

LES MOSAÏQUES D'IMAGES

François LERUTH

I. INTRODUCTION

Lorsque l'étendue de la zone à cartographier dépasse le champ d'une photographie aérienne ou d'une image de télédétection, il est nécessaire de recourir à l'élaboration d'une mosaïque. Une mosaïque correspond à l'assemblage d'images ou de parties d'images contiguës et prétraitées pour être raccordables géométriquement et radiométriquement. Dans la plupart des cas, les images de télédétection voisines, tout comme les photographies aériennes, présentent entre elles des chevauchements ou bandes de recouvrement, de sorte que l'assemblage conduisant à la mosaïque s'effectue par superpositions partielles des images. Comme dans le reste de l'ouvrage, seules sont considérées ici les images numériques de télédétection, de sorte que les techniques de construction de mosaïques analogiques propres à la photogrammétrie ne seront pas évoquées. Cependant, il existe de nombreuses analogies avec les techniques utilisées en photogrammétrie numérique (Kraus, 1997 ; Schenk, 1999).

La réalisation d'une mosaïque d'images comprend trois étapes essentielles :

- la correction géométrique des images à assembler ;
- l'égalisation des radiométries entre images voisines ;
- l'assemblage des images suivant la meilleure ligne de raccord.

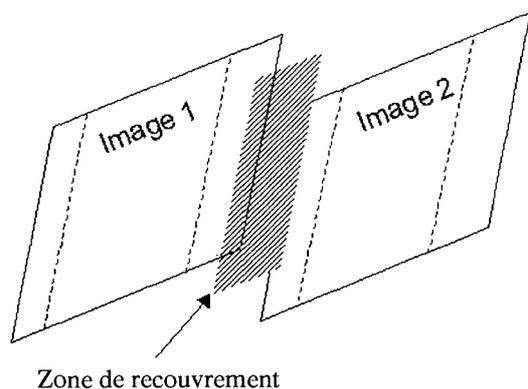


Figure 1. Images contiguës 1 et 2 présentant une zone de recouvrement commune

De plus, lorsque la mosaïque est assemblée, il s'agit de contrôler ses principaux critères de qualité, à savoir sa géométrie et sa radiométrie.

II. LES CORRECTIONS GÉOMÉTRIQUES DES IMAGES

La construction d'une mosaïque est généralement effectuée de proche en proche, en commençant par assembler deux images voisines présentant une zone de recouvrement (Fig. 1), puis en élargissant progressivement le champ par l'assemblage d'une image contiguë à la fois.

Les techniques de correction géométrique développées dans le second chapitre sont d'application lors de l'élaboration d'une mosaïque. Un certain nombre de conditions viennent cependant s'ajouter du fait du traitement de plusieurs images solidaires.

A. Cas standard à grande échelle

À grande échelle, chaque image est corrigée indépendamment, soit par une simple transformation affine, soit par orthorectification, vis-à-vis d'une référence commune. Celle-ci est fournie de façon standard par le système de coordonnées rectangulaires local, tel le système Lambert belge par exemple (Fig. 2). Les coordonnées planes des pixels sont dès lors exprimées en mètres ou en kilomètres vis-à-vis de l'origine du système.

Lorsque l'on sélectionne les amers servant au géoréférencement d'une image isolée, on peut être tenté de négliger les parties de l'image situées le long des bords, en favorisant une répartition régulière des amers au sein du champ. Cela conduit à des altérations géométriques, plus grandes en bordure de l'image que dans sa partie centrale. Si une telle disposition peut être tolérée, dans une certaine mesure, pour une image isolée, elle risque de compromettre la qualité d'une mosaïque. En effet, les bords du champ de chaque image correspondent aux zones de chevauchement entre images voisines, zones où se concentrent les traitements les plus délicats intervenant dans la constitution de la mosaïque. Pour assurer le succès de ces opérations, il est utile de forcer la sélection d'amers au sein des zones de recouvrement, et d'exploiter ces points de référence lors de la correction

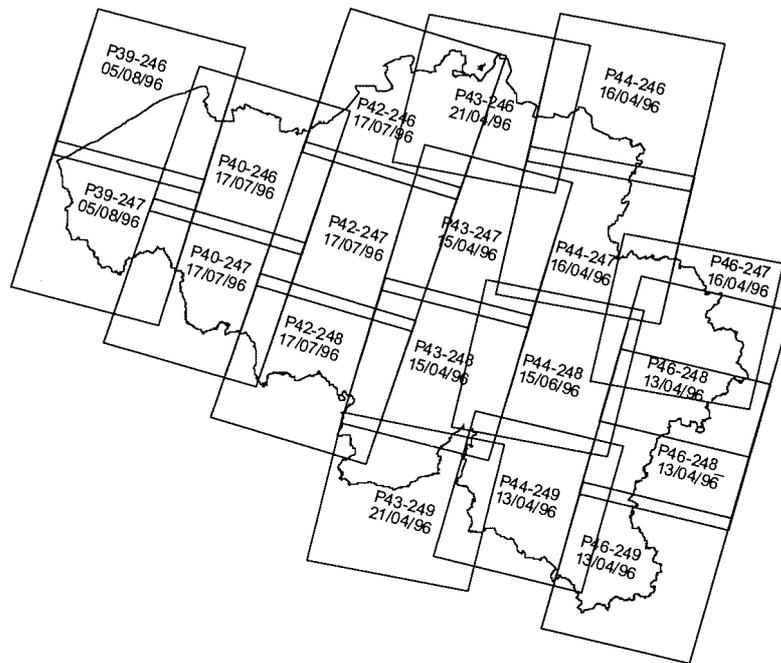


Figure 2. Couverture de la Belgique par une mosaïque de scènes SPOT corrigées géométriquement dans le système Lambert belge

géométrique des deux images partageant la zone de recouvrement.

Enfin, au moment du rééchantillonnage, toutes les images participant à la mosaïque sont amenées à la même résolution, de sorte que tous les pixels couvrent sensiblement la même superficie au sol. Ces conditions suffisent à la réalisation de la mosaïque.

