) bien sûr.

Enfin, cette formule nous donne une idée du rapport des rendements quantiques du film et des capteurs DTC. En effet, notre expérience nous montre que les conditions de prise de vue (temps d'exposition, rapport d'ouverture) entre les deux systèmes sont pratiquement les mêmes. On voit que sur un pixel de $20\ \mu\text{m}$, le film détecte 280 photons, alors que sur un pixel de $9\ \mu\text{m}$, le DTC en détecte 20 000 environ, ce qui correspond à un rapport de sensibilité de 350...

Ces équations très simples (voire simplistes...) nous expliquent pourquoi les capteurs DTC peuvent être plus petits que les fonds de chambres habituels, et que leurs pixels sont eux-mêmes plus petits, mais qu'ils gardent malgré tout un énorme avantage en termes de qualité radiométrique. Tout le problème est de l'exploiter au mieux, pour compenser leur relatif manque de résolution.

1.9.3. La précision géométrique

Nous nous intéresserons ici à la précision géométrique dans l'image, et non à celle des objets dans la scène. Cela veut dire que nous ferons abstraction de tous les problèmes de systématismes liés à la prise de vue, bien que ceux-ci puissent être importants, pensons au cas des caméras aériennes basées sur l'usage de capteurs linéaires par exemple, où la mauvaise connaissance des paramètres d'orientation externe du capteur induit pour chaque ligne de l'image une mauvaise précision de localisation des pixels.

On peut distinguer deux notions différentes dans ce domaine. Tout d'abord la précision de positionnement d'un détail dans l'image, ce détail pouvant être ponctuel, linéaire, ou surfacique, celui-ci se ramenant en général au linéaire car on en positionne les limites. De même le ponctuel est souvent l'intersection de deux détails linéaires (coins de bâtiment, par exemple), bien qu'il y ait aussi des détails purement ponctuels. Le fait que le détail soit en général réparti sur plusieurs pixels favorise évidemment sa localisation, car on peut avoir plusieurs estimations de la mesure de position, et donc en faire une moyenne.

Ensuite, il y a le problème plus délicat de la séparation de deux détails proches, ou résolution, qui touche plus l'interprétabilité de l'image que la précision elle-même, mais que nous mentionnons ici car elle est beaucoup plus exigeante en termes de taille de pixel. En effet, il est clair que même avec des images de très bonne qualité, il est impossible de séparer des détails qui sont distants de moins de deux pixels, alors qu'en termes de précision de localisation, on peut sans difficulté, dans les mêmes conditions, viser les quelques dixièmes de pixel.

Si la taille du pixel est un élément évidemment déterminant de cette précision, elle n'est pas la seule. La résolution de l'optique en est un autre. Toutes sortes de situations peuvent se présenter entre deux extrêmes :

- images floues échantillonnées avec des pixels trop petits ;
- images très résolues sous-échantillonnées avec des pixels trop gros.

Le premier et le deuxième cas peuvent se présenter par exemple avec un scanner mal conçu ou mal réglé, et le deuxième avec des caméras numériques ayant une optique inadaptée. Cet éventail inclut évidemment la situation idéale des images échantillonnées en respectant la limite de Shannon, mais cela est très rare, car la réponse des optiques n'est pas constante dans l'ensemble de leur champ, et donc un échantillonnage régulier ne permet de respecter le critère de Shannon partout.

On est donc en général confronté à une situation non idéale, et en général même en partie inconnue. Nous nous bornerons donc à examiner quelques cas typiques simples, en général aux extrêmes de la gamme des possibles, les situations intermédiaires étant toujours plus compliquées.

1.9.3.1. Précision de localisation

1.9.3.1.1. Cas des images sous-échantillonnées

En ce qui concerne les détails ponctuels, la précision est là toute trouvée : il n'y a aucun moyen de déterminer la position du détail à l'intérieur de son pixel. D'où une précision *e.m.q.* en x et y de 0,29 pixel, indépendante de la précision radiométrique. Dans le cas d'un détail linéaire, la précision que l'on peut obtenir dépend de la connaissance *a priori* de la nature du détail (est-il rectiligne ?), et de son orientation par rapport aux axes de l'image. Le cas le pire est évidemment un détail parallèle à un des axes de l'image, et on obtient la même précision de 0,29 pixel *e.m.q.* Par contre, si on a affaire à un détail orienté différemment, la répartition de l'énergie dans les différents pixels traversés par le détail permet de remonter à une meilleure précision, qui dépend alors de la dimension caractéristique du détail pour laquelle on peut le considérer comme rectiligne. Puisqu'on se sert de la valeur des pixels traversés, la précision radiométrique aura une importance, difficile à évaluer.

