

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU**



**FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT AUTOMATIQUE**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention du diplôme

D'INGENIEUR D'ETAT EN AUTOMATIQUE

Thème

LE RECALAGE D'IMAGES

**Proposé par : M. DIAF
Dirigé par ; Y. MESSAR**

**Présenté par: DIAF Amnaï
BELKACHE Farid**

Promotion 2010

Avant-propos

Ce mémoire a été effectué au département Automatique de l'UMTO.

Nous tenons, en premier lieu, à remercier Monsieur Messar Youcef, enseignant au département Automatique, pour nous avoir dirigés, aidés et conseillés tout le long de notre travail.

Nos vifs remerciements vont aussi à Monsieur AMRANE Nacer, C^{MD} , responsable à l'INCT (Institut National de la Cartographie et de la Télédétection) pour avoir accepté de codiriger le travail de ce mémoire de fin d'études et pour nous avoir bien accueilli durant un mois de stage à L'INCT en mettant tous les moyens à notre dispositions.

Nous ne manquerons pas de remercier Monsieur DIAF Slimane, cadre retraité de la SONEGAS, pour nous avoir donné l'idée de nous engager sur le recalage d'images dans le cadre de ce mémoire.

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur DIRAMI Ahmed, spécialistes du traitement d'images, qui nous fait honneur en présidant le jury de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à Mme BOUDJEMAA Fadhila, enseignante au département Automatique, pour avoir accepté de faire partie du jury d'examen de notre mémoire.

Que Mlle AÏT-AIDER, enseignante au département Automatique, trouve ici nos remerciements pour avoir accepté de faire partie du jury d'examen de notre mémoire.

Nous ne manquerons pas d'adresser notre profonde gratitude à tous nos enseignants et à leur tête Monsieur BENSIDHOUM, Med-Tahar, Chef du département Automatique qui a toujours mis à notre disposition les moyens nécessaires à notre formation.

Nous ne terminerons pas cette page sans adresser nos remerciements les plus chaleureux à l'équipe de l'INCT et particulièrement Monsieur Fatah DEGUERCHIA.

Sommaire

Introduction Générale

Chapitre 1: Généralités sur le traitement d'images

1.1 Introduction.....	9
1.2 Historique	10
1.3 Acquisition des images.....	10
1.4 Les formats de stockage d'images.....	12
1.5 Filtrage d'images.....	13
1.6 Extraction de contours.....	18
1.7 Autres opérations utilisées en traitement d'images	
1.7.1 Addition et soustraction.....	19
1.7.2 Opérations logiques.....	20
1.7.3 Histogrammes.....	20
1.7.4 Image complémentaire (négative)	21
1.7.5 Morphologie mathématique.....	21
1.8 Segmentation d'images.....	22
1.9 Domaines d'application.....	23
1.10 Conclusion.....	24

Chapitre 2: Le recalage d'images

2.1 Introduction.....	25
2.2 Domaines d'application	26
2.3 Principe du recalage d'images.....	27
2.4 Nature des déformations.....	30

2.5	Modélisation des transformations.....	31
2.5.1	Transformations globales.....	32
2.5.2	Transformations locales	38
2.5.3	Acquisition des points d'appui	40
2.6	Ré-échantillonnage et luminance	41
2.7	Conclusion	44

Chapitre 3: Implémentations et résultats

3.1	Introduction.....	46
3.2	Présentation de la télédétection	46
3.3	Logiciels de recalage d'images.....	48
3.4	Applications au recalage d'images	
3.4.1	Images utilisées	48
3.4.2	Méthodes de recalage d'images utilisées.....	49
3.4.3	Implémentation.....	50
3.5	Résultats	
3.5.1	Mise en coïncidence d'une image sur la totalité de la carte	54
3.5.2	Mise en coïncidence d'une image sur une partie de la carte	62
3.6	Conclusion.....	67

Conclusion générale.....	68
---------------------------------	-----------

Références bibliographiques

Annexe

Introduction Générale

Après l'avènement de l'informatique plusieurs domaines d'applications se sont développés rapidement, ces systèmes ne peuvent pas échapper à la marée des systèmes de vision. Ils n'auraient pas percés autant sans voir eux recours aux techniques de traitement d'images.

Le traitement d'images est aujourd'hui une discipline à part entière qui touche plusieurs domaines d'applications tel que la télévision, la médecine, la vision robotique et la télédétection qui tient une place très importante en traitement d'images.

Une des problématiques principales est de mettre en correspondance un ensemble d'images pour regrouper ou comparer leurs informations respectives. Cette technique, appelée recalage, repose sur le calcul d'une fonction de transformation spatiale entre les images afin de les superposer à l'optimum de leurs critères de ressemblance. Ce problème de recalage d'images remonte aux années 1980 et de nombreux algorithmes permettant sa réalisation ont été publiés.

Dans ce mémoire, l'objectif est de nous familiariser avec les technique de base du recalage d'images en vue de superposer des images satellitaires sur des images géo référenciées, particulièrement les cartographies, car l'imagerie spatiale n'a aucune valeur sans l'association de cette dernière à un système de référencé qui permet la correspondance de tout pixel de l'image brute avec son homologue sur la carte. En effet, les images satellitaires ont des géométries particulières liées au mode d'acquisition utilisé, comme elles peuvent porter plusieurs déformations géométriques causées par les différents paramètres internes ou externes au satellite. Elles ne sont pas donc superposables à des cartes ou à d'autres images qui représentent la même zone.

Pour présenter notre travail, nous avons organisé ce présent en trois chapitres, une introduction générale, une conclusion générale, une annexe et une bibliographie de 36 références.

Dans le premier chapitre, nous présentons les notions de base de traitement d'images compte tenu du fait que cette matière n'a pas figuré dans le cursus de notre formation. Il est clair qu'il s'agit, pour nous, prendre connaissance que des notions de base vue l'aspect très vaste de cette discipline.

Le second chapitre présente les origines des déformations de l'image et les différentes approches et les étapes principales du recalage d'images. Dans ce chapitre, nous ne nous intéresserons aussi qu'aux techniques de base du recalage d'images étant donné que ce domaine compte beaucoup d'applications très diversifiées basées sur différentes théories très poussées.

Dans le troisième chapitre nous présenterons l'approche globale et locale de recalage que nous avons adoptée. Des images de télédétection réelles seront calées sur une image géo-référencée. Les résultats seront commentés.

Chapitre 1

Généralités sur le traitement d'images

1. Introduction

Pour un être vivant, la vue est naturellement un sens très sophistiqué qui constitue une riche source d'informations liées aux formes, aux couleurs et aux textures des objets qui constitue l'environnement. Pour exploiter la richesse d'information de cette source naturelle, le monde de la technologie développe de plus en plus de progrès dans différents domaines d'application pour créer, ainsi, une spécialité à part entière qu'est le traitement d'images en utilisant des outils de l'informatique et des mathématiques appliquées. D'autres spécialisations comme la vision artificielle, la reconnaissance de formes, l'analyse de scènes, l'analyse de mouvements, la biométrie etc. sont aujourd'hui en plein essor. Dans tous les cas, l'image qui peut être considérée comme un signal bidimensionnel doit être d'abord acquise, numérisée, codée, prétraitée avant la phase d'interprétation qui fait souvent appel à la notion d'intelligence artificielle.

2. Historique

C'est à partir des années 1920 que le traitement d'images commence à prendre naissance avec les questions liées à la transmission d'images par câble sous-marin et avec des images à rayons X à partir des années 1950

[1]. Cependant, ce n'est que vers les années 1960, avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs, que le traitement d'images commence à se développer, particulièrement, dans le domaine de l'amélioration, de la compression d'images et après l'apparition de la FFT. D'autres opérations telles que l'extraction automatique d'informations, la détection de contours, la morphologie mathématique etc., ont pris un plein essor vers les années 1980. Depuis, des progrès n'ont cessé d'augmenter en terme d'amélioration des opérateurs, de segmentation d'images d'origines diverses et particulièrement médicales, de vision robotique, d'analyse des mouvements, d'images 3D, d'images spatiales, etc.

3. Acquisition des images

Qu'elles soient de télédétection, médicales, industrielles, dans le spectre visible, infra rouge ou autre, les images, sont, tout d'abord, acquises à l'aide du capteur approprié selon le domaine, puis numérisées ou échantillonnées. Le capteur de vision convertit la lumière en tension électrique en fonction du degré de luminosité. Actuellement, la vision artificielle utilise, en général, un capteur visuel de type semi conducteur ou caméra CCD qui fournit un signal vidéo proportionnel à l'intensité lumineuse de la scène observée. En effet, les caméras CCD (Charge Cupled Device) sont constituées d'une matrice ou une ligne de photodiodes dont chacune délivre une intensité proportionnelle en un point de l'image appelé pixel (picture element). Dans le cas d'images en couleur, les photodiodes sont associées à des filtres rouge, vert et bleu (RVB), chacune de ces couleurs étant échantillonnées sur 256 niveaux de luminosité (256^3) ou plus. Dans le domaine médical, les images sont acquises par rayons X, échographie, scanners, résonnance magnétique (IRM), tomographie, endoscopie etc. En télédétection, les images spectrales sont acquises dans différents canaux et à différentes longueurs d'ondes comme nous le reverrons dans le troisième chapitre. Dans le cas de la vision robotique, en particulier, le principe d'acquisition d'une image est donné à la figure 1 suivante.

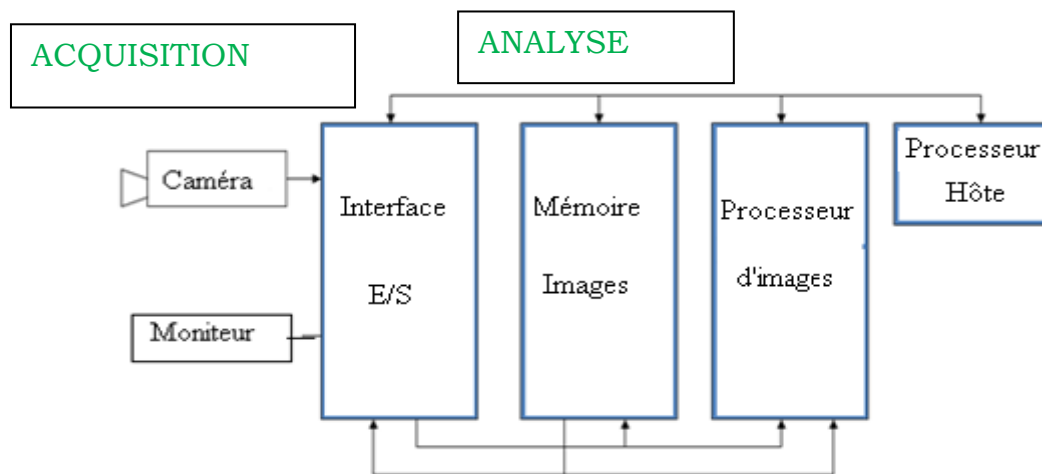
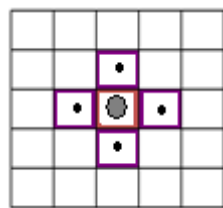
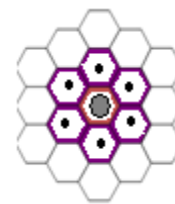
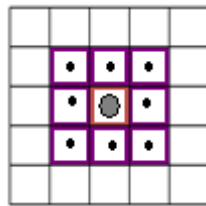


Fig. 1 Principe de la vision artificielle

Ainsi, la partie Interface E/S concerne la numérisation des images et leur visualisation en niveaux de gris ou en couleurs. La numérisation est la fonction qui permet de transformer le signal analogique fourni par la caméra en un ensemble de points ou pixels. Cette numérisation est effectuée par une discrétisation ou échantillonnage de l'espace et une discrétisation de la couleur ou quantification. Selon le système d'acquisition, l'échantillonnage exige un pavage dont les plus connus sont le rectangulaire et l'hexagonal (fig.2).



Pavage rectangulaire
4-Voisins et 8-Voisins



Pavage hexagonal
6-Voisins

Fig.2 Pavage rectangulaire et hexagonal

A chacun de ces points est associé une valeur correspondant à une intensité lumineuse appartenant, généralement, à un intervalle $[0,255]$, le 0 correspondant au noir absolu et le 255 au blanc parfait et ce, dans le cas où la quantification est effectuée sur 8 bits. Selon la puissance de l'ordinateur, cette quantification peut s'effectuer aussi sur 16 bit (65536

niveaux), sur 32 bits ou 64 bits. Notons qu'une quantification trop faible donnera des images moins lisibles à l'œil.



Fig.3 Image quantifiée de Léna [2]

Notons que lors de l'acquisition de l'image, il se pose toujours le problème de l'éclairage et du bruit de la chaîne de transmission d'images ainsi que celui du réglage optique ou mise au point qui permet d'obtenir la netteté. La résolution est aussi un autre paramètre lié au mode de codage utilisé lors de la numérisation et elle détermine la précision des détails que peut enregistrer ou reproduire le dispositif. Elle correspond au nombre de pixels par unité de longueur et elle est mesurée en éléments par unité, c'est-à-dire pixel par pouce (ppp) ou par *inch* (ppi). Dans ce cas, les images sont matricielles (bitmap). Plus la résolution sera grande plus la qualité de l'image sera fine.

Après son acquisition, l'image est ensuite mise dans une mémoire image avec, parfois, plusieurs plans et sous différentes tailles (256x256, 512x512, 1024x1024, etc.). Vient ensuite, la partie contenant les différents algorithmes de traitement tels que l'extraction de contour, la segmentation, les histogrammes etc. La partie « processeur hôte » commande le processeur d'images, l'archivage des images et éventuellement des traitements complémentaires autres que ceux du processeur d'images.

4. Les formats de stockage d'images

Le stockage d'une image sous forme d'un fichier s'effectue sous différents types de formats. Chaque format diffère de l'autre et chaque format comporte un entête appelé header et qui contient particulièrement la dimension de l'image et le format des pixels [3]. Parmi les formats matriciels les plus connus, on peut citer les .BMP, .TIF, .GIF, .TIFF, .PNG

et .JPEG (Tableau I). Ces formats s'appliquent aux images binaires, couleur ou en niveaux de gris. Les images non comprimées, issues directement d'un scanner sont en général des images .TIF. Cependant, certains enregistrements nécessitent une compression qui implique souvent une dégradation une fois décompressée mais tout en restant acceptable [4]. Le format compressé d'images le plus utilisé est le format .JPG et accepte les 16 millions de couleurs. En ce qui concerne .GIF, seulement 256 couleurs sont disponibles. On notera enfin, que le format .TIF, comme le format .BMP ne sont pas diffusables sur le Web.