B. Cas particulier à petite échelle

À petite échelle, il n'est pas toujours possible de disposer d'un système uniforme de coordonnées rectangulaires couvrant l'ensemble du champ à cartographier. C'est déjà le cas en région frontalière, lorsque le champ chevauche deux ou plusieurs systèmes locaux de coordonnées rectangulaires et, ipso facto, lorsque l'on travaille à l'échelle d'un sous-

continent ou d'un hémisphère par exemple. Le problème n'est pas propre aux mosaïques, mais il a évidemment plus de chances d'apparaître lorsque l'on augmente le champ de la spatio-carte.

Dans ce cas, il peut être avantageux de choisir le canevas des méridiens et parallèles comme référence spatiale, et d'exprimer la position des pixels à la surface de la Terre en coordonnées géographiques, longitude et latitude. On peut s'y ramener, soit en exploitant les paramètres de vol figurant dans la documentation des images, soit par une dé-projection (passage des coordonnées rectangulaires aux coordonnées géographiques) indépendante de chaque image, après avoir calé celle-ci dans le système local de coordonnées rectangulaires qui lui est propre. Cette solution requiert bien entendu la connaissance des paramètres de chacune des projections utilisées.

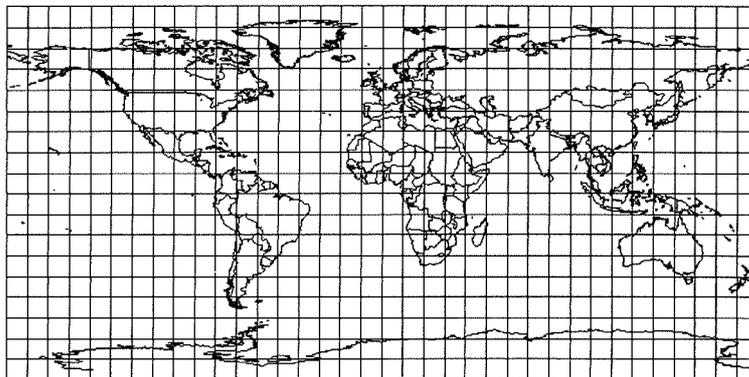


Figure 3. La projection Plate-Carré, ou l'assimilation des coordonnées géographiques à un système de coordonnées rectangulaires

En première approximation, le système de coordonnées géographiques peut être assimilé à un système de coordonnées rectangulaires dans le champ d'une projection Plate-Carrée (Fig. 3). Cette disposition facilite la construction de la mosaïque, mais elle a comme inconvénient que la superficie au sol couverte par chaque pixel augmente avec la latitude.

Une fois l'assemblage d'images effectué en coordonnées géographiques, il est possible de projeter l'ensemble de la mosaïque dans une projection adéquate, déterminée par la position, l'étendue et la forme du champ de la mosaïque (Donnay, 1997a). Dans la mesure où l'opération est réalisée à petite échelle, on choisira une projection conservant la propriété d'équivalence, de sorte que les pixels de

l'image finale correspondent à des superficies au sol relativement similaires. Cette nouvelle projection, réalisée en mode image, introduit un rééchantillonnage supplémentaire, source de nouvelles altérations radiométriques.

C. Correspondance des points homologues

Lorsque toutes les images participant à la mosaïque sont ramenées dans une géométrie commune, c'est-à-dire un même système de coordonnées rectangulaires et une même résolution, la superposition exacte des chevauchements et bandes de recouvrement entre images contiguës devrait être assurée. En d'autres termes, des points homologues tirés dans deux images partiellement superposées doivent présenter les mêmes coordonnées (Fig. 4).

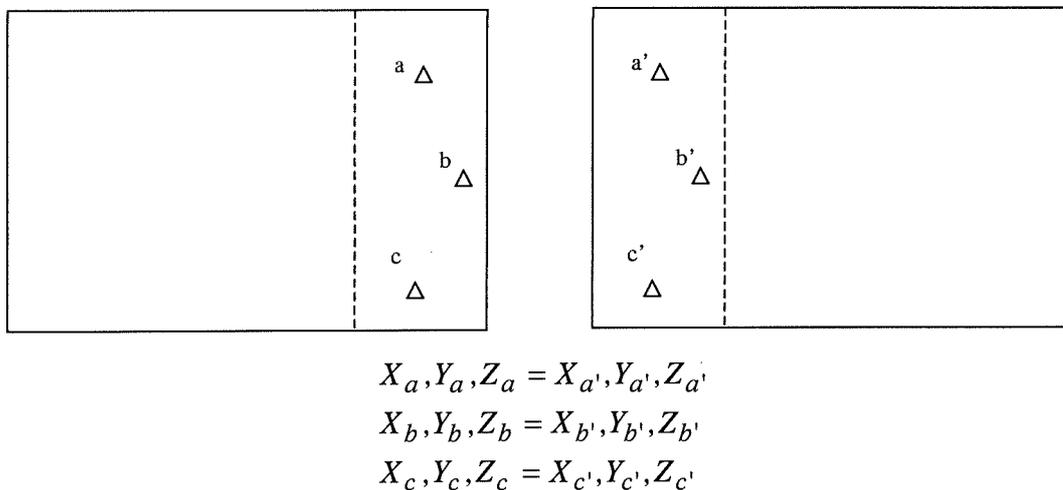


Figure 4. Points homologues sur deux images adjacentes corrigées sur base d'une géoréférence commune et à même résolution

III. LES CORRECTIONS RADIOMÉTRIQUES DES IMAGES

A. Sources d'altérations et types de mosaïques

Il existe déjà, au sein d'une seule image, plusieurs facteurs favorisant l'inconsistance de la radiométrie. Ainsi, une même affectation du sol présentera une signature spectrale distincte selon :

- l'exposition de la pente et l'ombre propre du terrain ;
- l'humidité du sol ;
- les ombres portées, par le relief, les nuages et les autres affectations élevées ;
- les brumes et brouillards locaux (fonds de vallées par exemple) ; etc.

Ces différents facteurs vont bien sûr intervenir également dans le cas des mosaïques, et ils seront d'autant plus sensibles que l'étendue couverte par la mosaïque est vaste, augmentant la variabilité des paysages et multipliant les sources d'altérations. Il faut

ajouter à cela que les différentes images participant à la mosaïque ne sont pas synchrones. Elles sont généralement enregistrées à des dates et à des heures distinctes, ce qui introduit des variations supplémentaires dues :

- à une incidence du rayonnement solaire variable selon les saisons et les heures de la journée ;
- à des conditions atmosphériques différentes au moment des enregistrements et durant les heures qui les précèdent (précipitations déterminant l'humidité du sol par exemple) ;
- à des stades phénologiques différents de la végétation ;
- à des conditions d'enregistrement variables : instruments et calibrages distincts, bruits électroniques propres aux capteurs, etc.