En ce qui concerne les détails surfaciques, le problème se résume à positionner le bord de la surface. Cette situation, heureusement plus fréquente que la précédente (champs, routes, bâtiments, etc.), est plus favorable, car la position sub-pixellaire du bord est fonction de la quantité d'énergie reçue par le pixel contenant le bord. En prenant pour simplifier un bord parallèle à l'axe y , de contraste c , on comprend que sa position sub-pixellaire en x peut être calculée par : $dx = dg/c$, dg étant la différence de radiométrie par rapport au pixel de

référence. La précision sur x est donc directement liée au bruit radiométrique. Pour fixer les idées, avec un contraste de $1/10$ normalisé à la valeur de saturation du capteur, on obtient dans le cas du film numérisé à $20\ \mu\text{m}$ un bruit avec une *e.m.q.* de $0,6$ pixel, ce qui signifie qu'aucun bénéfice n'est possible, et dans le cas du capteur numérique $1/15 = 0,07$ pixel, ce qui est appréciable. Pouvons un peu plus loin le problème du film. En effet, que va-t-on gagner à utiliser des pixels plus petits à la numérisation ? Le bruit croît en $1/S$, et donc si l'on ne s'intéresse qu'à un pixel, la précision sera donc la même quel que soit S . Heureusement, il faut tenir compte du fait que pour une unité de longueur du détail, on peut moyennner les évaluations de la position du détail autant de fois qu'il contient de pixels. On aura donc *in fine* une précision proportionnelle à $s \cdot \sqrt{S} / L / c$ où L est la dimension utilisable du détail.

En fait, on ne peut diminuer indéfiniment la taille du pixel sans atteindre la limite de résolution de l'optique, et donc passer dans le cas suivant.

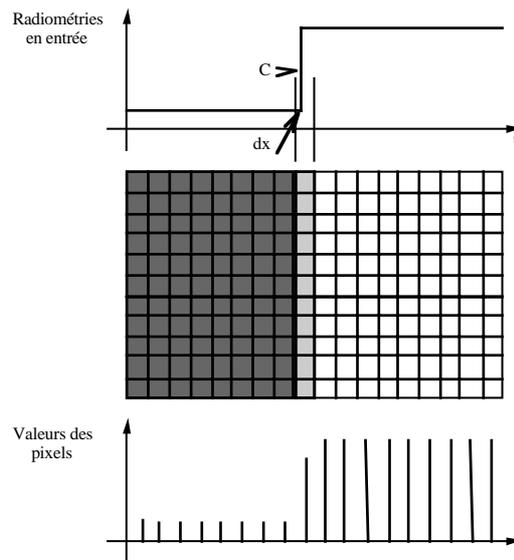


Figure 1.18. Limite de zone, cas sous-échantillonné

1.9.3.1.2. Cas des images sur-échantillonnées

Nous étudions ici le cas où toute transition de radiométrie se fait progressivement. Tout détail est donc représenté sur plusieurs pixels. Là, l'ensemble des cas précédents se réduit formellement au cas d'un bord. En effet, un détail linéaire se comporte comme deux bords successifs, leur dimension

caractéristique étant toutefois la moitié de celle d'un bord (la transition d'un bord est en fait l'intégrale de celle d'un détail linéaire, qui est la fonction d'étalement de point (FEP) projetée sur l'axe perpendiculaire au détail). Nous nous intéresserons donc à la localisation d'une zone de gradient constant de largeur D et de longueur utile L . La grandeur D est liée à la largeur de la FEP de l'optique. On peut considérer que c'est la largeur à mi-hauteur de celle-ci dans le cas du bord d'un détail surfacique, et de la moitié de celle-ci pour un détail linéaire. Une fois de plus, constatons la rusticité de notre modèle, qui sera néanmoins suffisant pour analyser de manière qualitative le problème.