On peut rencontrer d'autres formats tels que le format .PCX utilisé par toutes les versions de PaintBrush, le .MSP (Microsoft Paint) qui s'applique aux images binaires et utilisé par le programme PaintBrush, le .IMG (Gem Paint) utilisé dans l'environnement graphique et de PAO, le .PNB (Mac Paint) permettant le transfert d'images bitmap entre différentes applications Macintosh, le .EPS (Encapsuled Postscript), utilisé pour la description de page générée par le système Adobe et utilisé par les imprimantes compatibles Postscript.

5. **Filtrage d'images** [5]

Nous rappelons que lors de leur acquisition ou de leur transmission à distance, les images sont bruitées ou affectées de distorsions dues à divers phénomènes dégradant. Le bruit est dû aux conditions de prise de vues tels que le bougé, les mauvaises conditions d'éclairage, le mauvais réglage des capteurs ou capteurs de mauvaise qualité, au problème d'échantillonnage et à la quantification (nombre de photosenseurs CCD) et à d'autres phénomènes comme les poussières, le brouillard etc. Dans de telles situations, des opérations de filtrage, de restauration, et d'amélioration sont nécessaires pour rendre ces images plus exploitables par l'utilisateur.

1.1.1 Tableau I : Différents types de formats les plus utilisés [6]

	Type (matriciel/ vectoriel)	Compression des données	Nombre de couleurs supportées	Affichage progressif	Animation	Tanspa- rence
<u>JPEG</u>	matriciel	Oui, réglable (avec perte)	16 millions	Oui	Non	Non
<u>JPEG2000</u>	matriciel	Oui, avec ou sans perte	32 millions	Oui	Oui	Oui
<u>GIF</u>	matriciel	Oui, Sans perte	256 maxi (palette)	Oui	Oui	Oui
<u>PNG</u>	matriciel	Oui, sans perte	Palettisé (256 couleurs ou moins) ou 16 millions	Oui	Non	Oui (couche Alpha)
<u>TIFF</u>	matriciel	Compression ou pas avec ou sans pertes	de monochrome à 16 millions	Non	Non	Oui (couche Alpha)
<u>SVG</u>	vectoriel	compression possible	16 millions	* ne s'applique pas *	Oui	Oui (par nature)

Pour réduire le bruit contenu dans une image, on procède à son filtrage pour l'améliorer, augmentant ainsi sa qualité visuelle. Comme pour un filtrage d'un signal monodimensionnel, cette opération peut s'effectuer dans les deux domaines spatial et fréquentiel. Dans le domaine spatial, le filtrage manipule directement les pixels. C'est généralement l'opération de convolution donnée par l'expression suivante qui est utilisée :

$$g(x, y) = (f * h)[x, y] = \sum_{i=x_1}^{x_2} \sum_{j=y_1}^{y_2} h[i, j] f[x - i, y - j]$$

Dans le domaine fréquentiel, le filtrage est basée sur les transformées de Fourier bidimensionnelles directe et inverse données par les expressions suivantes :

$$F[m, n] = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f[x, y] \exp\left(\frac{2j\pi(nx + my)}{M.N}\right)$$

$$f[x, y] = \frac{1}{M.N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{M-1} F[m, n] \exp\left(-\frac{2j\pi(nx + my)}{M.N}\right)$$

Le filtrage est aussi exprimé comme étant une transformation T de l'image f en une image g tel que $g(x,y)=T[f(x,y)]$. T dépend donc du voisinage du pixel $p(x,y)$. Si le voisinage $V(p)$ du pixel $p(x,y)$ ne contient que le pixel lui-même, alors la transformation T devient un traitement point ou une transformation de l'intensité $s=T(r)$. Si $V(p)$ est plus large, la transformation dépend des valeurs des pixels voisins du pixel considéré. Ainsi, le lissage ou filtrage local supprime le bruit ou les petites variations présentes dans une image. Autrement dit, l'intensité d'un pixel est transformée en fonction des intensités sur un petit voisinage du pixel. Ces pixels voisins d'un pixel constituent des masques pondérés des coefficients et les valeurs de ces coefficients déterminent la nature de la transformation. Dans le cas des bruits "poivre et sel", on peut rencontrer des trous ou des coupures sur des formes ou des frontières. La solution est alors d'appliquer un lissage local.

Les filtres linéaires exprimés sous forme de convolution et de filtres non linéaires comme le filtre médian, anisotrope [7], de Nagao [8], morphologiques [9] etc. On peut aussi citer quelques filtres plus sophistiqués dont les plus connus sont le filtre de Canny [10], de Shen et Castan [11], de Derriche [12] etc.

Lorsque le bruit est additif, l'image bruitée est exprimée par $f(x,y)=g(x,y)+b(x,y)$ où $g(x,y)$ est l'image sans bruit et $b(x,y)$ le bruit. Dans le cas d'un bruit multiplicatif comme pour les images échographiques, nous aurons $g(x,y)=f(x,y).b(x,y)$. Dans ce dernier cas, le filtrage devient plus complexe [13].

Parmi les filtres classiques les plus connus, nous pouvons citer le filtre passe-bas, le filtre passe-haut, le filtre moyenneur, le filtre médian, le filtre gaussien etc. Le filtre passe-haut permet de renforcer les bords pour la mise en évidence des contours et rehausse le contraste. Le filtre passe-bas permet un lissage

de l'image et a tendance à réduire le bruit de haute fréquence et à écraser les contours abrupts. Ce qui rend l'extraction des objets plus délicate. Pour sa part, le filtre moyenneur qui est un filtre passe-bas utilise un voisinage 3x3 tel que :

$$h = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad h = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Ce filtre rend toutefois l'image floue, particulièrement, les contours. Il élimine les dégradations locales de faibles dimensions. Le filtre médian permet de réduire certains types de bruits comme le bruit poivre et sel, c'est-à-dire, très localisés et très perturbant. Il fait partie des filtres non-linéaires. Il élimine le bruit impulsionnel et préserve l'information de contour (fig.4).

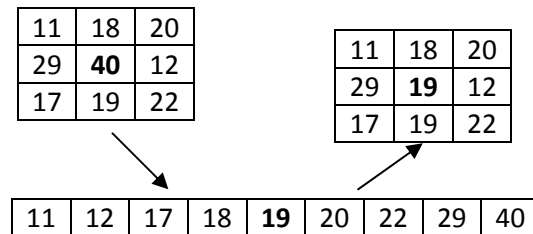


Fig.4 Exemple illustrant le principe d'un filtre médian

Pour le filtre gaussien, la réponse impulsionnelle est donnée par :

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$$

Ce filtre est séparable, isotrope, non récursif.

De son côté, le filtre exponentiel de Shen a pour réponse impulsionnelle :

$$h(x, y) = \frac{C^2}{4} \cdot \exp(-C(|x| + |y|))$$

Ces deux filtres utilisent respectivement le premier et deuxième masque suivant :

$$\frac{1}{273} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{80} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 7 & 3 & 1 \\ 3 & 7 & 16 & 7 & 3 \\ 1 & 3 & 7 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Les figures 5 suivantes montrent des exemples de filtres appliqués à une image.

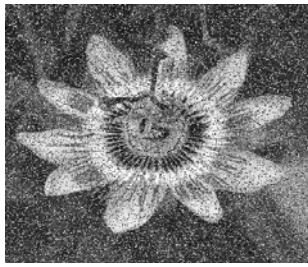
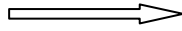


Image originale bruitée



filtre moyennneur: taille 5

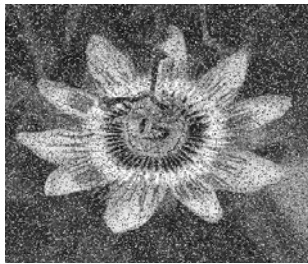
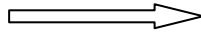


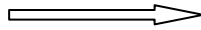
Image originale



filtre median: taille 3



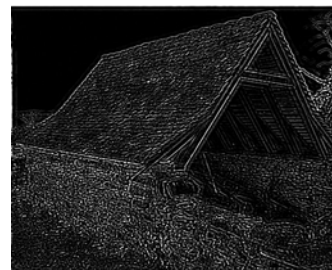
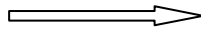
Image originale



filtre passe bas



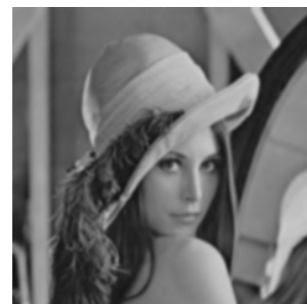
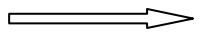
Image originale



filtre passe haut



Image originale



filtre gaussien

Fig.5 Application de différents filtres

6. Extraction de contours

La recherche des contours d'objets est un des problèmes très demandée en traitement d'images. Le contour joue un rôle primordial dans tout système de vision assistée par ordinateur. En effet, le contour apparaît très naturellement comme un indice visuel idéal dans la séparation des régions et l'identification d'objets. Les contours correspondent à des changements brusques des propriétés physiques ou géométriques de l'image perçue et forment ainsi des attributs très importants sur l'analyse. Les contours sont donc les lieux de variations significatives de l'information en niveaux de gris ou en couleur en chaque pixel. Une variation existera si le gradient est localement maximum ou si la dérivée seconde présente un passage par zéro (fig.6).

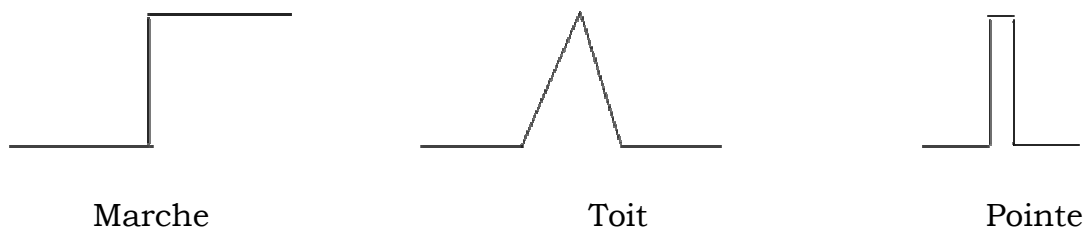


Fig.6 Différent types de contours

Il existe plusieurs techniques qui permettent de détecter un contour. Elles sont basées sur les approches gradient et laplacien.

- L'approche gradient : $\nabla f(i, j) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}(i, j), \frac{\partial f}{\partial y}(i, j) \right)$
- L'approche laplacien : $\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(i, j) + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(i, j) \right)$

Le gradient, en un pixel, est un vecteur caractérisé par son amplitude et sa direction données par les formules suivantes :

$$\|\nabla f\| = \begin{cases} \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \\ -|f_x + f_y| \\ \max(|f_x|, |f_y|) \end{cases} \quad \theta = \arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right)$$

Les contours sont des lignes de maximum locaux pour les filtres de gradients. Ils sont des suites de points à zéro pour le laplacien.

Parmi les opérateurs les plus connus utilisant le gradient, nous avons les opérateurs de Prewitt, Sobel, Roberts, Kirsh etc... que l'on peut appliquer dans deux directions selon les axes x et y.

Prewitt,

$$h_x = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$h_y = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Sobel,

$$h_x = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$h_y = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Roberts,

$$h_x = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$h_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Kirsh,

$$h_x = \frac{1}{15} \begin{pmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{pmatrix}$$

$$h_y = \frac{1}{15} \begin{pmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{pmatrix}$$

Pour les filtres laplaciens, nous avons les masques suivants :

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -6 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

7. Autres opérations utilisées en traitement d'images

1.7.1 Addition et soustraction

- addition : $p(x,y) = p_1(x,y) + p_2(x,y)$ (seuillage à la valeur maximum)
- soustraction : $p(x,y) = p_1(x,y) - p_2(x,y)$ (seuillage à la valeur minimum)

La figure 7 montre un exemple d'addition et de soustraction d'images.

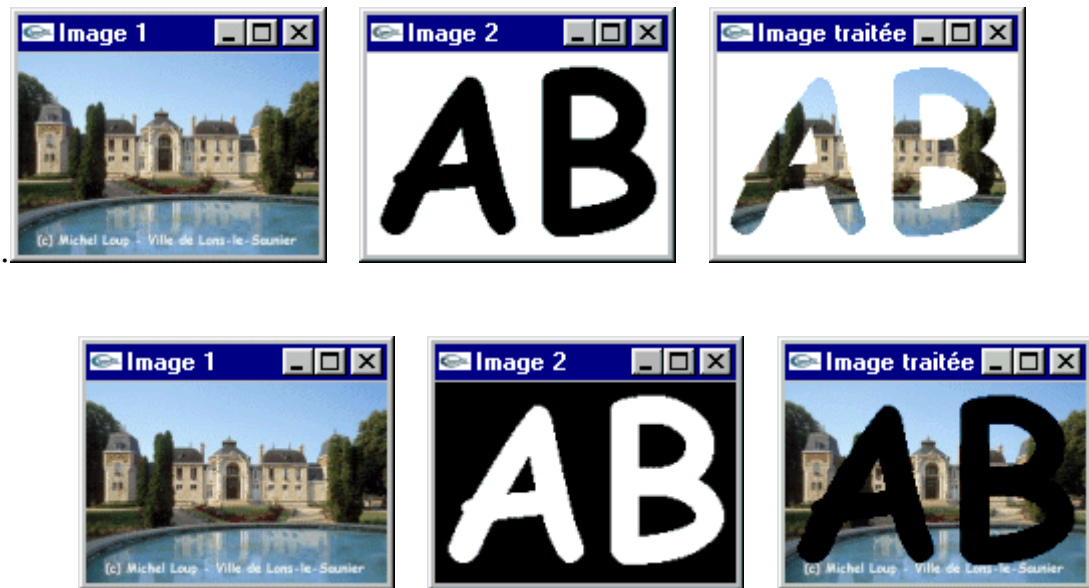


Fig.7 Addition et soustraction d'images [14]

1.7.2 Opérations logiques [15]

Ces opérations sont effectuées bit par bit sur les images:

- **ET** logique : $p(x,y) = p_1(x,y) \text{ et } p_2(x,y)$
- **OU** logique : $p(x,y) = p_1(x,y) \text{ ou } p_2(x,y)$
- **XOR** $p(x,y) = p_1(x,y) \text{ xor } p_2(x,y)$

1.7.3 Histogrammes

L'histogramme d'une image en niveaux de gris est une fonction qui donne la fréquence d'apparition de chaque niveau de gris ou de couleur dans l'image. Les niveaux de gris sont représentés en abscisses. Ce nombre de pixels affectés pour chaque niveau de gris est représenté en ordonnées. L'histogramme est un outil important en analyse d'images, car il représente un résumé simple mais souvent suffisant du contenu de l'image. Il existe différentes formes d'histogrammes. On parlera d'histogramme unimodal lorsque l'image est uniforme. Ainsi, l'image représente soit un objet soit un fond. Il est multimodal lorsqu'il comporte plusieurs modes bien séparés,

c'est-à-dire, plusieurs pics séparés par des vallées [16]. Il nous renseigne sur la présence de plusieurs objets ou régions (fig.8).

