
Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG ?

**Julien Muraz, Sylvie Durrieu, Sylvain Labbé,
Vazken Andréassian, Mamoutou Tangara**

Les multiples campagnes de photographies aériennes réalisées depuis plusieurs dizaines d'années constituent une source précieuse d'information sur l'utilisation de l'espace et son évolution. Elles apportent à un projet une vision d'ensemble, des possibilités d'analyse diachronique, tout en permettant par la finesse de leur grain d'effectuer des repérages précis. Elles permettent de concevoir, compléter ou mettre à jour des documents cartographiques.

À l'heure des Systèmes d'Information Géographique (SIG), des capteurs d'images numériques (satellitaires ou aéroportés), ces photographies aériennes « analogiques » peuvent sembler désuètes. Elles ne peuvent pas être intégrées directement à un environnement SIG, notamment en raison des déformations liées à la prise de vue et au relief de la zone étudiée. Aussi leur utilisation se limite souvent à une interprétation visuelle, éventuellement suivie d'un report manuel sur un fond cartographique.

Leur intégration directe dans un SIG impose de réaliser une orthorectification, technique photogrammétrique¹ qui permet de déformer une image numérique pour la rendre conforme à une projection cartographique. Autrefois réservée à un nombre limité de spécialistes, elle est à présent à la portée de tout ingénieur ayant des connaissances de base dans le domaine des SIG. En effet, des logiciels géomatiques spécialisés conviviaux et peu onéreux apparaissent sur le marché. Ainsi, dans le cadre d'une étude hydrologique nous avons pu mettre en œuvre cette technique et ces nouveaux outils afin de

cartographier et quantifier l'évolution du couvert forestier sur de petits bassins versants.

Après un exposé succinct des principes de l'orthorectification, nous présenterons la démarche pratique de sa mise en œuvre. Nous aborderons ensuite quelques aspects logistiques de ce travail (sources de données, logiciels). Enfin, nous illustrerons ce propos par quelques résultats issus de notre étude.

Principe de l'orthorectification

■ *L'orthorectification : obtenir une image superposable à une carte*

Une carte topographique s'obtient généralement par une projection mathématique d'une surface régulière qui représente la surface de la Terre (ellipsoïde de référence) vers une surface plane. Sur une petite zone, tout se passe comme si l'observateur était placé à la verticale de chaque point observé (ou s'il était placé à l'infini) et l'échelle apparaît homogène. Une photographie aérienne est une image du terrain vue d'un point unique. Lorsque ce terrain est plat et la visée verticale (le plan de l'image photographique est parallèle au terrain), l'échelle reste homogène sur l'ensemble de la photographie comme dans le cas d'une carte topographique,

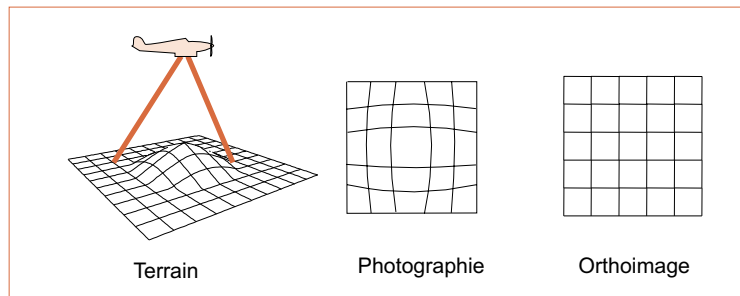
**Julien Muraz,
Vazken
Andréassian,
Mamoutou
Tangara**

Cemagref
BP 44,
92163 Antony
cedex

**Sylvie Durrieu,
Sylvain Labbé**

Laboratoire
Commun de
Télétection
ENGREF-Cemagref,
Maison de la
télétection,
500 rue J.-F. Breton,
34093 Montpellier
cedex 5

¹ La photogrammétrie permet de définir la forme et la position d'objets à partir de photographies. Les résultats des mesures photogrammétriques peuvent se présenter sous la forme de fichiers de coordonnées, de représentations graphiques (cartes et plans), ou encore d'images (orthophotographies, orthophotoplans), (Kraus et Walsdhäusl, 1998).