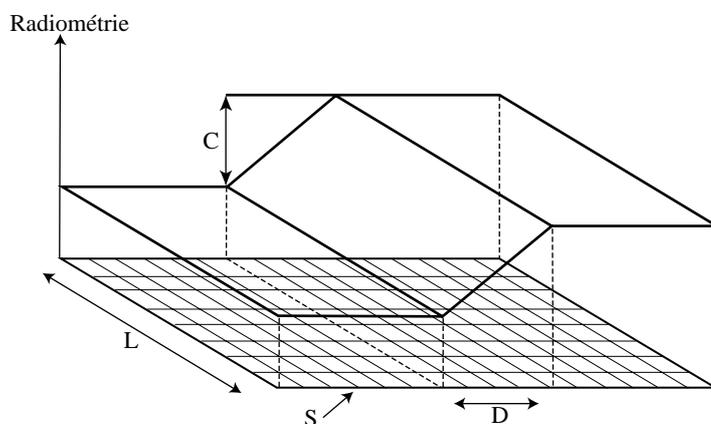


Figure 1.19. Limite de zone, cas sur-échantillonné

La position précise (sub-pixellaire) en x est donnée par la valeur moyenne de la zone où le gradient est constant, divisée par ce gradient, soit :

$$dx = \frac{\sum g}{L \cdot D} \cdot S^2 \cdot \frac{D}{C} = \frac{\sum g}{L} \cdot \frac{S^2}{C}$$

Le bruit sur cette valeur est de :

$$\sigma_x = \sigma_g \cdot \frac{S}{\sqrt{L \cdot D}} \cdot \frac{D}{C} = \sigma_g \cdot \frac{S}{C} \cdot \sqrt{\frac{D}{L}}$$

Là encore, dans le cas d'un cliché numérisé, la taille de pixel S intervient aussi dans σ_g au dénominateur, et σ_x se retrouve donc indépendant de celle-ci, mais est fonction en revanche de la taille des grains.

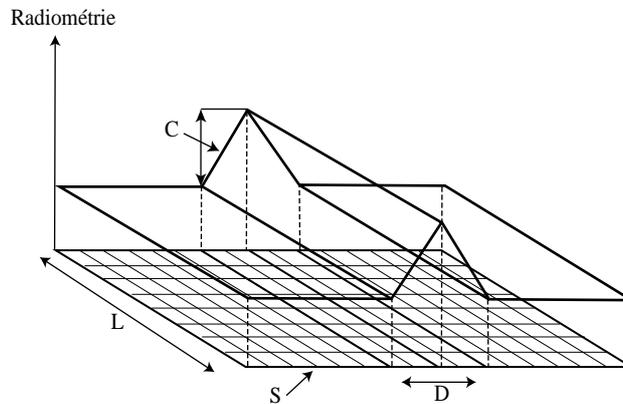


Figure 1.20. *Détail linéaire, cas sur-échantillonné*

Il faut remarquer qu'on ne peut abuser du paramètre L . En effet, il est rare que l'on puisse supposer qu'un détail est linéaire sur une grande longueur. De plus, nous avons supposé connue son orientation, ce qui n'est en général pas le cas, et qui introduit une inconnue supplémentaire, et donc plus d'imprécision.

Rappelons que dans le cas du détail linéaire, l'évaluation de la position peut se faire aussi avec l'autre côté du détail, et que D est la moitié du cas précédent ; on gagne ainsi par rapport au bord un facteur 2 au total.

1.9.3.1.3. Cas général

En fait, dans la pratique on est confronté le plus souvent à des situations intermédiaires, où la fonction d'étalement de point de l'optique est de l'ordre du pixel, ou d'une fraction de pixel, n'est pas connue avec précision, varie d'un point à un autre, etc. Les méthodes de positionnement précis inspirées de celle ci-dessus donnent dans ce cas des résultats médiocres et entachés de biais. Cela est dû au fait que la fonction d'étalement de point est elle-même mal échantillonnée. Pourtant elles amènent toujours une amélioration par rapport à la situation vue au paragraphe 1.9.3.1.1, dont les résultats peuvent donc être considérés comme des majorants des erreurs.

1.9.3.1.4. Conclusions

On peut tirer plusieurs conclusions de ce que nous venons de voir :

- le fait de travailler avec des images bien échantillonnées est important si l'on veut profiter pleinement de ce genre de technique ;
- toutefois, pour positionner le bord de détails surfaciques, un mauvais échantillonnage est suffisant ;

– l'emploi de ce genre de technique sur des clichés numérisés est inutile, sauf pour des détails très contrastés, le bruit dans ce type d'images étant trop important.

1.9.3.2. Résolution spatiale

1.9.3.2.1. Détection des détails fins

Nous nous éloignons un peu de notre propos, car il ne s'agit pas ici à proprement parler de précision géométrique, mais de capacité de détection d'objet. Nous nous permettons cet écart car la détection prime bien évidemment sur la précision...