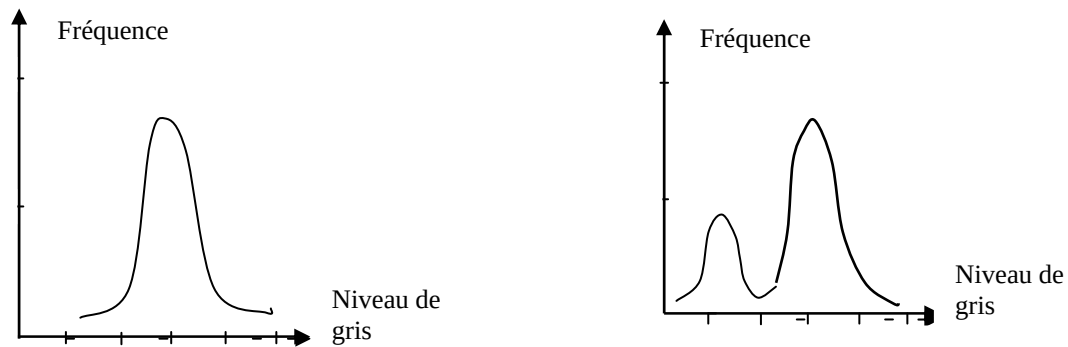


Fig.8 Histogramme unimodal et bimodal

1.7.4 Image complémentaire (négative)

L'image complémentaire est une image obtenue en inversant les valeurs des niveaux de gris de l'image originale. Chaque niveau de gris d'un pixel est remplacé par la valeur symétrique par rapport au niveau de gris médian (fig.9)

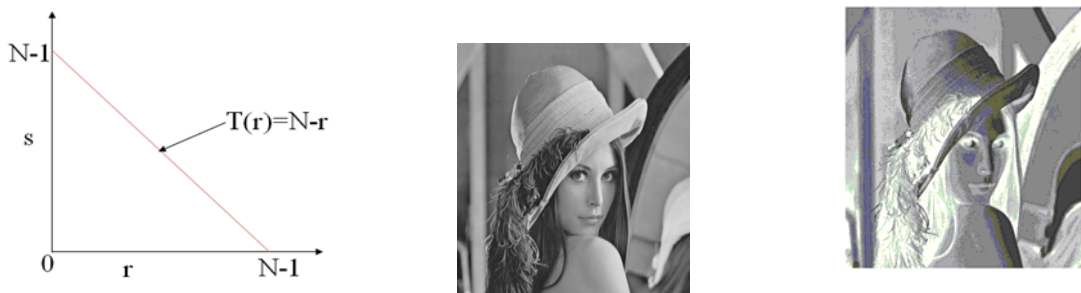


Fig.9 image de Léna et son négatif

1.7.5 Morphologie mathématique [17]

Le principe de la morphologie mathématique consiste à appliquer des transformations morphologiques locales à la surface traduisant les variations des niveaux de gris d'une image. Cette approche fait appel à des opérateurs de base tels la dilatation, l'érosion l'ouverture et la fermeture morphologique.

L'érosion et la dilatation sont des opérations appliquées à l'image binaire. L'érosion permet d'éliminer les points blancs et la dilatation

permet d'éliminer les points noirs. Pour une image en niveau de gris, l'érosion réduit les pics et élargit les vallées, tandis que la dilatation élargit les pics et coupe les vallées. L'ouverture consiste en une érosion suivie d'une dilatation. La fermeture consiste en une dilatation suivie d'une érosion. Elles constituent de bons filtres morphologiques puisqu'ils ne modifient l'image qu'en certains points. Les images de la figure 10 montrent des exemples d'application de ces opérations :



Fig.10 a) image d'origine, b) ouverture c) fermeture

8. Segmentation d'images [18]

La segmentation est un processus qui consiste à découper une image en régions connexes présentant une homogénéité selon un certain critère, comme par exemple la couleur [19], la texture [20], l'homogénéité [21] etc. L'union de ces régions doit redonner l'image initiale. La segmentation est une étape importante pour l'extraction des informations qualitatives de l'image.

Les algorithmes de segmentation d'images sont nombreux et peuvent être regroupés en trois grandes classes, à savoir:

- Segmentation basée sur les pixels,
- Segmentation basée sur les régions,
- Segmentation basée sur les contours,

La première catégorie travaille sur des histogrammes de l'image. La deuxième catégorie correspond aux algorithmes d'accroissement ou de découpage de régions. L'accroissement de région est une méthode bottom-up : on part d'un ensemble de petites régions uniformes dans l'image (de

la taille d'un ou de quelques pixels) et on regroupe les régions adjacentes de même couleur jusqu'à ce qu'aucun regroupement ne soit plus possible. Le découpage en régions est effectué selon des méthodes d'accroissement: on part de l'image entière que l'on va subdiviser récursivement en plus petites régions tant que ces régions ne seront pas suffisamment homogènes. La troisième catégorie s'intéresse aux contours des objets dans l'image. La plupart de ces algorithmes sont locaux, c'est-à-dire fonctionnent au niveau du pixel. Des filtres détecteurs de contours sont appliqués à l'image. Le résultat est en général difficile à exploiter sauf pour des images très contrastées. Les contours extraits sont la plupart du temps morcelés et peu précis et il faut utiliser des techniques de reconstruction de contours par interpolation ou connaître *a priori* la forme de l'objet recherché.

Parmi toutes ces méthodes de segmentation d'images, celles basées sur le seuillage paraissent les plus logiques puisque, dans un histogramme multimodal, chaque mode correspond à une région. Ceci peut nous mener à l'opération de binarisation [22] où l'on représente l'objet dans une seule couleur et le fond dans une autre, sans toutefois rappeler que, pour cette opération, il existe plusieurs méthodes basées sur des concepts divers. Pour séparer plusieurs régions, il est nécessaire de déterminer l'ensemble des seuils dans l'histogramme multimodal. Les méthodes utilisées sont encore plus complexes. Notons que les seuils peuvent être déterminés manuellement à défaut de méthode automatique.

9. Domaines d'application

Notons d'abord que, théoriquement, en traitement d'images, on peut faire appel aux disciplines suivantes : la théorie du signal, l'informatique, l'électronique, l'optique, la théorie des systèmes, la neurophysiologie, la statistique, l'analyse numérique etc.

Les domaines dans lesquels le traitement d'images trouve des applications sont les suivants : la photographie, l'astronomie, le contrôle qualité, la médecine, la sécurité, l'aide à la conduite automobile, les études spatiales, l'agriculture, la robotique etc. Dans l'industrie, le contrôle de présence ou

d'absence sur des chaînes de production permet de vérifier en bout de chaîne avec une caméra vidéo la présence d'une pièce dans un ensemble de pièces. En agriculture, on peut contrôler le niveau de maturation des fruits sur une chaîne de conditionnement. Il s'agit de reconnaître à la couleur et à la texture du fruit son degré de maturité et donc la catégorie sous laquelle il sera emballé puis vendu. En cartographie, on peut procéder à la construction et correction de cartes géographiques d'après des images satellitaire ou des images aériennes. On recale d'après des informations topographiques les images reçues, puis on les met sur la carte en correspondance avec les informations trouvées dans l'image telles que les voies de communication, les plans d'eau, les parcelles agricoles etc. Pour sa part, la reconnaissance automatique de l'écriture manuscrite est devenue opérationnelle pour que la majorité des adresses, même si elles sont manuscrites. En analyse de la vidéo, l'objectif de cette technique devenue une discipline depuis les années 2000, lorsque la puissance des processeurs peu onéreux et en particulier des PC a permis des traitements puissants en temps réel. Il s'agit d'interpréter les faits observés à l'image afin de signaler ou d'enregistrer des faits marquants. Le plus souvent, la caméra est fixe et observe les mouvements d'une scène. Les applications sont nombreuses comme la protection des biens, la détection d'intrusion ou d'objet abandonnés, l'identification par biométrie faciale, la sécurité des personnes, la détection de feux industriels, de forêts etc., la surveillance de tunnels, de tuyaux et autres systèmes industriels, etc.

10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les grandes lignes du traitement d'images qui nous ont semblé essentielles. Nous sommes contents des éléments de base de cette discipline pour nous permettre d'aborder le thème de notre mémoire de fin d'études sur le calage d'images qui fera l'objet des prochains chapitres. En effet, il est clair que le sujet traitement d'images est trop vaste pour le détailler dans ce mémoire.

Chapitre 2

Le recalage d'images

2.1 Introduction

L'idée directrice du recalage d'images est de combiner les informations fournies par deux ou plusieurs images d'une même scène mais obtenues à différents instants ou, encore, de différents points de vue ou à l'aide de différentes modalités d'acquisition. Il s'agit, donc, de déterminer la mise en correspondance d'informations telles que les positions, les niveaux de gris, les structures, etc., représentant une même réalité physique sur les différentes images. Le résultat final sera alors donné soit, sous la forme d'un vecteur de paramètres décrivant la transformation qui met en correspondance ces informations, soit, sous celle d'une image résultant de cette mise en correspondance.

Dans ce chapitre, nous ne prétendons pas présenter un état de l'art [23] sur le recalage d'images tant celui-ci est vaste et dépassant de loin le cadre d'un mémoire de fin d'études. Ainsi, après la présentation du domaine d'application, nous nous engagerons sur le principe du recalage d'images et décrirons les méthodes usuelles en rappelant les bases mathématiques pour la détermination de la transformation de mise en correspondance des images ainsi que les différents éléments d'un système de recalage à savoir, les points d'appui, la modélisation et le ré-échantillonnage.

2.2 Domaines d'application

En traitement d'images, le recalage est une technique qui consiste en la mise en correspondance d'images issues de différents domaines afin de comparer ou combiner les informations qu'elles contiennent. C'est la nature des capteurs utilisés agissant comme des filtres qui sélectionne l'information. Si les modes d'acquisition sont différents, l'expression d'un même groupe d'éléments de la scène peut changer d'une image à l'autre. Comme exemple, en télédétection, domaine auquel nous nous intéressons particulièrement, il existe principalement deux modes d'acquisition. Le premier, dit actif, concerne les systèmes radar. Le second, dit passif, comprend les systèmes hyperspectraux et multispectraux. Les systèmes radar apportent des informations sur les cibles au sol comme leur rugosité, leurs caractéristiques diélectriques (corrélées avec les taux hydriques des cibles, ainsi que leurs teneurs en éléments métalliques), leurs formes et, enfin, leurs orientations. Les systèmes hyperspectraux fournissent des informations liées aux compositions chimiques et minérales d'une scène, information contenue dans un grand volume de données à cause du grand nombre de bandes. Les systèmes multispectraux, quant à eux, fournissent des informations sur la végétation, les incendies et certaines structures géologiques. Ainsi, chaque mode d'acquisition fournit des images qui véhiculent un type d'information bien particulier.

Afin d'être en mesure de recaler des images de types différents, il faut nécessairement qu'il existe une part d'information commune entre les deux images.

Ainsi, deux hypothèses sur les images à recaler peuvent être citées. L'une concerne les déformations géométriques que subissent les images et l'autre concerne le choix d'un modèle de transformation. La première hypothèse concerne donc les déformations géométriques qui sont étroitement liées au choix du modèle de transformations : plus les déformations géométriques sont complexes, plus le nombre de paramètres du modèle doit être important.

Dans le cas d'imagerie médicale, cette technique est utilisée pour, notamment, fusionner plusieurs images d'un même patient en vue d'exploiter les informations fournies dans différentes modalités comme l'imagerie scanner, l'imagerie par résonnance magnétique tout comme elle peut être utilisée pour l'étude de l'évolution, au cours du temps, d'une maladie chez un patient. Dans le domaine du traitement de vidéos, le recalage peut être, également, utilisé pour la détection de mouvements, le suivi automatique d'objets etc. [24].

Plusieurs autres domaines sortant du cadre de notre travail peuvent aussi être cités.

2.3 Principe du recalage d'images

Le recalage d'images est donc un processus visant à déterminer quelle est la meilleure transformation qui permet d'aligner deux prises de vues. La figure 2.1 illustre le cas de deux images I_1 et I_2 de taille et angle différents où l'on cherche à recaler l'image I_2 sur l'image I_1 prise comme image de référence.

Ainsi, d'une manière générale, le problème du recalage se pose comme suit : on dispose de deux ensembles de données (images I_1 et I_2) qui ont été obtenus à partir d'une même scène 3D mais dans des conditions différentes à savoir, des modes d'acquisition différents, des prises de vue faites depuis différents points et à des instants différents. La scène est considérée comme ayant subi des modifications mineures entre les deux acquisitions, de sorte qu'une grande partie des éléments de la scène existe dans les deux ensembles images I_1 et I_2 . En fait, une acquisition consiste en la projection sur un plan 2D d'informations liées à une scène 3D.

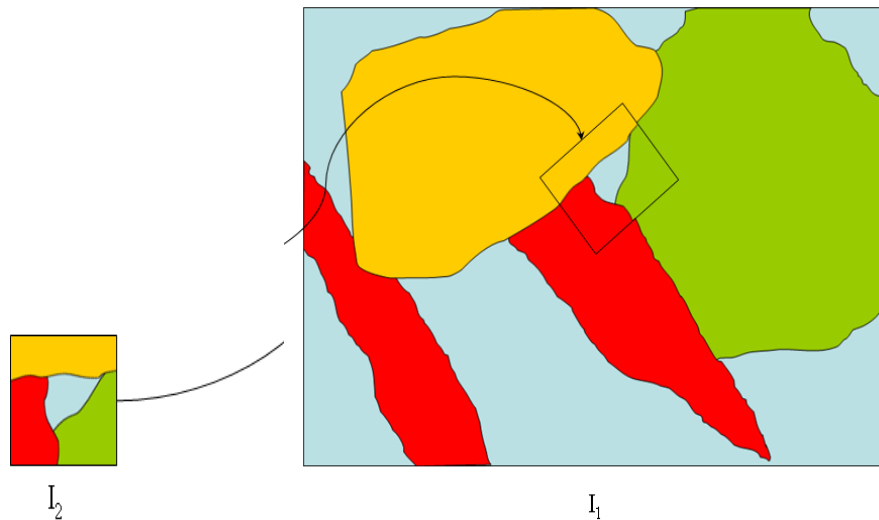


Fig.2.1 Image I_2 recalée sur l'image I_1 . [25]

Le recalage consiste donc à trouver une transformation issue d'un modèle particulier et qui permette de placer, sur un même point du plan, deux projections qui se rapportent aux mêmes éléments de la scène (fig.2.2).