Des corrections radiométriques sont nécessaires au sein de chaque image pour lever certaines ambiguïtés mentionnées au début de cette section. Elles sont réalisées de manière classique indépendamment pour chaque image et, si la mosaïque envisagée porte sur une spatocarte de l'occupation du sol, aucune

correction radiométrique d'ensemble supplémentaire n'est requise. Les classifications des images sont en effet réalisées séparément, en évitant de contaminer la radiométrie d'une image par celle des images voisines. Ce sont les images classées qui font l'objet de la mosaïque et ce n'est qu'après la classification que d'éventuels ajustements devront intervenir s'il existe des ambiguïtés entre les modalités des classifications.

Il en va tout autrement si la mosaïque présente des images en composition colorée. Dans ce cas, il est indispensable d'envisager des corrections radiométriques d'ensemble, **inhérentes à la constitution de la mosaïque**. En effet, les seules corrections radiométriques réalisées indépendamment pour chaque image risquent de renforcer les différences de comportement radiométrique entre images adjacentes, ce qui sera particulièrement apparent en composition colorée le long de la ligne de raccord entre ces images. C'est donc essentiellement le long de ces lignes de raccord, dites aussi lignes de suture, c'est-à-dire au sein des zones de recouvrement entre images voisines, qu'interviennent les corrections radiométriques particulières aux mosaïques.

B. Calages d'histogrammes

Indépendamment des divergences radiométriques apparaissant à l'endroit des recouvrements, il faut s'attendre à ce que les dynamiques d'images enregistrées à des moments et dans des conditions différentes, varient de façon sensible entre les images de la mosaïque. Par conséquent, il est nécessaire de procéder à une harmonisation d'ensemble de la radiométrie sur base d'une image choisie comme référence.

L'image de référence est logiquement celle qui couvre la plus grande superficie au sein de la mosaïque. Les trois canaux de l'image participant à la composition colorée sont soumis à une amélioration de contraste adéquate. Ensuite, les histogrammes des canaux des autres images de la mosaïque sont calés, en moyenne et en écart-type, sur les histogrammes des canaux de l'image de référence. Ces techniques d'amélioration de contraste sont courantes en traitement d'images de télédétection et elles ont été exposées par ailleurs dans cet ouvrage.

Une alternative dans la mise en oeuvre du calage d'histogrammes consiste à travailler en changeant d'image de référence de proche en proche, plutôt que de choisir une référence unique. Les modifications de dynamiques sont moins brutales au terme des calages, mais la procédure ne permet pas de lisser les éventuelles tendances que peuvent enregistrer les dynamiques des images dans l'une ou l'autre direction. Ces tendances sont d'autant plus manifestes que les mosaïques sont étendues, c'est-à-dire que participent à

leur élaboration des images enregistrées à des dates ou à des heures de plus en plus éloignées.

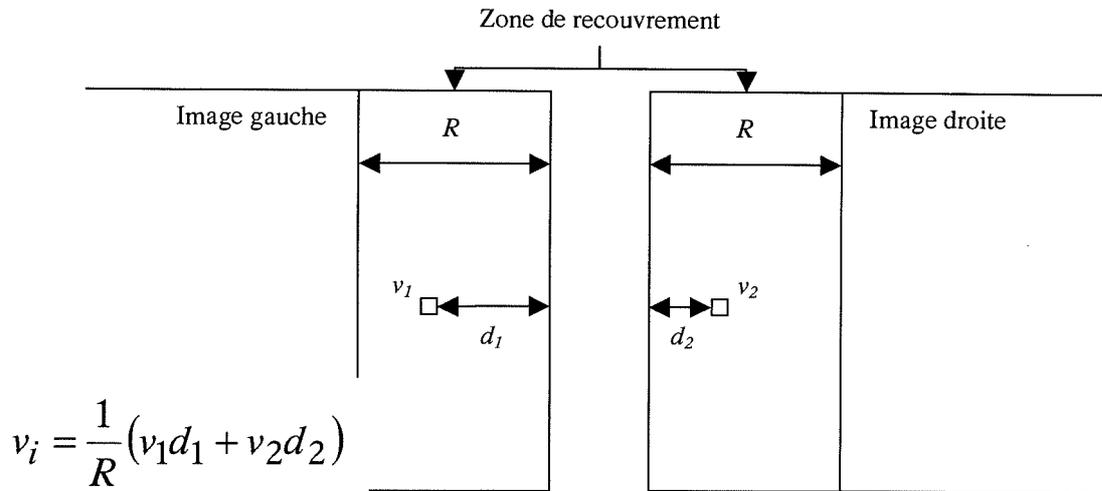
On comprend qu'en matière de mosaïques, comme dans tant d'autres domaines du traitement d'images de télédétection, il n'existe pas de recette unique. Plusieurs essais sont souvent nécessaires, et il faut disposer de méthodes permettant de valider et de comparer les résultats. À cet égard, les méthodes de validation de la radiométrie des mosaïques sont particulièrement originales et sont développées dans une section ultérieure.

C. Traitement des zones de recouvrement

Les corrections géométriques préalables ont fait en sorte que les pixels homologues présents dans la zone de recouvrement de deux images voisines sont strictement superposables. Cela signifie qu'en chacun de ces pixels, il existe deux comptes numériques vraisemblablement distincts, si l'on considère le cas général où deux images seulement participent au recouvrement. La mosaïque finale ne peut bien entendu présenter qu'une valeur par pixel ce qui conduit au choix d'une stratégie pour affecter à chaque pixel de la zone de recouvrement une valeur adéquate. En théorie, trois stratégies au moins peuvent être envisagées, même si en composition colorée la dernière s'impose dans presque tous les cas.

La solution la plus brutale consiste à donner la priorité à l'une des deux images adjacentes. Les pixels de la zone de recouvrement prendront donc les valeurs d'une image choisie par l'opérateur, en ignorant les valeurs homologues de l'autre image. C'est la solution retenue dans une mosaïque d'images classées, dans la mesure où des classifications exactes devraient accorder la même modalité aux pixels homologues des deux images. Dans le cas des compositions colorées, la solution est à proscrire puisqu'elle ignore toute transition radiométrique.