Contrairement à ce que l'on croit communément, il n'est pas impossible de voir dans une image des détails bien plus petits que la taille du pixel. Il suffit pour cela que le contraste du détail, multiplié par le rapport de la surface occupée par le détail à celle du pixel soit suffisant par rapport au bruit radiométrique.

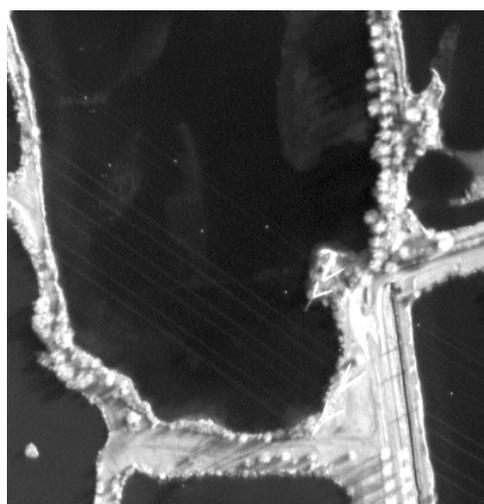


Figure 1.21. *Caméra Numérique*



Figure 1.22. *Image scannée*

Un exemple de cette propriété est donné figures 1.21 et 1.22. Il s'agit d'images prises sur la même zone, un étang sur lequel passent plusieurs lignes à haute tension. La figure 1.21 est un extrait d'image provenant de la caméra numérique de l'IGN. La figure 1.22 est un cliché numérisé. Les tailles de pixel sol sont semblables, de 75 cm. Sur ces deux extraits, on distingue les câbles de

la ligne la plus grosse (probablement doublée), mais la ligne la plus fine n'est visible que sur l'image numérique. La section des câbles n'est pourtant que de 3 cm, c'est-à-dire de l'ordre du $1/20^{\circ}$ de la taille du pixel ! On voit que là aussi, un bon rapport sur bruit dans les images permet de compenser une mauvaise résolution géométrique.

1.9.3.2.2. Pouvoir de séparation

Il semble au premier abord ici que la qualité radiométrique ne peut en rien compenser un mauvaise résolution géométrique. En effet, deux détails situés dans le même pixel ne pourront jamais être séparés. Cette proposition est évidente, mais il faut toutefois la nuancer.

On peut prendre le problème dans l'autre sens, c'est-à-dire s'interroger sur le pouvoir séparateur réel d'images dont la qualité radiométrique est insuffisante. On dit traditionnellement que l'on peut discerner deux détails (choisissons-les brillants par exemple) s'ils sont séparés dans l'image par des pixels sombres. Il est clair que dans le cas de détails peu contrastés, et dans des images de mauvaise qualité, les pixels censés être clairs à cause de la présence des détails auront une certaine chance d'être assombris par le bruit, de même que le pixel qui les sépare aura lui la possibilité, au contraire, d'être éclairci. La situation inverse peut aussi se présenter, où un objet sera faussement dédoublé. On voit que l'on rejoint ici le problème de la segmentation, puisqu'on pose la question : « Ce pixel appartient-il à cet objet ? ».

Étudions donc par exemple un cas concret : la segmentation de zones supposées homogènes. Nous choisissons à dessein un algorithme simple, où un seuil sur les radiométries détermine l'appartenance à une zone ou à une autre. Si le contraste entre les deux zones vaut c , le seuil sera placé à $c/2$ (on suppose le bruit indépendant des radiométries). Quelle est dans ces conditions la probabilité qu'un pixel soit mal classé ? C'est un problème simple de statistiques, lié à l'intervalle de confiance. La réussite du processus de segmentation et sa précision, dépendront évidemment de ce paramètre, de manière hélas non triviale en fonction de l'algorithme utilisé, et des connaissances *a priori* que l'on a des structures dans l'image (bords rectilignes par exemple).

On voit dans les figures 1.23 et 1.24 la même zone dans deux prises de vues simultanées, l'une avec une caméra numérique, l'autre avec une caméra traditionnelle. Si l'on porte son attention sur les pans de toit, on remarque qu'ils sont clairement délimités dans l'image numérique, alors que certaines arêtes sont indiscernables sur l'image scannée. Cette perte de visibilité aura évidemment des conséquences sur la précision de sa restitution, notamment

avec des moyens automatiques. Il est malheureusement impossible de la quantifier ici, car elle dépend évidemment des algorithmes utilisés.



Figure 1.23. *Caméra numérique*



Figure 1.24. *Image scannée*

On peut voir par exemple le résultat du filtre d'extraction de contour d'Adobe Photoshop. Il apparaît clairement que l'extraction des arêtes de toits pourrait se faire plus facilement et plus précisément sur l'image numérique. Remarquez aussi le bord des routes dans les régions ombragées (*cf.* figures 1.25 et 1.26).