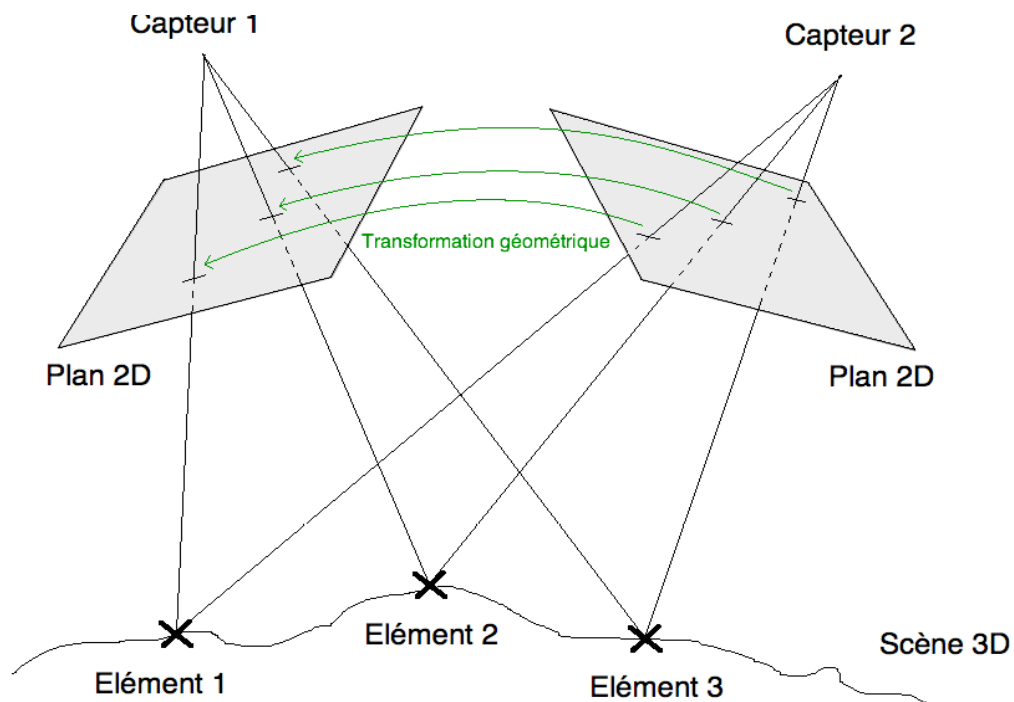


Fig.2.2 Principe du processus du recalage [26]

Cette transformation superpose les pixels de l'une des deux images aux pixels de l'autre image dès que ceux-ci se rapportent aux mêmes éléments de la scène restés identiques. L'image dont les pixels ont subi la transformation est appelée « image esclave », image d'entrée ou « image brute » tandis que l'autre image est appelée « image maîtresse », « image de référence » ou « image de base ». Le problème étant symétrique pour deux

images, ce choix est peu important, a priori. A ce niveau on parle de modèle de déformation directe et inverse (fig.2.3).

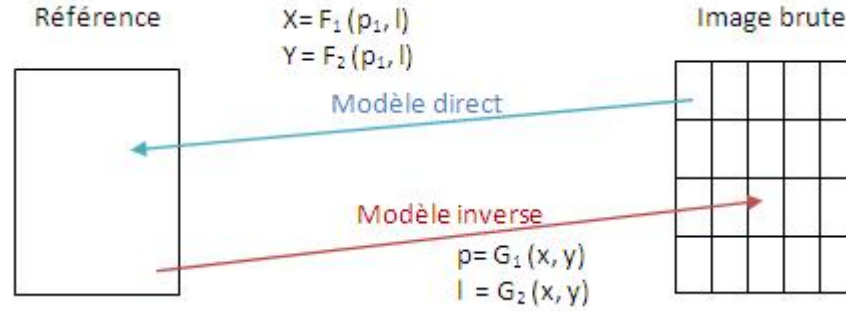


Fig.2.3 Modèles direct et inverse

L'expression des deux modèles peut être une paire de polynômes d'un certain degré. Le modèle direct donne l'expression (x, y) de la référence en fonction des coordonnées (l,p) des pixels de l'image brute. Dans le cas du modèle inverse, les coordonnées de l'image brute (l,p) sont exprimées en fonction des coordonnées de la référence (x,y). Les expressions mathématiques habituellement utilisées sont :

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot l^i \cdot p^{j-i} & \text{et} & & l &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} \cdot X^i \cdot y^{j-i} \\ y &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n b_{ij} \cdot l^i \cdot p^{j-i} & & & p &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} \cdot X^i \cdot y^{j-i} \end{aligned}$$

où x et y sont les coordonnées planes du pixel et $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$, les coefficients des polynômes. La résolution de ces deux systèmes d'équations nous permet de déterminer les coefficients des polynômes direct et inverse.

On rencontre, principalement, deux familles de recalage.

La première famille, englobe les méthodes géométriques basées sur une extraction d'un ensemble de caractéristiques des images (points, contours, formes) et leur mise en correspondance pour déterminer la meilleure transformation à appliquer. Cette transformation est, au final, la fonction qui superpose géométriquement les pixels de chacune des deux images dont il est possible de décider s'ils se rapportent aux mêmes groupes d'éléments de la scène. Les paramètres de cette transformation sont évalués à partir des résultats obtenus à l'aide de l'étape d'appariement [27]. En effet, l'appariement permet d'identifier puis d'apparier les

projections dans les images d'éléments de la scène qui sont restés les mêmes.

La deuxième famille englobe les méthodes iconiques. Parmi les méthodes d'appariement, on peut citer les méthodes iconiques qui prennent en compte l'intégralité des pixels des images et comparent directement leur intensité et en utilisant une mesure de similarité. Ces méthodes permettent l'appariement et reposent sur l'utilisation de critères mathématiques ou statistique définissant une mesure de similarité entre l'image à déformer et l'image de référence sans prendre en compte l'information géométrique. Elles sont plus flexibles et indépendantes de l'application. En revanche le coût algorithmique est beaucoup plus important que pour les méthodes basées sur des points d'appui géométrique.

La figure 2.4 donne les étapes d'un algorithme de recalage (fig.2.4) dans lequel l'étape d'appariement est donc une étape capitale. Elle doit être la plus robuste et la plus précise possible.

- Introduction des images pour le recalage (Image de référence. image brute)
- Modélisation des déformations
- Acquisitions des points d'appuis en cas de transformation géométrique
- Appariement
- Rectification et ré-échantillonnage

2.4 Nature des déformations

Les déformations que subissent les images sont très diversifiées et dépendent des modes d'acquisition. Ces déformations peuvent être d'origines prévisibles ou imprévisibles. Prévisibles, les déformations sont encore dites «systématiques». Elles sont liées, principalement, au fonctionnement du capteur comme cela est décrit précédemment. Par exemple, il peut s'agir de déformations ayant pour origine les changements au niveau d'un capteur aéroporté. Quant aux déformations imprévisibles, elles résultent de paramètres ne relevant pas du système d'acquisition, mais, principalement, des effets de relief pour les images satellitaires. En effet, ceux-ci provoquent des déformations parfois importantes et sans cohérence. Les déformations prévisibles peuvent être corrigées par des traitements préliminaires. Pour les autres cas, il est

nécessaire d'identifier les déformations pour pouvoir les corriger. Dans le cas de variation de relief, si la baseline, *i.e.*, la distance séparant les deux points de vue lors d'acquisitions différentes, est suffisamment petite, les déformations dues aux effets de ce relief deviennent négligeables.

Quelles que soient les déformations, leurs modèles peuvent être de type linéaire (déformations globales) ou de type non linéaire (déformations locales). Lorsque les déformations sont linéaires, les distorsions sont lentement variables, autrement dit, la période est de l'ordre de quelques centaines de points ou de centaines de lignes. Localement, l'image est bonne et affectée seulement d'une translation, rotation ou d'une déformation peu importante. Les transformations s'appliquent à l'image entière et c'est un modèle global qui est utilisé pour ce type de déformation. Lorsque les déformations sont de type non linéaires, les distorsions sont fortement variables, c'est-à-dire, chaque sous-région de l'image possède sa propre transformation. Un modèle local pour ce type de déformation est alors utilisé [28].

2.5 Modélisation des transformations

On rappelle que le choix d'un modèle de transformations est l'une des tâches les plus difficiles car il faut tenir compte des déformations des images et du degré requis de précision du recalage lié au type d'application qui en découlera. Il peut s'agir de modèles à faible nombre de paramètres comme les déformations rigides ou de modèles complexes qui permettent de prendre en compte des déformations à la fois globales et locales. En effet, lorsque la transformation est appliquée à toute l'image, on parle de modèle de transformation global et dans le cas où il s'agit d'une partie de l'image, on parlera de modèle de transformation local. Quel que soit le modèle, pour le recalage, on cherche à déterminer la meilleure transformation parmi un ensemble de transformations caractérisées de :

- rigides lorsqu'il s'agit uniquement d'une translation et de rotation,
- affines pour transformer des lignes parallèles en lignes parallèles,
- projectives pour mettre en correspondance des lignes non parallèles,
- élastiques pour transformer des lignes droites en courbes

Une transformation rigide est un modèle qui peut se décliner selon deux sens de composition à savoir la rotation puis la translation ou la translation puis la rotation. La transformation projective est une relation entre deux plans qu'elle projette l'un sur l'autre. Elle est définie par des paramètres qui peuvent être déterminés par la connaissance des coordonnées de 4 points dans les plans. Cette méthode reste adéquate pour la rectification des images satellitaires. En effet, la surface terrestre ne peut être approximée par un plan à cause de la courbure terrestre et vu la dimension de la scène. Pour mettre en correspondance deux images sonar, par exemple, un modèle de transformation projectif est le mieux indiqué. Cependant, les modèles élastiques restent les plus intéressants puisqu'ils permettent de recalibrer le plus finement possible deux images. Néanmoins, traiter de tels modèles conduit à devoir traiter un nombre très important de paramètres de transformation. Ainsi, pour réduire cette complexité, il est conseillé d'utiliser les transformations rigides locales considérées comme une approximation d'un modèle de transformation élastique global [29].

Le domaine des modèles de transformation étant très vaste, dans ce qui suit, nous nous intéressons aux méthodes les plus usuelles.

2.5.1 Transformations globales [30]

Rappelons que pour les transformations globales, les déformations sont linéaires et les distorsions sont lentement variables. Dans ce cas, les transformations sont géométriques du premier ordre et du second ordre. Parmi celles du premier ordre, nous avons la translation, le relèvement ou cisaillement vertical, l'homothétie, la rotation. Parmi celles du second ordre, on peut citer les modélisations polynomiales [31].

La translation

Dans le cas d'une translation, les coordonnées des points (x_t, y_t) translatés d'une valeur de Δ_x selon les x et Δ_y selon y d'une image par rapport à l'origine de coordonnées x et y sont données par les relations suivantes (fig.2.5) :

$$\begin{cases} x_t = x + \Delta_x \\ y_t = y + \Delta_y \end{cases}$$

2.3

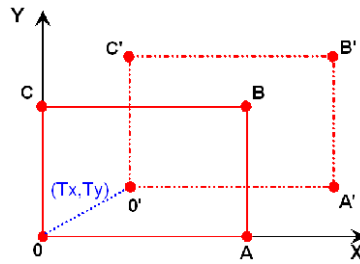


Fig.2.5 Translation d'une image

Le relèvement et cisaillement vertical

$$\begin{cases} x_c = x \\ y_c = \alpha x + y \end{cases}$$

2.4

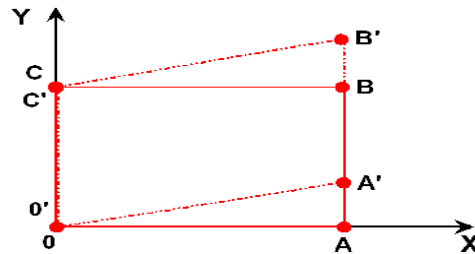


Fig.2.6 Translation d'une image

La symétrie

Si la symétrie par rapport à un axe quelconque peut être définie, ce sont les opérations par rapport à un axe vertical ou un axe horizontal qui sont le plus souvent utilisées. Dans ces cas précis, l'axe étant confondu avec une ligne ou une colonne de pixels, la symétrie revient simplement à un échange de valeurs entre deux adresses de l'image. Pour un axe horizontal défini par $y=s$, la relation est:

$$\begin{cases} x_s = x \\ y_s = 2s - y \end{cases}$$

2.5

L'homothétie, changement d'échelle et dilatation

Des modifications de l'échelle de l'image peuvent être obtenues grâce à des facteurs multiplicatifs (fig.2.7):

$$\begin{cases} x_h = a_x x \\ y_h = a_y y \end{cases}$$

2.6

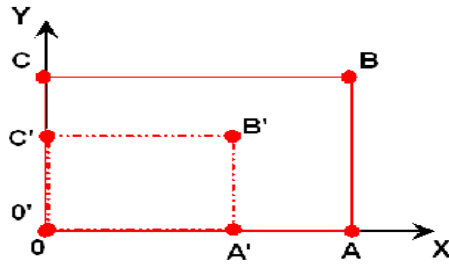


Fig.2.7 Translation d'une image

Si le facteur multiplicatif a est supérieur à 1, on obtient un agrandissement de l'image (fig.2.8). S'il est inférieur à 1, on obtient une réduction de l'image. Une interpolation sera donc nécessaire pour déterminer les valeurs des pixels à partir de l'image de départ.