Une autre solution facilement mise en oeuvre dans le cas des compositions colorées consiste à affecter aux pixels de la zone de recouvrement la valeur résultant d'une statistique sur les deux valeurs candidates. Il s'agit généralement de la moyenne des valeurs radiométriques, ou éventuellement d'un extremum (systématiquement la plus petite ou la plus grande des deux valeurs possibles). Le calcul de la statistique peut aussi être effectué dans un voisinage local si la procédure est implémentée dans une fenêtre de convolution. Si la solution permet d'uniformiser ou de lisser l'intérieur de la zone de recouvrement, elle reporte le problème sur les bords de celle-ci, où des contrastes flagrants risquent d'apparaître aux contacts de la zone de recouvrement et des parties non modifiées des deux images voisines.



où :

- v_i : valeur du pixel courant dans la mosaïque ;
- v_1 : valeur du pixel courant dans l'image originale de gauche ;
- v_2 : valeur du pixel homologue dans l'image originale de droite ;
- d_1 : distance séparant le pixel courant du bord de l'image de gauche ;
- d_2 : distance séparant le pixel homologue du bord de l'image de droite ;
- R : largeur de la zone de recouvrement sur la ligne du pixel courant ($R = d_1 + d_2$).

Figure 5. Principe du traitement des zones de recouvrement des mosaïques en composition colorée par moyenne pondérée

La dernière solution, dont plusieurs implémentations sont discutées dans la littérature (Williams, 1995), vise à créer un changement progressif de priorité entre les deux images. D'un bord à l'autre de la zone de recouvrement, on passe d'une priorité absolue à la première image, à une priorité absolue à la seconde image, via une série de valeurs intermédiaires. Celles-ci sont calculées selon une formule de moyenne pondérée, où les poids respectifs des deux valeurs originales sont fonctions de la distance séparant la position du pixel courant de la ligne de suture ou, par défaut, des bords de la zone de recouvrement (Fig. 5).

D. Lignes de raccord ou lignes de suture

On pourrait imaginer qu'une fois réalisées les corrections géométriques et, dans le cas des compositions colorées, les corrections radiométriques adéquates, la construction de la mosaïque se ramène au simple montage d'une grille d'images rectangulaires découpées linéairement au milieu des zones de recouvrement. Tant les mosaïques d'images d'occupation du sol, que celles en compositions colorées sont pourtant montées de façon moins arbitraire et impliquent une opération supplémentaire.

Les images d'occupation du sol participant à une mosaïque ont été corrigées et classées de façon indépendante. Une coupure franche dans la zone de recouvrement de deux images contiguës impliquerait un raccord parfait entre les deux parties de tous les éléments linéaires intersectés par la suture : éléments

de voirie, bordures de parcelles, etc. L'oeil est en effet très sensible à tout décalage d'alignement. Or, il est bien connu que ces éléments d'occupation du sol sont sujets à des confusions fréquentes, au moins sur leur bordure, à cause de leur étroitesse et de la présence de mixels. Toute confusion ou erreur résiduelle de correction géométrique deviendrait par conséquent très perceptible le long d'une suture rectiligne.

En ce qui concerne les mosaïques en composition colorée, ce sont les corrections radiométriques effectuées dans la zone de recouvrement qui ne peuvent garantir une transition parfaite entre deux images voisines. Une coupure arbitraire le long d'une verticale ou d'une horizontale risque donc d'être très vite repérée visuellement. À cela s'ajoutent les mêmes décalages d'alignements susceptibles d'apparaître des suites d'erreurs résiduelles sur la géométrie des images.

Ces différents motifs expliquent pourquoi la suture entre deux images voisines est tracée, au sein de la zone de recouvrement, en s'appuyant sur des pixels situés en bordure de zones fortement contrastées (Zobrist et al., 1983 ; Afek et Brand, 1998 ; McGwire, 1998). Les points d'appui homologues sont repérés sur les deux images le long de brisures naturelles (limites d'affectation), de cours d'eau ou de routes par exemple (Fig. 6 et Fig. 7). Ces éléments doivent être clairement discernables sur les deux images et ne présenter aucune erreur résiduelle notable du point de vue géométrique.

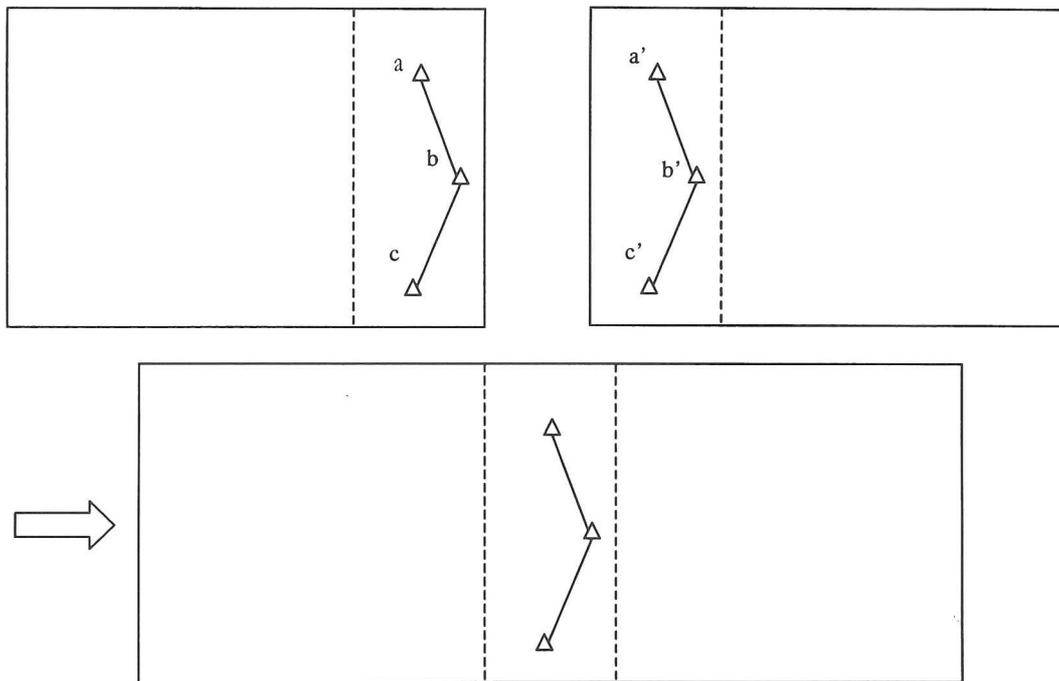


Figure 6. Sélection des points d'appui, construction de la ligne de suture et assemblage des images

Dans la mesure où le traitement différencié de la zone de recouvrement est susceptible d'utiliser la ligne de suture, il peut être utile de procéder à son tracé avant d'appliquer ce type de corrections radiométriques. La délimitation de la ligne de suture doit évidemment être réalisée pour toutes les images prises deux à deux au sein de la mosaïque.