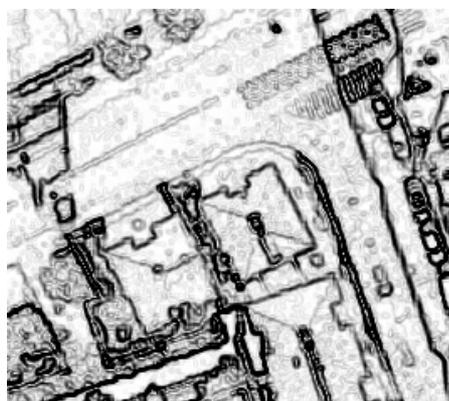


Figure 1.25. *Caméra numérique, contours*



Figure 1.26. *Image scannée, contours*

Pour illustrer encore mieux l'influence de la qualité radiométrique et ses interactions avec la géométrie, observons les figures 1.27 et 1.28 : la même image est ici présentée, mais après avoir été sous-échantillonnée d'un facteur 2.

Cette opération, comme elle moyenne des pixels, diminue le bruit, et on voit que le processus d'extraction des contours marche mieux maintenant, mais son résultat sera évidemment moins précis, car obtenu avec un pixel deux fois plus gros.

Nous n'avons pas ici mentionné la question de l'échantillonnage dans les images, mais elle a aussi bien sûr une influence. Lorsque la FEP est plus grande que le pixel, le contraste entre deux détails proches a tendance à s'atténuer, et donc la restitution des deux détails sera plus sensible au bruit. Lorsqu'elle est plus petite, on ne constate pas d'effet notable.

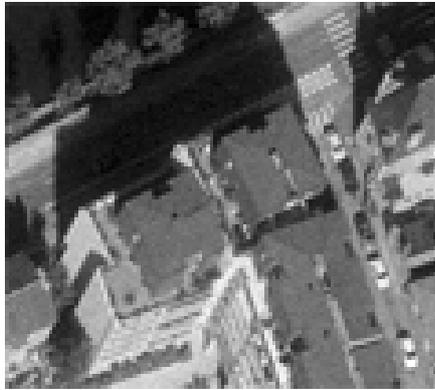


Figure 1.27. *Image scannée sous-échantillonnée*

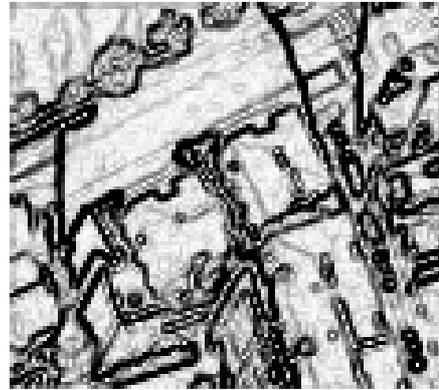


Figure 1.28. *Contours extraits de la figure 1.27*

1.9.3.2.3. Conclusion

Il est clair que pour ce qui concerne la résolution géométrique, la qualité radiométrique apporte beaucoup sur le plan de la détection des détails. Elle a une influence sur la séparation dans le cas de détails faiblement contrastés, c'est-à-dire dont le contraste est du même niveau que le bruit présent dans l'image. Il faut signaler que ces détails sont fréquents dans les zones urbaines, les matériaux de construction étant souvent d'albédos proches (différents types d'enrobée, par exemple), et les zones d'ombre fréquentes.

1.9.4. Conclusion générale

L'impact de la qualité radiométrique sur la qualité géométrique n'est pas toujours facile à évaluer. Le problème est d'ailleurs compliqué par le fait qu'il dépend des algorithmes employés pour la restitution, et de l'adéquation de l'échantillonnage des images. Pourtant, il est réel dans la plupart des cas. Les

études comparatives menées sur la caméra numérique de l'IGN-F et des images argentiques numérisées, à des échelles allant du 1/15 000^e au 1/30 000^e, montrent clairement que la très grande dynamique disponible sur caméra CCD permet d'atteindre les mêmes usages que l'image argentique numérisée, ceci malgré un pixel de côté environ deux fois plus grand. Mais ce coefficient 2 n'est valide que dans cette gamme d'échelles, et d'autres études devront préciser sa valeur pour des pixels plus petits : ce coefficient ne dépend en effet pas que de la qualité radiométrique, mais aussi du type d'objet à lever.