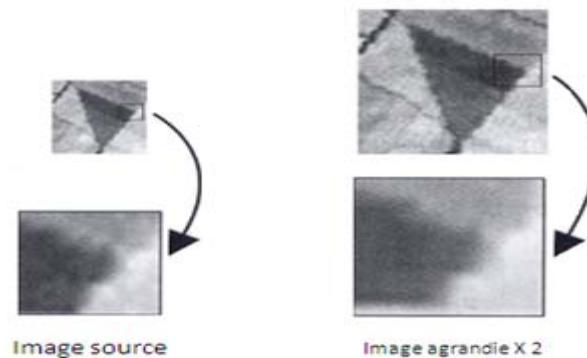


Fig.2.8 Agrandissement d'image sur une parcelle agricole

Dans le cas d'un agrandissement par un facteur entier, la méthode de convolution est utilisée. Pour un agrandissement d'un facteur deux, par exemple, l'image est, dans un premier temps, transférée dans une image deux fois plus grande en x et en y , où chaque pixel est séparé de ses voisins en ligne et en colonne par des zéros (fig.2.9). L'image est ensuite filtrée avec un masque de convolution afin de réaliser l'interpolation pour remplacer les zéros. Pour une interpolation au plus proche voisin, on peut utiliser le masque de convolution suivant:

1	1
1	1

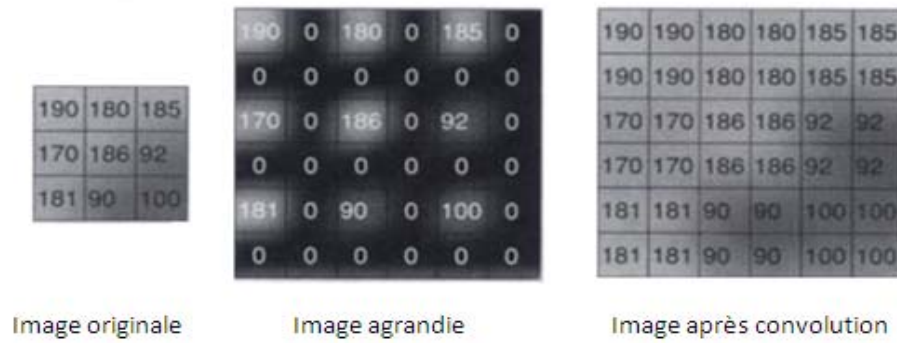


Fig.2.9 Agrandissement par convolution avec une interpolation au plus proche voisin

La rotation

Les équations de rotation par rapport à l'origine sont définies par (fig.2.10):

$$\begin{cases} x_r = x \cos\theta - y \sin\theta \\ y_r = x \sin\theta + y \cos\theta \end{cases}$$

2.7

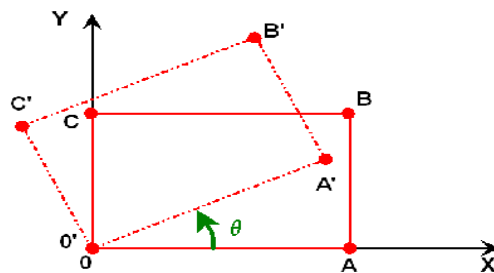


Fig.2.10 Rotation d'une image

Pour contenir toute zone après rotation, la taille de l'image destination doit être agrandie (fig.2.11). Pour une transformation de 45°, la taille de l'image doit être augmentée d'un facteur racine de 2. Il est évident que, pour les certains angles de 90° et 180°, la rotation se ramène simplement à une symétrie.

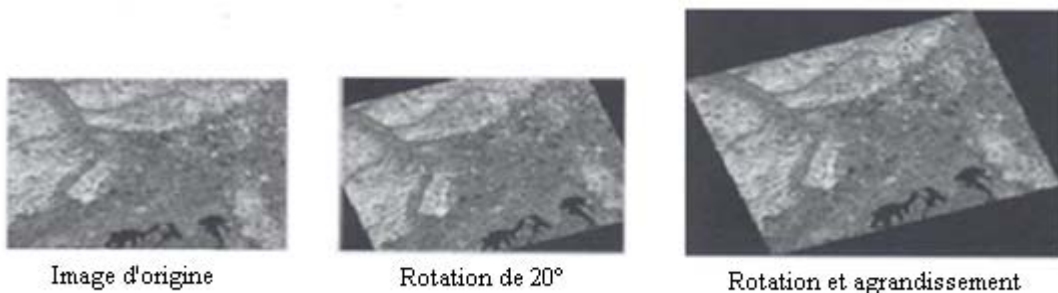


Fig.2.11 Rotation et agrandissement d'images

La combinaison des transformations

Les trois opérations géométriques précédentes, translation, rotation, homothétie, peuvent être combinées linéairement, pour définir des transformations plus complexes. Notons qu'il n'y a pas de commutativité entre ces opérations. L'ordre dans lequel on applique les différents opérateurs a donc une importance. Le résultat fourni par une transformation T1 composée d'une translation suivie d'une rotation est différent de celui fourni par la transformation T2 composée de la même rotation suivie de la même translation. Cependant, à l'aide de modifications des paramètres de ces transformations, le même résultat peut être obtenu. On peut, en effet, ramener toute transformation linéaire à une succession des trois opérations géométriques de base telle que : rotation $\rightarrow$ homothétie $\rightarrow$ translation (fig.2.12). Par combinaison linéaire, une matrice de transformation permettant de définir toute transformation géométrique linéaire peut être établie.

Dans le cas de la combinaison rotation $\rightarrow$ homothétie $\rightarrow$ translation et en utilisant les équations 2.3, 2.6 et 2.7 nous avons les expressions 2.8 en remplaçant x et y par x_h et y_h dans l'équation 2.7, puis x_h et y_h utilisant l'équation 2.6 et, enfin, en utilisant l'équation 2.3.

$$\begin{aligned} \begin{cases} x = x_h \cos\theta - y_h \sin\theta \\ y = x_h \sin\theta + y_h \cos\theta \end{cases} &\rightarrow \begin{cases} x = (a_x x_t) \cos\theta - (a_y y_t) \sin\theta \\ y = (a_x x_t) \sin\theta + (a_y y_t) \cos\theta \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x = a_x (X + \Delta_x) \cos\theta - a_y (Y + \Delta_y) \sin\theta \\ y = a_x (X + \Delta_x) \sin\theta + a_y (Y + \Delta_y) \cos\theta \end{cases} \\ &\rightarrow \begin{cases} x = (a_x \cos\theta)X - (a_y \sin\theta)Y + (a_x \cos\theta \Delta_x - a_y \sin\theta \Delta_y) \\ y = (a_x \sin\theta)X + (a_y \cos\theta)Y + (a_x \sin\theta \Delta_x + a_y \cos\theta \Delta_y) \end{cases} \end{aligned} \quad 2.8$$

L'équation 2.8 se met sous la forme polynomiale de premier ordre tel que:

$$\begin{cases} x = C_1 x + C_2 y + C_3 \\ y = C_4 x + C_5 y + C_6 \end{cases} \quad 2.9$$

Ainsi, toute transformation linéaire peut donc être établie sous une forme telle que l'équation 2.8 définie par des constantes telles C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 et C_6 .

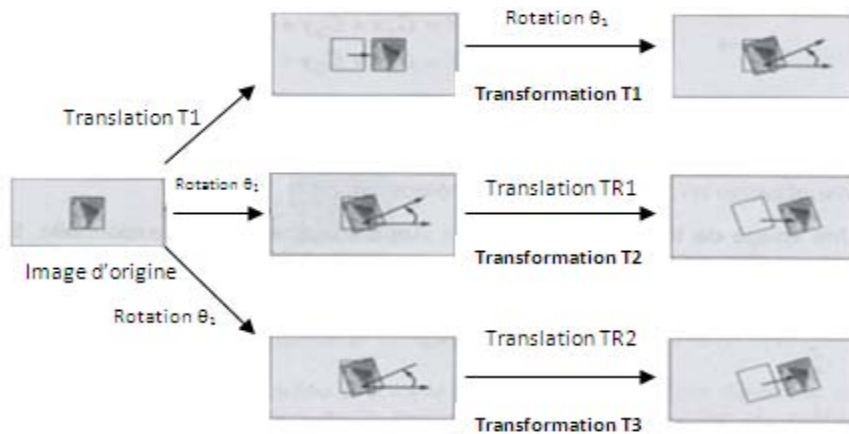


Fig.2.12 Combinaison de transformations

La modélisation polynomiale du second degré

Il arrive que des distorsions complexes et non linéaires affectent l'image à cause de la prise de vue et la nature du terrain. En effet, une prise de vues est une projection sur un plan. Le grand nombre de paramètres intervenant dans une prise de vue de télédétection et la géométrie du terrain observé font que la projection est plus complexe (déformation non linéaire) et très variable selon l'image. Il est difficile de la constituer mathématiquement à partir des paramètres de la prise de vue. On peut faire une estimation de cette transformation géométrique par une modélisation polynomiale en utilisant une équation polynomiale d'ordre deux telle que:

$$\begin{cases} x = C_1x^2 + C_2y^2 + C_3xy + C_4x + C_5y + C_6 \\ y = C_7x^2 + C_8y^2 + C_9xy + C_{10}x + C_{11}y + C_{12} \end{cases} \quad 2.10$$

Sachant que pour la modélisation des déformations d'ordre 1, les coefficients du polynôme peuvent être directement reliés aux déformations géométriques élémentaire mise en jeu (rotation, translation, homothétie). Ce n'est pas le cas pour la modélisation d'ordre deux pour lesquels on ne peut pas donner un sens physique à chaque coefficient. La transformation n'est pas connue, l'équation polynomiale en fournit une estimation. Les coefficients sont calculés afin de minimiser l'erreur quadratique moyenne entre un jeu de points de l'image et un jeu de points géographiquement homologues servant de référence. Ces points servant d'une référence

spatiale (carte, autre image) représentent l'image non déformée. On peut aussi utiliser une équation d'ordre supérieur à deux, mais l'inversion de la relation est alors plus complexe.

2.5.2 Transformations locales

Les transformations précédentes ne corrigent qu'une déformation qui s'applique à toute l'image. Pour les images présentant des distorsions locales importantes, une technique de rectification utilisant un maillage des images permet de mieux les corriger.

La modélisation utilisant la méthode des éléments finis

Pour un maillage triangulaire, en traitement d'images, la méthode des éléments finis est souvent utilisée sous la forme d'une interpolation linéaire. Le maillage découpe les images en régions élémentaires (éléments finis) qui mettent en correspondance l'image source avec l'image de référence. Un modèle de déformation locale est appliqué, région par région. Le découpage de l'image (*tessellation*) peut être automatique et la triangulation peut être utilisée [32] (fig.2.13). Une tessellation d'une surface réalise une couverture de cette surface par un arrangement de polygones non recouvrant. On distingue les tessellations régulières par répétition du même polygone élémentaire et les tessellations irrégulières.

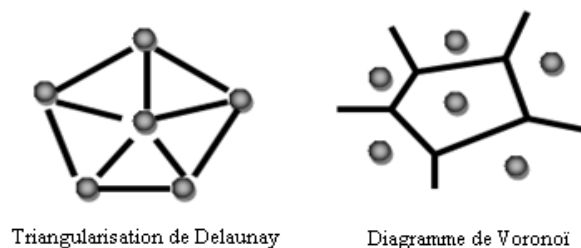


Fig.2.13 Triangularisation

La triangulation de Delaunay et son dual, le diagramme de Voronoï (polygones de Thiessen), sont parmi les plus utilisées des tessellations [33]. Un maillage triangulaire peut être créé à partir des points de contrôle. Les triangles doivent être les plus réguliers possibles. Les coefficients polynomiaux sont alors déterminés pour chaque triangle et la rectification est appliquée au point de l'image, triangle par triangle. La triangulation peut aussi être fixée, pour correspondre aux zones connues de déformation de l'image. Des approximations polynomiales d'ordres

supérieures sont aussi utilisées. Cette méthode est bien adaptée pour des déformations localement linéaires.

Les fonctions multi-quadratiques [34]

Ces fonctions introduites par Hardy, sont utilisées pour la rectification d'images. L'hypothèse de base est qu'une surface mathématique et, plus généralement, une surface quelconque, peut être approximée, à une précision choisie, par une somme de surfaces élémentaires, mathématiquement définies et plus particulièrement des formes quadratiques. Ce sont des méthodes intermédiaires entre les méthodes globales et les méthodes locales. Elles utilisent en effet un modèle global mais qui prend en compte des variations locales en utilisant les expressions suivantes:

$$\begin{cases} x = \sum_i^N = a_i \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + R^2} + P_a(x, y) \\ y = \sum_i^N = b_i \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + R^2} + P_b(x, y) \end{cases} \quad 2.11$$

où (x,y) est le point considéré, N, le nombre de point d'appui, (x_i, y_i), les points d'appui, a_i, b_i, des constantes propres à chaque point d'appui et P_a, P_b, des termes polynomiaux qui ne sont pas toujours utilisés. On note que la racine carrée de $(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$ représente la distance entre le point et un point d'appui (x_i, y_i). La valeur optimale du terme R^2 dépend du type de déformation mis en jeu. Il peut dépendre de la distance entre les points d'appui tel que $R^2 = 0,6 \min \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$, $\forall i, j \in [1 \dots N]$.

Ces méthodes se sont avérées particulièrement efficaces et Hardy, dans une rétrospective, signale près d'une centaine de références concernant leur utilisation pour le recalage d'images [35].

2.5.3 Acquisition des points d'appui

Un point d'appui est un point typique que l'on peut trouver dans la référence et dans l'image et dont les coordonnées (x,y) peuvent être mesurées. Dans le cas d'une image satellitaire, cela peut être une intersection de route, de rivières etc. Cependant, des contraintes doivent être respectées sur cet ensemble afin d'avoir un résultat correct, à savoir :

- la précision qui est définie par une mesure de déplacement;

- la densité qui est définie par un nombre de points d'appui suffisant pour assurer la correction de la déformation;
- la répartition des points d'appui qui doit être faite de façon régulière sur l'image afin que la modélisation de la transformation soit homogène.

L'extraction de l'ensemble des points d'appui se fait par la recherche de points homologues entre l'image et la référence. La recherche, la localisation et l'extraction peuvent se faire d'une manière manuelle ou automatique en procédant à la recherche de ressemblances ou interactives, par identification visuelle. La précision de l'extraction dépend des méthodes utilisées.

Dans le cas de méthode manuelle, l'extraction de points d'appui se fait visuellement, l'image brute et l'image de référence étant visualisées sur un écran. Les positions des points homologues sont repérées à l'aide d'un curseur. Dans le cas où le support de l'image brute est un écran de visualisation et celui de la référence, une image sur papier, l'extraction se fait d'abord par repérage sur l'image et ensuite, par leur identification sur la carte par simple mesure à l'aide d'une règle sur cette image en procédant à un quadrillage métrique.

Pour sa part, l'extraction automatique de points d'appui consiste à rechercher sur l'image des points d'appui par plusieurs méthodes de recherche et de mesures de ressemblance [35].

2.6 Ré-échantillonnage et luminance

Les pixels de l'image recalée, créée par des transformations telle que la rotation, la translation, le changement de résolution ou encore la compensation des effets de relief, ne sont généralement pas situés aux points image de l'image d'origine. Il convient donc d'estimer la luminance des nouveaux points image par l'interpolation des luminances affectées aux points de son voisinage appartenant à l'image d'origine. Cette opération est dénommée ré-échantillonnage.

Le but de ré-échantillonnage est la génération d'une image ayant au plus proche possible la luminance de l'image brute. Les coordonnées des pixels

calculés par les modèles mathématiques (directe ou inverse) ne sont pas généralement entières. Il convient donc d'estimer la luminance des nouveaux pixels de l'image par l'interpolation des luminances des points de son voisinage appartenant à l'image d'origine.

La luminance des pixels est calculée selon l'utilisation de 1,4, ou 16 pixels voisins dans l'image brute. Pour cela, on distingue trois méthodes [36]:

- la méthode du plus proche voisins (1 seul pixel)
- la méthode bilinéaire (4 pixels),
- la méthode bi cubique (16 pixels).