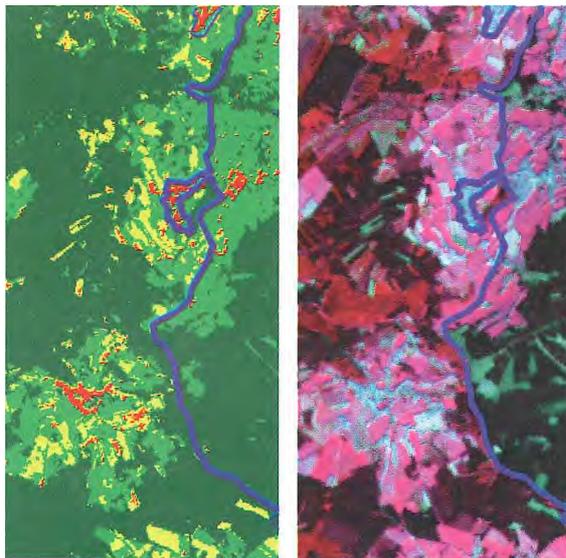


Figure 7. Zone de recouvrement et ligne de suture
À gauche : entre deux images classées.
À droite : entre deux compositions colorées.
La ligne de suture est soulignée en bleu sur les extraits.

IV. LE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DE LA MOSAÏQUE

Comme pour toute spatio-carte, la mosaïque doit répondre aux critères de qualité géométrique sur l'ensemble du champ couvert. Du point de vue sémantique, les critères d'exactitude varient selon qu'il s'agit d'une mosaïque d'images classées des occupations du sol ou d'une mosaïque en composition colorée. Dans les deux cas, cependant, la qualité sémantique doit être respectée à travers tout le champ. Étant donné que les mosaïques sont réalisées par l'assemblage d'images ayant subi une grande variété de traitements, tantôt individuellement, tantôt ensemble, la difficulté réside à maintenir un même degré de qualité, quelle qu'en soit le type, sur l'ensemble de la couverture.

A. Contrôle de la qualité géométrique

Les corrections géométriques ont été réalisées individuellement sur chaque image de la mosaïque de manière à les ramener toutes dans un système de référence commun. Si l'opération est réalisée dans les règles de l'art, la répartition spatiale des erreurs doit être uniforme, c'est-à-dire ne présenter aucune concentration d'erreurs résiduelles importantes. On a insisté sur l'importance d'assurer une qualité géométrique optimum au niveau des zones de recouvrement. C'est donc tout particulièrement le long des lignes de suture que s'effectue le contrôle de la qualité géométrique.

Pour le reste, les techniques de contrôle de qualité géométrique d'une mosaïque ne diffèrent pas

notamment de celles utilisées pour une image isolée. La méthode procède généralement par comparaison des coordonnées de points sondés dans la mosaïque, avec les coordonnées des points homologues localisés sur le terrain ou sur un substitut de terrain. La référence doit présenter une qualité géométrique intrinsèque meilleure d'au moins un ordre de grandeur de celle attendue dans la mosaïque. L'exactitude de position est traduite par un écart quadratique moyen dont la valeur est confrontée aux tolérances admises à la précision et à l'échelle de la mosaïque. La mise en oeuvre du contrôle de qualité géométrique, depuis la sélection des amers jusqu'au calcul des tolérances, a fait l'objet de plusieurs papiers dédiés au cas particulier des mosaïques d'images (Thorpe et Klimiuk, 1994 ; Falkner, 1995 ; Manzer, 1996 ; Afek et Brand, 1998; McGwire, 1998).

B. Contrôle de la qualité sémantique

Le cas des mosaïques d'images d'occupation du sol ne sera pas particulièrement développé. Le contrôle de l'exactitude sémantique consiste à calculer les taux de confusion et d'omission de chacune des modalités de la nomenclature d'affectations. La construction d'une matrice de confusion et les calculs des probabilités et intervalles de confiance globaux et partiels sont similaires à ceux effectués dans toute spatioscène de ce type. L'application peut être réalisée au terme de la classification de chaque image isolée, mais le contrôle de la mosaïque impose une vérification complémentaire au niveau des zones de recouvrement. Les affectations qui figurent dans ces parties de la mosaïque proviennent de la sélection arbitraire d'une des deux classifications se recouvrant. Cette sélection n'a de sens que si les deux classifications candidates sont jugées identiques, ce qui peut être facilement vérifié par une simple différence d'images, pixel par pixel, au sein de la zone de recouvrement. Des taux de confusion faibles et homogènes entre les images isolées et la faiblesse des écarts mesurés dans les zones de recouvrement traduisent le degré de cohérence sémantique de ce type de mosaïques.

Par contre, la qualité sémantique des mosaïques en composition colorée ne présente pas a priori de critères aisément quantifiables ou comptabilisables. C'est visuellement et en termes de cohérence des couleurs qu'est jugée la qualité de la composition colorée. Deux sources d'incohérence seront vite repérées dans la mosaïque et jugées gênantes voire inacceptables :

- une transition brutale de part et d'autre des lignes de suture ou des bords des zones de recouvrement, révélant les limites des images participant à la mosaïque ;
- les variations sensibles de couleurs attachées à des affectations du sol reconnues comme identiques, à travers le champ de la mosaïque.

Ces deux observations ont la même cause, à savoir une correction radiométrique inefficace des images participant à la mosaïque. Il reste que pour effectuer un contrôle a posteriori et décider de l'acceptation ou du rejet de la mosaïque en composition colorée, il faut disposer de critères quantifiables. À cet égard, la littérature n'offre guère de solutions, ce qui nous amène à développer quelque peu cet aspect du contrôle de qualité.