La méthode du plus proche voisin

Le ré-échantillonnage par assignation de la luminance au point le « plus proche voisin » est la méthode d'interpolation la plus simple puisqu'on affecte au nouveau pixel la luminance de son plus proche voisin dans l'image source (fig.2.14). Ce procédé ne provoque aucun lissage puisqu'il conserve les valeurs de la luminance de l'image originale. La dynamique de l'image n'est ainsi pas affectée. En revanche, elle induit une incertitude de positionnement de l'ordre de 0.7 fois sa résolution (demi diagonale) et produit des effets d'escalier notamment sur les éléments linéaires de l'image.

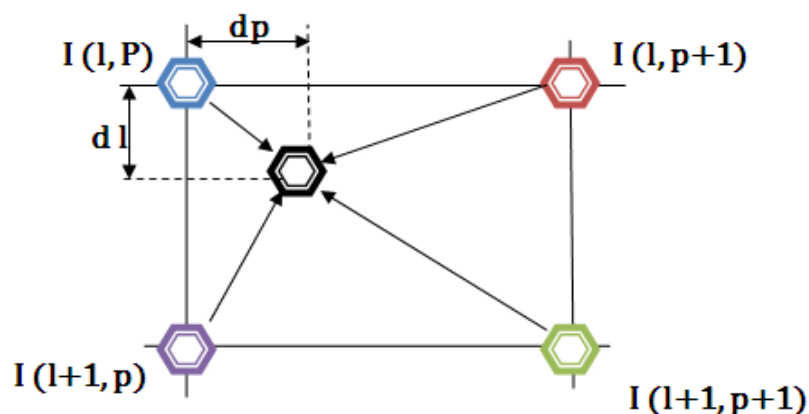


Fig.2.14 Interpolation au plus proche voisin

La radiométrie du point de l'image corrigée de coordonnées (x,y) prendra une valeur de ces plus proche voisins en vérifiant des conditions suivantes:

$$I(x,y) = I(dp, dl) = \begin{cases} I(p,l) & \text{si } 0 \leq dp \leq 0.5 \text{ et } 0 \leq dl \leq 0.5 \\ I(l, p+1) & \text{si } 0 \leq dp \leq 1 \text{ et } 0 \leq dl \leq 0.5 \\ I(l+1, p) & \text{si } 0 \leq dp \leq 0.5 \text{ et } 0 \leq dl \leq 1 \\ I(l+1, p+1) & \text{si } 0 \leq dp \leq 1 \text{ et } 0 \leq dl \leq 1 \end{cases} \quad 2.12$$

où

$$\begin{aligned} dp &= p(x,y) - E[p(x,y)] \\ dl &= l(x,y) - E[l(x,y)] \end{aligned}$$

La méthode bilinéaire

Avec cette méthode, on tient compte de la valeur des quatre pixels environnants du pixel dont on souhaite estimer la luminance. Le calcul se réalise selon diverses procédures. L'une d'elle, illustrée dans la figure 2.15, passe par une interpolation successive de couples de pixels environnants, selon les lignes et les colonnes. On obtient ainsi deux luminances estimées desquelles on tire la moyenne pour l'affectation définitive. La procédure de calcul correspondante se base sur la distance séparant le centre du pixel de l'image finale à celui des quatre plus proches voisins de l'image initiale. La luminance finale est une moyenne pondérée par cette distance.

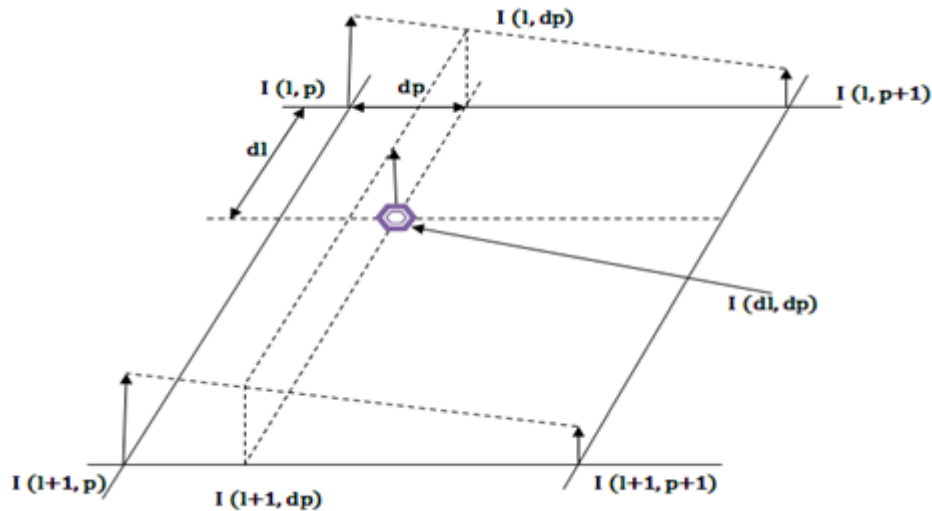


Fig.2.15 Interpolation bilinéaire

Cette interpolation produit un lissage, car on applique une procédure de moyenne pondérée.

En pratique, le calcul avec cette méthode revient à faire trois interpolations dont la formule est la suivante :

$$\begin{aligned}
I(l, dp) &= (dp) \cdot I(l, p+1) + (1-dp) \cdot I(l, p) \\
I(l+1, dp) &= (dp) \cdot I(l+1, p+1) + (1-dp) \cdot I(l+1, p) \\
I(dl, dp) &= (1-dl) \cdot I(l, dp) + dl \cdot I(l+1, dp)
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

La méthode bi-cubique

L'interpolation bi-cubique est réalisée à l'aide de plusieurs polynômes du troisième degré ajustés sur quatre points image de la ligne de la colonne. Une procédure similaire à celle décrite pour l'interpolation linéaire calcule successivement la valeur estimée selon les quatre lignes et colonnes en jeu. La figure 2.16 illustre la méthode.

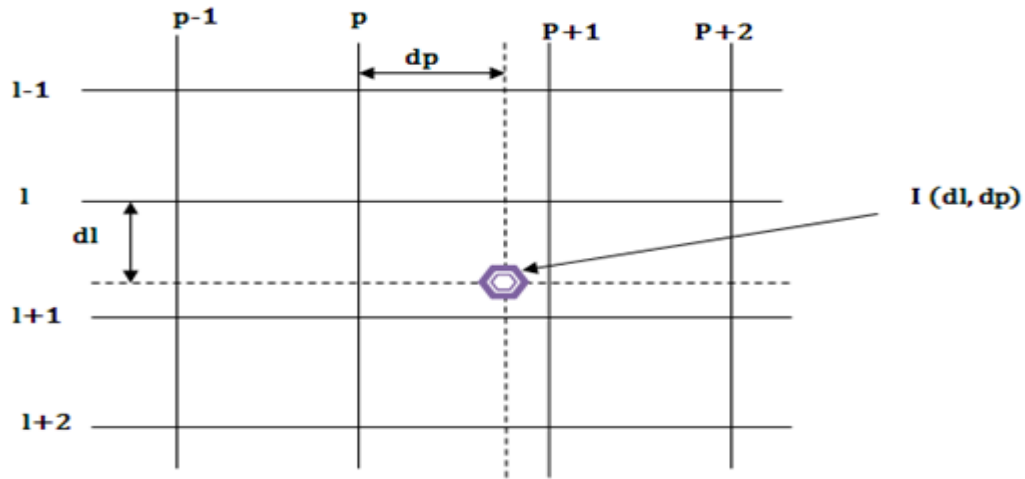


Fig.2.16 Interpolation bi-cubique

L'interpolation bi-cubique ne provoque pas de lissage. Au contraire, elle a plutôt tendance à se comporter comme un filtre de rehaussement et à produire ainsi un léger contraste. Malgré les temps de calcul supérieurs à ceux des autres algorithmes, cette dernière méthode est souvent préférée, car elle conserve assez bien la dynamique de l'image.

La formule utilisée est donnée par :

$$\begin{aligned}
I(x, y) = I(dl, dp) &= I(l, dp) + dl \cdot [I(l+1, dp) - I(l-1, dp)] + \\
&dp^2 \cdot [2 \cdot I(l-1, dp) - 2 \cdot I(l, dp) + I(l+1, dp) - I(l+2, dp)] + \\
&dl^2 \cdot [I(l+2, dp) - I(l+1, dp) + I(l, dp) - I(l-1, dp)].
\end{aligned}
\tag{2.14}$$

2.7 Conclusion

A travers le nombre de travaux effectués en recalage d'images, on constate que ce domaine est très vaste en termes d'applications et de

méthodes utilisées. Beaucoup d'autres domaines et particulièrement celui de la médecine restent un champ d'application en plein expansion. Nous avons aussi cité quelques méthodes et outils mathématiques très complexes sans y entrer dans les détails. En les citant, nous avons mentionné les références bibliographiques s'y rapportant afin d'orienter le lecteur qui souhaiterait en voir les détails. Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux seuls principes de base de recalage d'images plutôt appliquées en télédétection. Une application à ce type d'images fera l'objet du chapitre qui suit.

Chapitre 3

Application en télédétection

3.1. Introduction

Le recalage d'images tient une place très importante en télédétection car on est souvent appelé à superposer une image satellitaire sur une carte géoréférencée. Bien que la recherche dans ce domaine soit très active, il n'existe pas de solution définitive à ce problème. La principale difficulté de recalage survient à la correction des erreurs dues à divers phénomènes atmosphériques et aux équipements embarqués sur les satellites eux-mêmes.

Ainsi, après un bref aperçu sur les satellites d'observations de la terre, nous procédons à l'implémentation nous permettant le recalage d'une image de télédétection.

3.2. Présentation de la télédétection [37]

La télédétection (remote sensing en anglais) est l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'acquisition d'informations sur l'environnement terrestre et de l'atmosphère de la Terre par des mesures effectuées à partir d'un engin spatial évoluant à distance convenable de cette dernière. Ce type de méthode d'acquisition utilise normalement la mesure des rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis par les objets à étudier dans un certain domaine de fréquences (infrarouge, visible, micro-ondes). Ceci est rendu possible par le fait que les objets étudiés (plantes, maisons, surfaces d'eau ou masses d'air) émettent ou réfléchissent du rayonnement à différentes longueurs d'onde

et intensités selon leur état. La télédétection est donc utilisée pour établir des cartes topographiques et constitue aussi un outil de surveillance et d'analyse de la surface de la Terre. C'est aussi un outil de prévision dans différents domaines tels que la météorologie, l'agriculture, l'océanographie, la séismologie etc. Pour répondre à ces besoins, différents systèmes d'observation de la Terre ont été conçus et réalisés par des nations ou des groupes. Ainsi, les satellites de télédétection conçus peuvent être des satellites géostationnaires ou à défilement. Ceux-ci sont, en général, situés à une altitude comprise entre 500 et 800 km, sur une orbite héliosynchrone i.e. l'orbite conserve un angle constant par rapport au plan orbital de la Terre autour du Soleil, ce qui permet au satellite de passer au même endroit à la même heure locale. Les satellites de télédétection sont très nombreux. Les plus connus sont Landsat (USA), Spot (France), Ikonos (USA), Météosat (Europe).

Les satellites Landsat

Lancés à partir du 13 juillet 1972 par la NASA et gérés par le NOAA, les satellites Landsat sont placés sur une altitude de 700 km avec une répétitivité de 16 jours. Ils passent au même endroit tous les 16 jours. Depuis la version 4, les satellites Landsat embarquent un capteur "Thematic Mapper" qui permet l'acquisition de données sur une large gamme d'ondes (8 canaux du violet à l'infrarouge) à une résolution de 28,5 mètres pour un pixel. On en est à la version 7. L'ensemble des images Landsat 5 ont été mis dans le domaine public.

Ces satellites sont caractérisés par une meilleure résolution au sol et une aptitude à se positionner avec précision.

Les satellites Spot

Le système Spot (Système Probatoire d'Observation de la Terre) est une série de satellites d'observation de la Terre qui ont été conçus et lancés par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) de la France, avec l'aide de la Belgique et de la Suède.

Spot-1 a été lancé en 1986, on en est depuis 2002 à la version 5. Les satellites Spot sont placés, à une altitude de 822 km, sur une orbite polaire, circulaire et héliosynchrone. Ils survolent la Terre en tous points au cours d'un cycle de 26 jours. Grâce à leurs capteurs HRV (Haute Résolution Visuelle), ils peuvent travailler en mode panchromatique monospectral (image en niveaux de gris) ou multispectral (4 canaux pour Spot 4 et 5 : vert, rouge, proche infrarouge et moyen infrarouge). Leurs capteurs à barrettes peuvent être dépointés et donc prendre des images "en oblique", ce qui leur donne une fauchée de 60 à 80 km. D'une résolution de 20 mètres à l'origine (10 mètres en mode mono spectral) les images Spot atteignent désormais une résolution de 2,5 mètres avec Spot 5. Cette très bonne résolution couplée à la large fauchée est le grand atout de Spot.

Les satellites Ikonos

Lancé à partir de 1999, à une altitude de 680 km sur une orbite polaire héliosynchrone, les satellites Ikonos se caractérisent par une fauchée réduite (images couvrant une zone de 11 km) avec une très haute résolution de 1 mètre pour un pixel en mode monospectral et 4 mètres en mode multispectral avec 4 canaux. Le satellite Ikonos passe au dessus du même point à la surface du globe avec une fréquence de 3 jours.

Les satellites Meteosat

Réalisés par l'Agence Spatiale européenne (ESA), les satellites Meteosat appartiennent au réseau international des satellites, mis en place dans le cadre de l'expérience météorologique mondiale : meteosat1 lancé le 23 novembre 1977 et Meteosat2 lancé le 19 juin 1981.

3.3 Logiciels de recalage d'images

Le recalage d'images est mal connu du grand public contrairement, aux autres techniques de traitement d'images. Peu de logiciels de recalage d'images sont disponibles et très peu, à caractère gratuit, sont disponibles sur Internet.

Dans le cadre de ce mémoire de fin d'études, nous avons utilisé le logiciel professionnel ERDAS qui a été mis à notre disposition par INCT (Institut National de Cartographie et de Télédétection sis à Alger où nous avons effectué un stage d'un mois. Ce logiciel sous licence mis au point par un laboratoire américain permet la correction des données, des améliorations radiométriques, spatiales, spectrales et hyperspectrales, l'analyse de Fourier (Annexe).

Nous avons testé ce logiciel sur différentes applications. Cependant, nous avons préféré implémenter nous-mêmes quelques méthodes de recalage d'images sous l'environnement Matlab. Dans ce qui suit, nous allons développer et implémenter l'approche méthodologique pour mettre en correspondance une image satellitaire d'une partie de la ville de Tizi-Ouzou prise par le satellite SPOT avec une cartographie beaucoup plus étendue de la région de Tizi-Ouzou et, ensuite, avec une cartographie qui coïncide avec la même ville.

3.4. Application au recalage d'images

3.4.1 Images utilisées

L'image satellitaire brute utilisée de type SPOT a une résolution en niveaux de gris de 24 bits, une taille de 870 x 870 pixels. L'image de référence ou bien la carte topographique a une résolution de 8 bits, inférieure à celle de l'image brute, et une taille de 7593 x 7219 beaucoup plus grande. par la suite, l'autre image de référence de taille 870 x 870, moins grande, pour mieux constater le principe du recalage, sera utilisée. Pour chacune des images, trois contrastes sont enregistrés. La figure 3.1(a) et 3.1(b) montrent, respectivement, l'image satellitaire et la carte-

topographique. L'image (a) n'est pas corrigée a priori et elle inclut, systématiquement, des distorsions. Les deux images sont mises à la même taille en utilisant des fonctions spécifiques de Matlab.

(a)

(b)

Fig.3.1. (a)-Image satellitaire brute, (b)-image cartographique

3.4.2. Méthodes de recalage d'images utilisées

Rappelons que l'objectif de la mise en correspondance d'image est d'aligner l'image brute avec l'image de référence en appliquant une transformation spatiale à l'image brute ou d'entrée. Pour procéder à l'opération de recalage, les deux étapes, à savoir, le choix de la transformation géométrique et la mesure de l'alignement des images sont nécessaires et déterminent la qualité des résultats. Dans notre application, la technique de recalage d'images basée sur des points d'appui choisis par l'utilisateur est utilisée.

Sachant que notre application est effectuée sous environnement Matlab qui contient des outils du traitement d'images avec une disponibilité de nombreuses opérations prêtes à être utilisées, le choix de ces points d'appui est facilité par une présentation d'une fenêtre «Control Point Sélection Tools» dans laquelle sont visualisées les deux images à recaler ainsi que des zones d'intérêt « zoomées » (fig.3.2).

Fig.3.2 Fenêtre « Control Point Sélection Tools »

Ces points d'appui sont souvent pris au niveau d'intersections de routes ou de rivières, etc. Ceci est effectué à l'aide de la souris et d'un curseur. Dans les deux parties zoomées des images à recaler, les deux points d'appuis sont des repères communs aux deux images.

3.4.3 Implémentation

Pour recaler les deux images nous avons suivi les étapes de l'algorithme donné en figure 3.3.

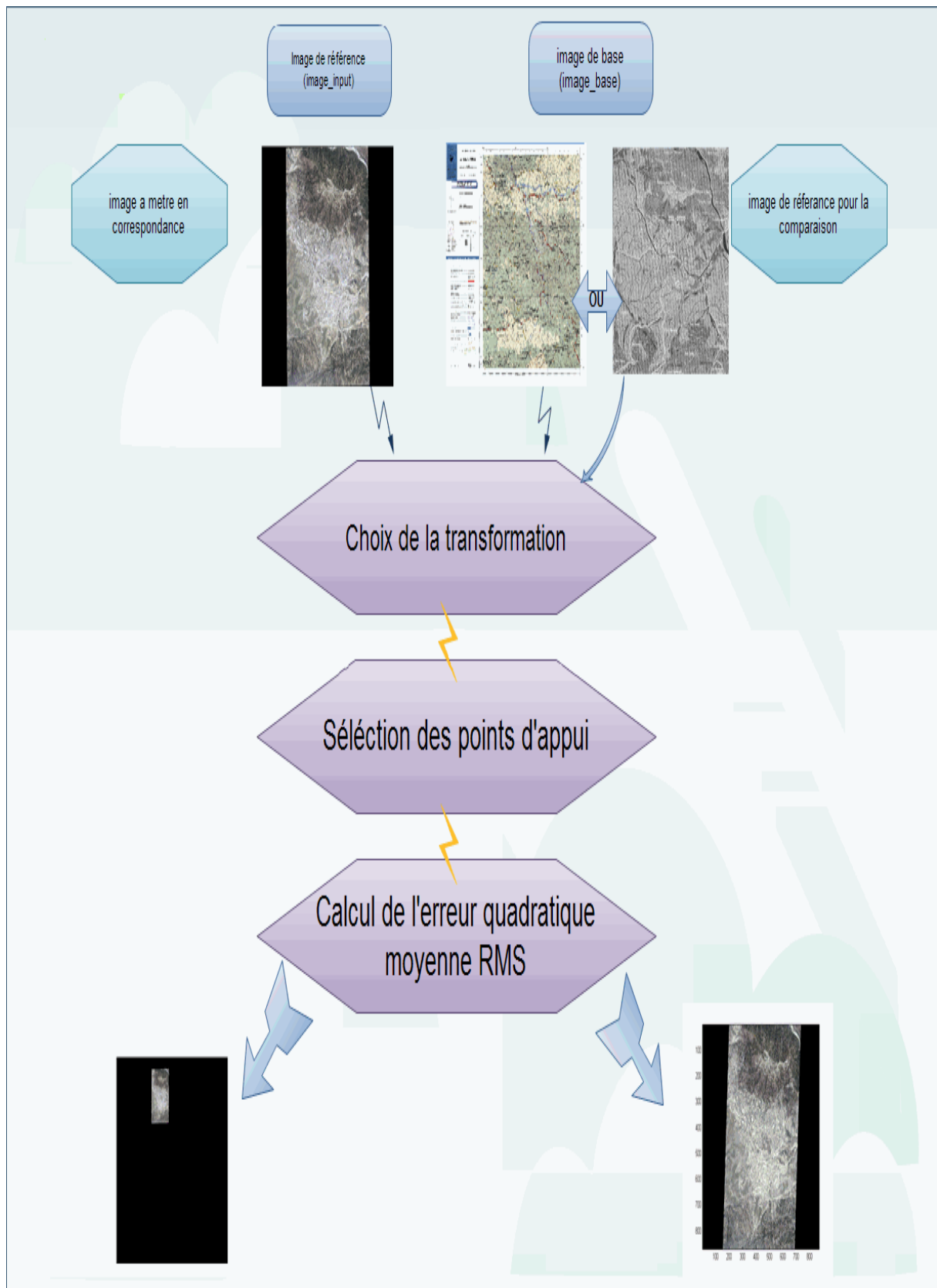


Fig.3.2 Etapes suivies pour le recalage

Choix de la transformation

En ce qui concerne la transformation qui corrigera le type de distorsion dominante dans l'image d'entrée, sachant que certaines images peuvent contenir plusieurs types de distorsion, notre choix a été porté les six mentionnées dans la figure 3.4.

Type de transformation	Nombre minimum de paires De points requis
Linear conformal	2
Affine	3
Projective	4
Polynomial d'ordres 2, 3 ou 4	Respectivement 6, 10, 15
Piecewise linear	4
Local wight mean « Lwn »	6

Fig.3.4 Différentes transformations utilisées

Les quatre premières transformations « linear conformal », « affine », « projective » et « polynomial » sont des transformations globales. Pour les premières transformations l'expression mathématique 2.9 du chapitre précédent est appliquée à l'image entière. Pour la quatrième transformation, c'est l'expression 2.10 qui est appliquée. Les deux dernières transformations « piecwise linear », « local wighet mean », sont des transformations locales disponibles dans Matlab. Le nombre de paires de points d'appui varie en fonction de ces transformations.

Sélection des points d'appui

Comme le montre la figure 3.4, pour chaque transformation, il est nécessaire de fixer manuellement les points d'appui comme cela est expliqué plus haut.

Calcul de l'erreur quadratique moyenne

L'erreur quadratique moyenne (RMS error) montre la précision de la procédure de recalage. C'est la distance entre le point d'appui de l'image de référence et celui de l'image transformée. Elle est donnée par :

$$RMS\ Error = \sqrt{(x_r - x_t)^2 + (y_r - y_t)^2} \quad 3.3$$

x_i et y_i sont les coordonnées de l'image d'entrée et x_r et y_r celles de l'image de référence.

Erreur RMS par point d'appui

Elle est calculée par :

$$R_i = \sqrt{XR_i^2 + YR_i^2} \quad 3.2$$

où R_i : est l'erreur RMS du point d'appui i , XR_i , le résidu de X du point d'appui i et YR_i , le résidu de Y du point d'appui i . La figure.3.5 illustre la relation entre les résidus et l'erreur RMS par point

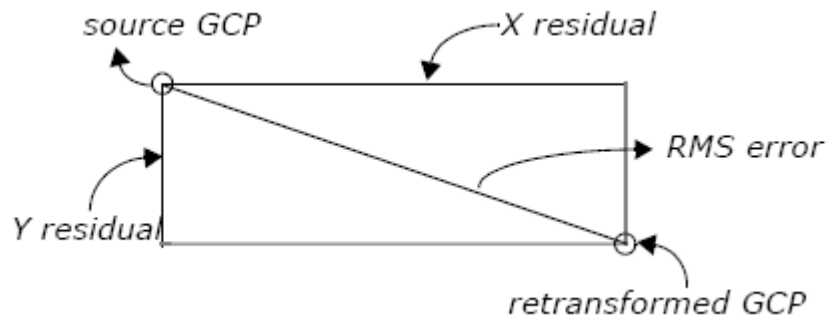


Fig.3.5 Résidu et erreur RMS par point

Erreur RMS totale

L'erreur RMS totale est donnée par les expressions suivantes:

$$R_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n XR_i^2} \quad \text{et} \quad R_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n YR_i^2} \quad \text{et} \quad T = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad 3.4$$

où R_x est l'erreur RMS du selon l'axe des x et R_y l'erreur RMS selon l'axe des y, i , l'indice du point d'appui, n le nombre de points d'appui, XR_i le résidu de X du point d'appui i , YR_i le résidu de Y du point d'appui i et T l'erreur totale.

Tolérance de RMS erreur

Dans de nombreux cas, il est avantage de toléré une certaine marge d'erreur. Comme exemple, si la tolérance de l'erreur RMS est de 2, le pixel de l'image corrigé peut se situer dans le voisinage de 2 pixels autour du point central (fig.3.6).

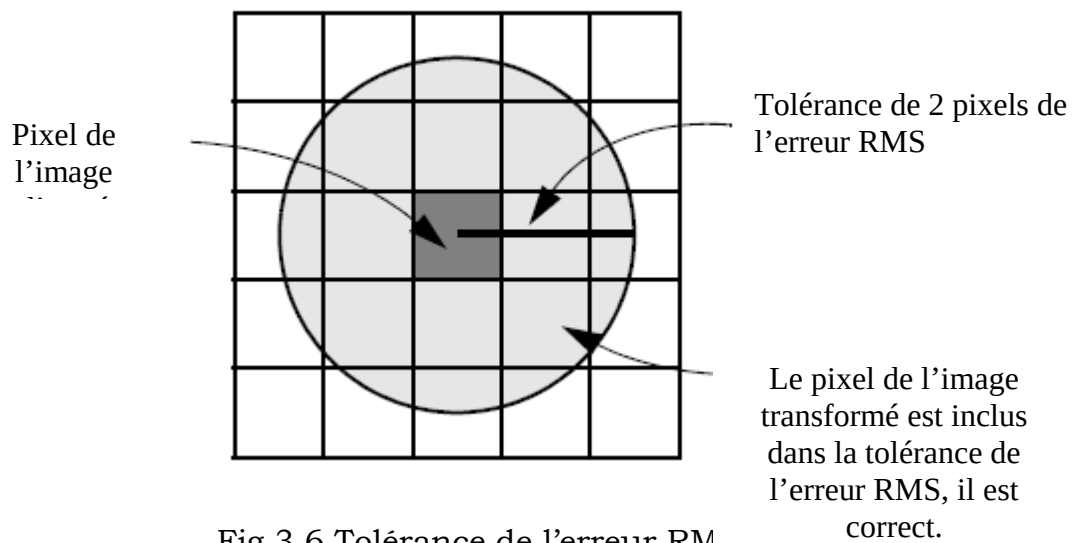


Fig.3.6 Tolérance de l'erreur RM

Dans nos essais, la tolérance est fixée à 10.

3.5 Résultats

3.5.1 Mise en coïncidence d'une image sur la totalité de la carte

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus pour chaque type de transformation citée à la figure 3.4 précédente.

Transformation linéaire

Fig.3.7 Résultats de la transformation linéaire

L'erreur RMS étant de **20.5835**, l'image est mal recalée. Elle présente beaucoup de distorsions. L'image a besoin d'une transformation meilleure.

Transformation affine

Fig.3.8 Résultats de la transformation affine

L'erreur RMS étant de 17.5587, l'image est toujours mal recalée. Elle présente beaucoup de distorsions. L'image a besoin d'une transformation meilleure.

Transformation projective

Fig.3.9 Résultats de la transformation projective

L'erreur RMS étant de 12.3547, l'image est toujours mal recalée. Elle présente moins de distorsions. L'image a besoin d'une transformation meilleure.

Transformation polynomiale

Fig.3.10 Résultats de la transformation polynomiale

L'erreur RMS étant de 10.3547, l'image est toujours mal recalée. Elle présente moins de distorsions. Les points d'appui sont mal répartis.

Transformation piecewise linear

Fig.3.11 Résultats de la transformation piecewise linear

L'erreur RMS étant de 9.2987, l'image est toujours mal recalée. Elle présente des distorsions. L'image a besoin d'autres points d'appui.

Transformation local weighted means (lwm)

Fig.3.12 Résultats de la transformation lwm

L'erreur RMS étant de 7.3547, l'image est mieux recalée. Elle présente beaucoup moins de distorsions.

3.5.2 Mise en coïncidence d'une image sur une partie de la carte

Transformation linéaire

Fig.3.13 Résultats de la transformation linéaire

L'erreur RMS étant de 15.5835, l'image est mal recalée, l'image a besoin d'une meilleur transformation.

Transformation affine

Fig.3.14 Résultats de la transformation affine

L'erreur RMS étant de 23.4595, l'image est mal recalée et n'a pas besoin d'une transformation affine.

Transformation projective

Fig.3.15 Résultats de la transformation projective

L'erreur RMS étant de 11.3508, l'image est relativement bien recalée. Un des points d'appui mal situé.

Transformation polynomiale

Fig.3.16 Résultats de la transformation polynomiale

L'erreur RMS étant de 10.5222, l'image est relativement bien recalée. Les points d'appui sont bien répartis.

Transformation piecewise linear

Fig.3.17 Résultats de la transformation piecewise linear

L'erreur RMS étant de 7.178, l'image est mal recalée. Un point d'appui mal situé et un autre est de très bonne précision.

Transformation local weighted means (lwm)

Fig.3.18 Résultats de la transformation lwm

L'erreur RMS étant de 7.976, l'image est bien recalée. Les points d'appui sont bien répartis et de bonne précision.