V. VALIDATION COLORIMÉTRIQUE DES MOSAÏQUES EN COMPOSITION COLORÉE

A. Principe de la validation

L'inefficacité des corrections radiométriques est appréhendée visuellement par des variations intempestives des couleurs et des contrastes au travers du champ. Ceci conduit à réfléchir au problème de la validation radiométrique en termes de perception des couleurs. La notion d'espace perceptuel des couleurs a été présentée antérieurement et l'espace défini par la teinte, la saturation et l'intensité a été décrit.

Pour la plupart des affectations reconnues dans une composition colorée, les incohérences sont perceptibles vis-à-vis de la teinte : à titre d'exemple, en couleurs naturelles on s'attend à ce qu'une forêt de feuillus apparaisse en vert, non en bleu ou en rouge, mais on admet des variations de saturation (vert plus ou moins pur) et/ou d'intensité (vert plus clair ou plus foncé). En termes statistiques, cela signifie que la variance de la teinte d'une affectation donnée doit rester limitée dans tout le champ de la mosaïque et que le contrôle de cette qualité doit pouvoir être mené par un test de variance entre des échantillons d'une même affectation tirés dans les différentes images formant la mosaïque (Donnay, 1997b, Leruth, 1998). Ce principe simple ne peut cependant être appliqué sans nuances sur toutes les affectations du sol. L'identification des affectations sur une composition colorée relève de la photo-interprétation assistée par ordinateur et la liste des affectations identifiées reste assez rudimentaire. En outre, pour certaines affectations apparaissant dans des couleurs très peu saturées, ce n'est pas tant la variation de teinte qui est perceptible, mais plutôt la variation d'intensité.

Analyse aisée	Analyse délicate	Analyse à éviter
Herbages	Cultures	Plans d'eau
Feuillus	Réseau routier	Autres affectations
Conifères	Habitat et constructions diverses	

Tableau 1. Degré de difficulté de l'analyse des variations de teinte selon la nature de l'affectation du sol

À titre d'exemple, on peut distinguer les catégories d'affectations reprises au tableau 1. Les affectations du sol de la colonne de gauche sont aisément reconnaissables et couvrent d'habitude de grandes superficies. Les variations de teinte entre les images composant la mosaïque peuvent faire l'objet d'une analyse de variance pour chacune des trois affectations. Les autres affectations, des colonnes du milieu et de droite, présentent une variance intrinsèque importante pour les raisons exposées ci-dessous.

- Cultures : sol nu ou couvert de végétation à différents stades phénologiques. Une éventuelle analyse de variance sur la teinte ne peut donc être envisagée que pour une même culture, à une même date, les conditions phénologiques étant jugées similaires au sein de la mosaïque.
- Constructions et réseau routier : en couleurs naturelles, ces affectations apparaissent souvent dans des couleurs proches du gris, mais l'intensité de cette couleur est assez variable selon les matériaux et elle est en outre altérée par les ombres portées. Si une analyse de variance doit être menée sur l'une de ces catégories, il faudra mettre l'accent sur la composante intensité en veillant à sélectionner des catégories construites dans un matériau identique et peu affectées par les ombres portées.
- Plans d'eau : différences de turbidité et réflexion spéculaire de la surface selon l'angle d'incidence des rayons solaires affectent la couleur des eaux vives et dormantes. En général, cette catégorie d'occupation du sol ne fera pas l'objet d'une analyse de variance.
- Autres affectations : par définition, les autres affectations sont difficiles à traiter dans ce genre d'analyse, soit qu'elles couvrent des superficies trop réduites, soit qu'elles sont difficiles à identifier par photo-interprétation.

La mise en oeuvre de cette méthode de validation exige qu'un échantillon de pixels appartenant à une même affectation du sol soit tiré dans chaque image de la mosaïque. Un échantillon est formé d'un ou plusieurs sites au sein d'une image, un site correspondant à une petite tache (par exemple une fenêtre de 10 x 10 pixels) d'affectation homogène. Les plans de sondage classiques, tels que les sondages stratifiés ou systématiques, ne sont pas toujours applicables dans la mesure où la qualité des échantillons est dictée par une interprétation visuelle délicate, et on leur préférera souvent un simple sondage par quota. Les valeurs des pixels d'une composition colorée sont exprimées quantitativement selon les trois composantes R, V, B, de sorte que chaque site échantillonné peut être caractérisé par les moyennes de rouge, vert et bleu des pixels formant le site. Ces valeurs moyennes sont converties en teinte, saturation et intensité selon la méthode de conversion présentée dans un chapitre antérieur. Il reste à

effectuer une analyse de variance entre tous les échantillons caractéristiques d'une affectation afin de déterminer si la variance observée pour cette affectation est tolérable au seuil de probabilité choisi.

Pour les quelques affectations vis-à-vis desquelles la variation testée porte sur l'intensité, une analyse de variance classique peut être appliquée. En effet, l'intensité varie linéairement entre un minimum et un maximum, de sorte que les concepts de moyennes et d'écart-types s'appliquent sans difficulté. Par contre, pour les affectations dont on veut tester la variation de teinte, les plus nombreuses, il est nécessaire de recourir aux statistiques directionnelles car la teinte correspond à un angle mesuré de 0° à 360° . Les paramètres de position et de dispersion doivent être adaptés en conséquence et l'analyse de variance appliquée est de type circulaire. (Mardia, 1972 ; Gaile et Burt, 1980).

B. Paramètres des statistiques directionnelles

Les statistiques traditionnelles sont linéaires, en ce sens que les valeurs des variables sont considérées comme distribuées sur un axe orienté. Les observations sont mesurées à partir d'une origine commune et les positions sur la ligne sont fixes. En statistiques directionnelles, les observations sont des angles mesurés suivant une direction ou un axe de référence et un cercle gradué remplace la ligne numérotée. Chaque observation est positionnée sur la circonférence du cercle de telle sorte qu'un vecteur joignant le centre du cercle et le point d'observation forme un angle avec l'axe de référence égal à l'angle observé (Fig. 8). La direction de référence (ou zéro) peut être choisie arbitrairement ; toutes les observations doivent cependant utiliser la même origine. De façon conventionnelle, les angles sont mesurés ici dans le sens trigonométrique.