3.6 Conclusion

Afin de mettre en application les méthodes théoriques que nous avons étudiées, nous avons utilisé des images réelles de télédétection de type SPOT. Six transformations appelées Linear conformal Affine Projective Polynomial d'ordre 2, 3 ou 4, Piecewise linear et Local wight mean « Lwn » ont été appliquées à une image de Tizi-Ouzou. Les points d'appui ont été choisis manuellement. Pour chaque transformation, l'erreur de recalage a été calculée. Au travers de ces résultats, nous avons constaté que cette erreur augmente lorsque les points d'appui sont mal répartis ou mal positionnés. Pour améliorer les résultats, il serait intéressant d'utiliser d'autres transformations permettant de mieux fixer automatiquement les points d'appui et en utilisant une optimisation.

3.6 Conclusion

Afin de mettre en application les méthodes théoriques que nous avons étudiées, nous avons utilisé des images réelles de télédétection de type SPOT. Six transformations appelées Linear conformal Affine Projective Polynomial d'ordre 2, 3 ou 4, Piecewise linear et Local wight mean « Lwn » ont été appliquées à une image de Tizi-Ouzou. Les points d'appui ont été choisis manuellement. Pour chaque transformation, l'erreur de recalage a été calculée. Au travers de ces résultats, nous avons constaté que cette erreur augmente lorsque les points d'appui sont mal répartis ou mal positionnés. Pour améliorer les résultats, il serait intéressant d'utiliser d'autres transformations permettant de mieux fixer automatiquement les points d'appui et en utilisant une optimisation.

Conclusion Générale

Les comparaisons d'images issues d'une même ou de différentes modalités sont souvent réalisées visuellement par le thématicien ou le praticien. En imagerie télédétection, la résolution spatiale limitée et le caractère bruité des images augmentent la difficulté de cette tâche. Une aide à l'intégration des données est donc utile et ce, de la manière la plus simple, rapide et automatique possible. Cette intégration passe idéalement par 2 étapes.

Tout d'abord un alignement spatial des différentes images ou recalage.

Ensuite, une visualisation adaptée des images recalées ou d'images paramétriques déduites de ces dernières afin d'analyser le résultat.

A travers le nombre de travaux effectués en recalage d'images, on constate que de nombreuses méthodes de recalage ont été publiées, indiquant qu'il s'agit d'un problème pratique important et que la méthode idéale n'existe toujours pas.

Nous avons voulu étudier quelles sont les applications de ces méthodes à la télédétection. Nous avons aussi cité les principes quelques méthodes habituellement. Nous nous sommes donc exclusivement intéressés, après une mise au point globale, au recalage des images de télédétection de type SPOT. Nous avons programmé quelques transformations à savoir la « Linear conformal », l'Affine Projective Polynomial » d'ordre 2, 3 ou 4, la « Piecewise linear » et la « Local wight mean ». Les points d'appui ont été fixés manuellement. Pour chaque transformation, l'erreur de recalage a été calculée nous avons conclu l'erreur de recalage augmente lorsque les points d'appui sont mal répartis ou mal situés. Le choix d'une méthode plus performante peut s'avérer intéressant. Il y a lieu de

maîtriser tester ces autres méthodes sur différents exemples d'images de télédétection ou de médecine.

Références bibliographiques

1. http://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_d'images
2. M. Antonini and V. Ricordel. Chapitre Quantification, pages 45-72. Traité IC2. Hermès, Paris, janvier 2002
3. http://www.photographiz.com/ressources/taille_mode_enregistrement_des_images/
4. Techniques de compression des images, Jean-Paul Guillois, Éditions Hermes, 1996, ISBN : 2-86601-536-3
5. Isabelle Bloch, Filtrage des images, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications - CNRS UMR 5141 LTCI, Paris – France, <http://www.tsi.enst.fr/~bloch>
6. <http://www.eclaircement.com/Les-formats-d-image-matricielle>
7. Auber, Clovis (2005) Filtrage anisotrope robuste et segmentation par B-spline snake : application aux images échographiques, Thèse de doctorat, Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT), 27 Février 2006
8. A. Marion, Introduction aux techniques de traitement d'images, Eyrolles, Paris, 1987. Nouvelle édition 1998.
9. Pierre Soille, Morphological image analysis, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1999 (2nd edition 2003).
10. J. Canny, A computational Approach to Edge Detection , IEEE Transactions on PAMI ; vol. 8, n° 6, nov.1986
11. J. Shen, S. Castan, On optimal linear operator for edge detection, Proc. IEEE Conf. on vision and Pattern Recognition, 1986
12. R. Deriche, Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector, International Journal of Computer Vision, vol.1, n°2, p. 167-187, 1986
13. F. Chapeau-Blondeau, D. Rousseau, S. Blanchard, and D. Gindre. Optimizing the speckle noise for maximum efficacy of data acquisition in coherent imaging. Journal of the Optical Society of America A, 25 :1287–1292, 2008.
14. http://www2.ifi.auf.org/personnel/Alain.Boucher/cours/traitement_images/index.html
15. W. K. Pratt, Digital Image Processing, John Wiley, New York, 1978.
16. Diane Lingrand , Introduction au traitement d'images, Vuibert 2e édition, 2008
17. Jean Serra, Image Analysis and Mathematical Morphology (vol.1), Academic Press, Londres, 1982
18. http://www2.ifi.auf.org/personnel/Alain.Boucher/cours/traitement_images/06-Segmentation.pdf
19. Zugaj, D. and Lattuat, V. (1998) A new approach of color images segmentation based on fusing region and edge segmentations outputs. Pattern Recognition, vol. 31, n° 2, p. 105-113.
20. Saber, E. and Tekalp, A.M. (1998) Integration of color, edge, shape, and texture features for automatic region-based image annotation and retrieval. Journal of Electronic Imaging, vol. 7, n° 3, p. 684-700.

21. Jean-Christophe Baillie. Cours de segmentation. ENSTA ParisTech (France),
<http://uei.ensta.fr/baillie/eng/index.html>
 22. A.Chehikian, binarisation d'images ; deux solutions, Traitement du signal, vol6, n.1, 1989
 23. Zitová, B., Flusser, J., « Image registration: a survey », Image and Vision Computing, vol. 21,n° 11, 2003, p. 977-1000.
 24. K.P. Karmann and A. Von Brandt, Time-varying image processing and moving object recognition, chapter Moving Object Recognition Using an Adaptative Background Memory, Elsevier, 1990.
 25. Cedric Rominger et Arnaud Martin, Recalage et fusion d'images sonar multivues : utilisation du conflit, ENSIETA, Brest, France,
Cedric.Rominger,Arnaud.Martin@ensieta.fr,
 26. Christophe Palmann, Recalage d'images de télédétection : Approche par transformée de Hough, Projet SimGraph, LSIS – UMR CNRS 6168, ESIL, Marseille, France, Francechristophe.palmann@univmed.fr.
 27. Chailloux, C. Recalage d'images sonar par appariement de régions. Application à la génération d'une mosaïque. Ph. D. thesis, ENST Bretagne, 2007.www.enst-bretagne.fr
 28. Chmielewski, L., Kozinska, D., « Image registration », in proc. 3rd Polish Conference on Computer Pattern Recognition Systems, 2003, p. 52-57.
 29. Djamdji J.P., Bijaoui A., Manière R., ,Geometrical Registration of images. The multiresolution approach. Photogrammetric Engineering and Remote sensing 59 pp.645-653 1993
 30. Michel Claude, Girard Colette, Le traitement des données de télédétection, Dunod, Paris, 1999
 31. Outterbroze, C., Louf, F., Champaney,L. Recalage de structures légères par une approximation polynomiale en vue de leur contrôle actif. CFM 2009 - 19e Congrès Français de Mécanique. 2009.
 32. Somphone, Oudom, Recalage par éléments finis avec partition de l'unité : applications en imagerie médicale, Thèse, Université Paris-Dauphine, France, 2009France, <http://di.tamu.edu> et <http://dSPACE.org>.
 33. Triangulation de Delaunay,
http://fr.wikipedia.org/wiki/Triangulation_de_Delaunay
-
34. R.L., Hardy, theory and applications of the multiquadratic-biharmonic method, Computers and Mathemasticl Applications, 19,p.163-208, 1996
 35. R.L. Hardy, multiquadraticicequations of topography and other irregular surfaces, Journal of Geophysical researcher, 76(8), p.1905-1915, 1971
 36. M. Kunt, G. Granlund et M. Kocher, Traitement numérique des Images ", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1993.

ANNEXE

Logiciels ERDAS



La sarl DZMAP représente, depuis le 01/12/2008 GEOSYSTEMS France, chargée de la commercialisation des produits ERDAS en France et Afrique francophone et devient ainsi la seule société habilitée à assurer les services de vente, de maintenance et de formation des logiciels ERDAS sur le territoire algérien. La gamme proposée englobe les fonctions de création "Author", de gestion "Manage", de connexion "Connect" et de diffusion "Deliver" de l'Information Géographique.

L'approche de ERDAS "Geospatial Business Systems" consiste en la mise en place de plateformes intégrées d'exploitation géospatiale couvrant quatre domaines interdépendants: La création, la gestion, la connexion et enfin la diffusion de l'information géographique.

Comment créer de l'information géographique?

ERDAS IMAGINE :

Leader du marché et solution la plus complète pour manipuler, exploiter et comprendre les données images et vecteurs.

- IMAGINE AutoSync
- IMAGINE Objective
- IMAGINE DeltaCue
- IMAGINE EasyTrace
- Radar Mapping Suite for IMAGINE
- Map2PDF for IMAGINE

LPS:

Des outils pour générer des MNT, produire des orthophotos, faire de la restitution vectorielle 3D, avec un processus orienté production.

- LPS Core
- LPS Stéréo
- LPS ATE
- LPS Terrain Editor
- LPS Productivity Bundles
- ORIMA
- PRO 600
- PRO 600 Fundamentals

- ERDAS Mosaic Pro
- ERDAS Imagine Equalizer

ERDAS ER Mapper :

Préparez rapidement les données avec la compression illimitée et visualisez, augmentez et combinez les images pour extraire l'information quantitative

ERDAS Image Compressor :

Mosaïque, équilibre les couleurs et comprime des centaines ou des milliers de tuiles d'images pour produire une image mosaïque simple.

ERDAS MosaicPro

Outil de réalisation de mosaïques uniformes à partir d'un grand nombre d'images, avec un équilibrage de couleur, de fidélité élevée et une couture efficace.

ERDAS Extensions for ArcGIS

Présentation générale

IMAGINE Professional® offre une suite exhaustive d'outils permettant le traitement et l'analyse d'imagerie géographique, notamment pour la télédétection, et les SIG. Toutes les fonctionnalités d'IMAGINE Essentials® et d'IMAGINE Advantage® se retrouvent dans IMAGINE Professional, qui y ajoute des fonctions avancées telles que la modélisation graphique de processus, les classifications avancées et les outils d'analyse d'image radar.

ERDAS IMAGINE est l'un des premiers logiciels du commerce qui permet à l'utilisateur de créer des systèmes experts de traitement de données géographiques. IMAGINE Expert Classifier™ offre aux utilisateurs d'IMAGINE Professional un outil pour construire et exploiter un système expert pour la classification, le post-traitement des données classées et la modélisation avancée d'un SIG.

Pour une information complète sur les fonctionnalités et les outils disponibles dans IMAGINE Professional, veuillez aussi vous référer aux brochures d'IMAGINE Essentials et IMAGINE Advantage.

Points clefs

Analyse spectrale

Les utilisateurs d'imagerie hyperspectrale souhaitant en extraire rapidement une carte avec des interactions simplifiées (et sans avoir reçu une formation complexe sur la théorie de l'imagerie hyperspectrale) verront immédiatement l'intérêt des nouveaux outils d'analyse spectrale (Spectral Analysis):

● Procédures standard prédéfinies :

- Détections d'anomalies

- Recherche de matériaux particuliers
- Cartographie de matériaux sélectionnés par l'utilisateur
- Identification de matériaux spécifiques
- **Pré-traitement d'images hyperspectrales**
- Spécification de la Largeur/Longueur d'onde des bandes
- Identification des bandes défectueuses
- Extraction par sous-groupe de bandes utiles
- Extraction dans une zone de travail
- Correction Atmosphérique
- Fraction de bruitage minimum
- **Bibliothèques spectrales de références fournies :**
- ASTER
- JPL
- USGS
- Import des nouvelles versions de ces bibliothèques
- Import des bibliothèques SITAC
- Import des bibliothèques SPECMIN
- **Station de traitement d'analyse spectrale :**
- Espace de travail multi-fenêtres, permettant d'accéder à tous les outils, fonctionnalités et fenêtres d'affichage pour l'analyse interactive d'imagerie hyperspectrale, des signatures spectrales et à l'affichage des autres données
- Trois visualiseurs synchronisés et géoréférencés (vue principale, vue générale, vue locale)
- Outil intégré affichant les diagrammes des signatures spectrales
- Outil intégré affichant les bibliothèques spectrales
- Interaction par glisser-déposer entre les pixels de l'image, les diagrammes et les bibliothèques
- Accès à tous les pré-traitements et tâches.
- **Méthodes d'analyses spectrales :**
- Orthogonal Subspace Projection (OSP)
- Spectral Angle Mapper (SAM)
- Spectral Correlation Mapper (SCM)
- Constrained Energy Minimization (CEM)

Résumé - Dans ce mémoire, l'objectif est de nous familiariser avec les techniques de base du recalage d'images en vue de superposer des images satellitaires sur des images géo-référencées, particulièrement les cartographies, car l'imagerie spatiale n'a aucune valeur sans l'association de cette dernière à un système de référencé qui permet la correspondance de tout pixel de l'image brute avec son homologue sur la carte. En effet, les images satellitaires ont des géométries particulières liées au mode d'acquisition utilisé, comme elles peuvent porter plusieurs déformations géométriques causées par les différents paramètres internes ou externes au satellite. Elles ne sont pas donc superposables à des cartes ou à d'autres images qui représentent la même zone. Ainsi, le mémoire est organisé en trois chapitres, une introduction générale, une conclusion générale, une annexe et une bibliographie de 36 références. Dans ce mémoire, il s'agit nous présentons les notions de base de traitement d'images compte tenu du fait que cette matière n'a pas figuré dans le cursus de notre formation. Il est clair qu'il s'agit, pour nous, prendre connaissance que des notions de base vue l'aspect très vaste de cette discipline. Le second chapitre présente les origines des déformations de l'image et les différentes approches et les étapes principales du recalage d'images. Dans ce chapitre, nous ne nous intéresserons aussi qu'aux techniques de base du recalage d'images étant donné que ce domaine compte beaucoup d'applications très diversifiées basées sur différentes théories très poussées. Dans le troisième chapitre nous présenterons l'approche globale et locale de recalage que nous avons adoptée. Des images de télédétection réelles seront calées sur une image géo-référencée. Les résultats seront commentés.

Mots-clé : Recalage d'images, traitement d'images, télédétection