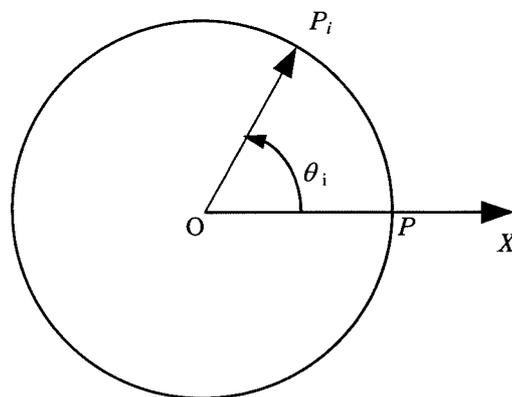


Figure 8. Représentation de l'échantillon P_i

Soit P_i le point sur la circonférence du cercle correspondant à l'angle θ_i , avec $i = 1 \dots n$. La direction moyenne \bar{x}_0 de $\theta_1, \dots, \theta_n$ est définie comme étant la

direction résultante des vecteurs $\overline{OP}_1, \dots, \overline{OP}_n$. Les coordonnées cartésiennes de P_i étant $(\cos \theta_i, \sin \theta_i)$, avec $i = 1 \dots n$, le centre de gravité de tous ces points est donné par $(\overline{C}, \overline{S})$:

$$\overline{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \quad \text{et} \quad \overline{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \theta_i$$

Si l'on pose :

$$\overline{R} = (\overline{C}^2 + \overline{S}^2)^{\frac{1}{2}}$$

alors $R = n\overline{R}$ est la longueur de la résultante et \overline{x}_0 est la solution des équations :

$$\overline{C} = \overline{R} \cos \overline{x}_0 \quad \overline{S} = \overline{R} \sin \overline{x}_0$$

La direction moyenne \overline{x}_0 est ainsi donnée par l'expression suivante :

$$\overline{x}_0 = \arctan \frac{\sum_{i=1}^n \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n \cos \theta_i}$$

La distribution de von Mises joue le même rôle dans les statistiques directionnelles que celui de la distribution normale (ou gaussienne) dans les statistiques linéaires. Elle est déterminée par deux paramètres : une direction moyenne μ_0 et un paramètre de dispersion κ . Une variable circulaire θ présente une distribution de von Mises lorsque sa fonction de densité de probabilité est donnée par :

$$g(\theta, \mu_0, \kappa) = \frac{1}{2\pi I_0(\kappa)} e^{\kappa \cos(\theta - \mu_0)}$$

$$0 < \theta < 2\pi, \quad \kappa > 0, \quad 0 < \mu_0 < 2\pi$$

où $I_0(\kappa)$ est la fonction modifiée de Bessel de première espèce et d'ordre 0.

Le calcul de ces paramètres doit être adapté au cas de plusieurs échantillons. Soient $\theta_{j,k}$ avec $R = 1, \dots, n_j$ et $j = 1, \dots, q$, des échantillons indépendants d'effectifs n_1, \dots, n_q , de distribution de von Mises $M(\mu_{0,j}, \kappa_j)$ avec $j = 1, \dots, q$ respectivement. Si l'on pose $\overline{x}_{0,j}$ et R_j la direction moyenne et la résultante du j^e échantillon, on peut écrire :

$$C_j = \sum_{k=1}^{n_j} \cos \theta_{jk} \quad S_j = \sum_{k=1}^{n_j} \sin \theta_{jk}$$

$$C = \sum C_j \quad S = \sum S_j \quad n = \sum n_j$$

En fixant \overline{x}_0 et R égaux à la direction moyenne et à la résultante des échantillons combinés, il vient :

$$R^2 = C^2 + S^2 \quad C = \sum R_j \cos \overline{x}_{0,j}$$

$$S = \sum R_j \sin \overline{x}_{0,j}$$

C. Analyse de variance circulaire

Pour deux échantillons, l'hypothèse d'égalité des directions moyennes s'écrit $H_0 : \mu_{0,1} = \mu_{0,2}$, et quatre cas peuvent se présenter, en fonction de la valeur de \overline{R} (Tableau 2).

Cas	Conditions	Statistiques
I	$[0 \leq \overline{R} \leq 0,40]$ et $[\frac{1}{3} < r < \frac{1}{2}]$ où $r = n_1 / n$ si $n_1 \leq n_2$	$\overline{R}' = (R_1 + R_2) / n$
II	$[0,40 < \overline{R} \leq 0,70]$	
III	$[0,70 < \overline{R} \leq 0,95]$	$F_{n-2}^1 = \left(1 + \frac{3}{8\kappa}\right) (n-2)(R_1 + R_2 - R) / (n - R_1 - R_2)$
IV	$[0,95 \leq \overline{R}]$	$F_{n-2}^1 = (n-2)(R_1 + R_2 - R) / (n - R_1 - R_2)$

Table 2. Analyse de variance circulaire dans le cas de 2 échantillons

Dans les deux premiers cas, on rejette l'hypothèse nulle lorsque la valeur observée \overline{R}' est supérieure à la valeur critique fournie par les tables établies par Watson et William (Mardia, 1972, pp. 306-307) pour, respectivement, $(r = 1/2 \text{ et } r = 1/3)$ et $(r = 1/2)$. Dans les deux derniers cas, le test F de Snedecor à 1 et $(n - 2)$ degrés de liberté est réalisé, la valeur de κ nécessaire au calcul de la statistique dans le troisième

cas étant fournie en fonction de \overline{R} par la table de Mardia (1972, p. 298). L'hypothèse nulle est rejetée si la valeur observée de F est supérieure à la valeur critique de la table de Snedecor.

Lorsqu'il y a plus de deux échantillons l'hypothèse nulle s'écrit : $H_0 : \mu_{0,1} = \dots = \mu_{0,q}$, et trois cas peuvent se présenter suivant la valeur de κ .

Lorsque κ est compris entre 0 et 1, le test répond à une distribution χ^2 à $(q - 1)$ degrés de liberté, où q est égal au nombre d'échantillons :

$$\chi_{q-1}^2 = cU$$

avec :

$$c^{-1} = 1 - \frac{1}{8}\kappa^2 + \frac{q}{2n\kappa^2}$$

et :

$$U = \frac{2}{n} \{ (\sum R_i)^2 - R^2 \}$$

Lorsque κ est compris entre 1 et 10, la statistique F de Snedecor à $(q - 1)$ et $(n - q)$ degrés de liberté est utilisée :

$$F_{n-q}^{q-1} = \left(1 + \frac{3}{8\kappa}\right) \{ (n - q) (\sum R_i - R) / (n - \sum R_i) (q - 1) \}$$

Enfin, lorsque κ est supérieur à 10, une analyse de variance usuelle est effectuée, comme c'est présenté au tableau 3.

Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	F
Entre groupes	$q - 1$	$\sum R_i - R$	$(\sum R_i - R) / (q - 1) = I$	I / II
Intra-groupes	$n - q$	$n - \sum R_i$	$(n - \sum R_i) / (n - q) = II$	
Total	$n - 1$	$n - R$		

Tableau 3. Table d'analyse circulaire de variance pour plus de 2 échantillons

D. Exemple de contrôle colorimétrique

Pour illustrer les principes de validation colorimétrique des mosaïques en composition colorée, les analyses de variance ont été appliquées sur une mosaïque « brute », c'est-à-dire composée d'images non corrigées radiométriquement et sur une mosaïque corrigée par un simple calage des histogrammes des deux images. Les mosaïques « brute » et « corrigée » sont présentées ci-dessous. Elles résultent de l'assemblage de deux extraits orthophotos codées sur 8 bits / pixel (Fig. 9). On constate qu'en l'absence de correction, la différence de radiométrie entre deux affectations de même type, ainsi que la ligne de raccord sont facilement discernables

Les affectations du sol sélectionnées pour les tests sont les feuillus, les herbages et le réseau routier. Les conifères sont absents sur les photos et les autres affectations du sol ne se prêtent pas à l'analyse pour les raisons évoquées précédemment. Une analyse de variance directionnelle est appliquée sur les affectations dont on veut tester la variation de teinte, à savoir les feuillus et les herbages. Pour le réseau routier, la variation testée porte sur l'intensité et, par conséquent, une analyse de variance classique est suffisante. Les mosaïques étant composées de deux images, les formules d'analyse de variance utilisées sont celles appliquées dans le cas de deux échantillons.

Affectation du sol	Statistique observée	Degrés de liberté	Cas	Statistique critique lue dans la table
Feuillus	$\bar{R}' = 0,95778$	$\bar{R} = 0,59345$ $n = 41$	II	$\bar{R}' = 0,62$
Herbages	$F = 124,90775$	dl. num. = 1 dl. dén. = 47	IV	$F = 4,055$
Réseau routier	$F = 13,37317$	dl. num. = 1 dl. dén. = 43	classique	$F = 4,065$

Tableau 4. Résultats des analyses de variance pour la mosaïque « brute »

Les résultats des tests pour la mosaïque « brute » et la mosaïque « corrigée » sont présentés respectivement dans les tableaux 4. et 5.

On constate que pour la mosaïque « brute », les valeurs des tests observées sont largement supérieures

aux valeurs critiques lues dans les tables. La radiométrie n'est donc pas uniforme, et elle est même très différente sur l'ensemble du champ de la mosaïque pour une même affectation.



Figure 9. Mosaïques de deux extraits d'orthophotos
A. En l'absence de correction radiométrique : mosaïque « brute ».
B. Avec correction par calage d'histogrammes : mosaïque « corrigée ».

Affectation du sol	Statistique observée	Degrés de liberté	Cas	Statistique critique lue dans la table
Feuillus	F = 6,13672	dl. num. = 1 dl. dén. = 39	IV	F = 4,07
Herbages	F = 1,320 E-05	dl. num. = 1 dl. dén. = 47	IV	F = 4,055
Réseau routier	F = 9,82496	dl. num. = 1 dl. dén. = 43	classique	F = 4,065

Tableau 5. Résultats des analyses de variance pour la mosaïque « corrigée »

En ce qui concerne la mosaïque « corrigée », les résultats des tests sont désormais fort proches, et même inférieurs dans le cas des herbages, aux statistiques critiques fournies dans les tables. Malgré le fait que la mosaïque « corrigée » n'ait subi qu'une correction grossière, elle présente une radiométrie sensiblement uniforme sur l'ensemble du champ.

BIBLIOGRAPHIE

- AFEK Y. & BRAND A., 1998. Mosaicking of Orthorectified Aerial Images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64(2), 115-125.
- CARPER J., LILLESAND T. & KIEFER R., 1990. The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 56(4), 459-467.
- DONNAY J.-P., 1997a. *Cartographie mathématique*. Série SURFACES, 2, Université de Liège, Liège.
- DONNAY J.-P., 1997b. *Critères statistiques de réception des mosaïques d'orthophotos numériques*. Rapport technique pour la DGPL de la Région Wallonne, Université de Liège, inédit.
- FALKNER E., 1995. *Aerial Mapping. Methods and Applications*. Lewis Publishers, Boca Raton.
- GAILE G.L. & BURT J.E., 1980. Directional Statistics. *Concepts and Techniques in Modern Geography (CATMOG)*, 25, Institute of British Geographers.
- KRAUS K., 1997. *Photogrammetry*. 2 volumes. Ummeler, Bonn.
- LERUTH F., 1998. *Validation radiométrique de mosaïques d'images en composition colorée*. Mémoire de licence en géomatique, Université de Liège, inédit.
- MANZER G., 1996. Avoiding Digital Orthophoto Problems. *Digital Photogrammetry. An Addendum to the Manual of Photogrammetry* (Greve C., Éd.), American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, 230-238.
- MARDIA K.V., 1972. *Statistics of Directional Data*. Academic Press, Londres.
- MCGWIRE K., 1998. Mosaicking Airbone Scanner Data with the Multiquadric Rectification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64(6), 601-606.
- SCHENK T., 1999. *Digital Photogrammetry*. TerraScience, Laurelville (OH).
- THORPE J., & KLIMIUK M., 1994. The Handling of Large Digital Orthophoto Raster Databases in GIS. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30(4), 457-459.
- WILLIAMS J., 1995. *Geographic information from Space. Processing and Applications of Geocoded Satellite Images*. John Wiley & Sons, Chichester.
- ZOBRIST A., BRYANT N. & McLEOD R., 1983. Technology for Large Digital Mosaics of Landsat Data. *American Society of Photogrammetry*, 49(9), 1325-1333.