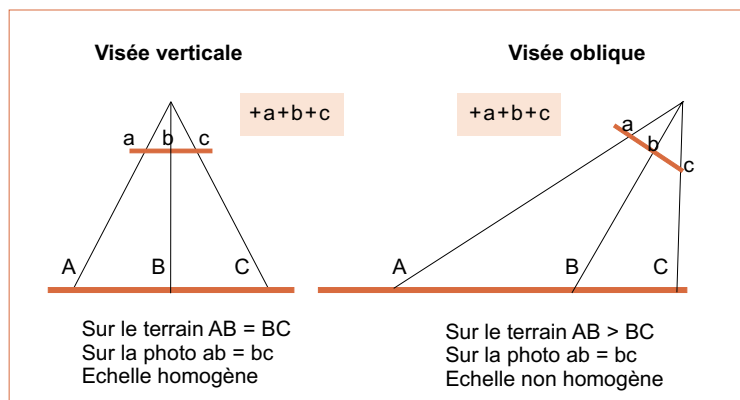
▲ Figure 1. – La différence entre une photographie aérienne et une orthophotographie.

et on obtient une reproduction fidèle des formes présentes sur le terrain. Dès que la visée devient oblique ou que le terrain n'est plus plat, l'échelle devient variable d'un point à l'autre de la photographie (figure 1). L'image n'est plus superposable à une carte et les calculs de distances ou de surfaces deviennent erronés. De plus, les déformations étant différentes d'une image à l'autre (position de l'avion, angle de visée, relief), les images ne se raccordent pas directement.

L'orthorectification d'une photographie consistera à la recalculer pour la replacer dans la géométrie de projection choisie et la rendre ainsi superposable en tous points à une carte. Les photographies orthorectifiées deviendront alors raccordables, permettant ainsi la réalisation d'une mosaïque. Le résultat pourra alors être utilisé au sein d'un Système d'Information Géographique.

Analysons plus en détail les principales déformations qui affectent une photographie aérienne.

Figure 2. – Distorsions induites par un angle de visée



■ Les distorsions géométriques au sein d'une photographie aérienne

Les distorsions dues à la position de prise de vue

L'altitude de la prise de vue influe directement sur l'échelle moyenne de la photo (plus l'avion vole haut, plus l'échelle moyenne de l'image diminue). Un angle oblique de prise de vue altère l'homogénéité de l'échelle à l'intérieur de cette photographie (figure 2). Cet angle dépend des rotations de l'avion que l'on exprime en terme de roulis, de tangage et de lacet. Le roulis (R) correspond à l'oscillation de l'avion par rapport à l'axe de vol (balancement vers la gauche ou la droite), tandis que le tangage (T) représente un mouvement le long d'un axe transversal (balancement vers l'avant ou l'arrière). Le lacet (L), représente un mouvement autour d'un axe vertical et traduit le fait que la trajectoire de l'avion n'est pas parfaitement rectiligne.

Le tangage et le roulis conduisent à une visée oblique et à une variation de l'échelle sur la photographie (figure 3) tandis que le lacet n'induit qu'une variation de l'orientation de la photographie.

La connaissance de la position de l'avion (X, Y, Z) et de son attitude (roulis, tangage et lacet) définissent en photogrammétrie l'orientation externe de la prise de vue.

Le déplacement de l'avion pendant l'exposition de la photo engendre des effets de « filé », que les appareils photogrammétriques modernes compensent par un mouvement contraire du négatif piloté par un ordinateur.

Les distorsions dues au terrain

Le terrain n'est jamais parfaitement plat. Même en l'absence de relief, il n'est pas strictement parallèle au plan de la photo en raison de la rotondité de la terre. Cette déformation reste cependant faible pour des prises de vues de quelques kilomètres de côté.

La présence d'un relief introduit en revanche des déformations significatives (figure 4).

La correction des distorsions causées par le relief implique de connaître les altitudes de chaque point, et donc de disposer d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) relatif à la zone considérée.

Les distorsions liées à l'appareil photographique

Les défauts des lentilles des objectifs et de planéité du négatif introduisent des distorsions optiques. Les distorsions radiales peuvent être partiellement corrigées si l'on dispose de la fiche d'étalonnage de l'appareil. L'acquisition de photographies aériennes se faisant actuellement exclusivement au moyen de caméras métriques, ces distorsions restent très faibles par rapport aux précédentes.

Une rectification complexe

Nous venons de passer en revue les principales causes de distorsion géométrique d'une photographie aérienne. Ces facteurs interagissent entre eux pour produire une déformation complexe de la photographie. La production d'une orthophotographie impliquera donc la connaissance :

- de la géométrie de prise de vue,
- des caractéristiques du relief,
- des caractéristiques de l'appareil photographique.

Réalisation et assemblage d'orthophotographies

L'orthorectification est menée sur une photographie aérienne numérisée à l'aide d'un modèle numérique de terrain. Nous présentons ici en premier lieu ces deux données essentielles, avant de décrire comment corriger puis assembler les images.

De la photographie à l'image numérique

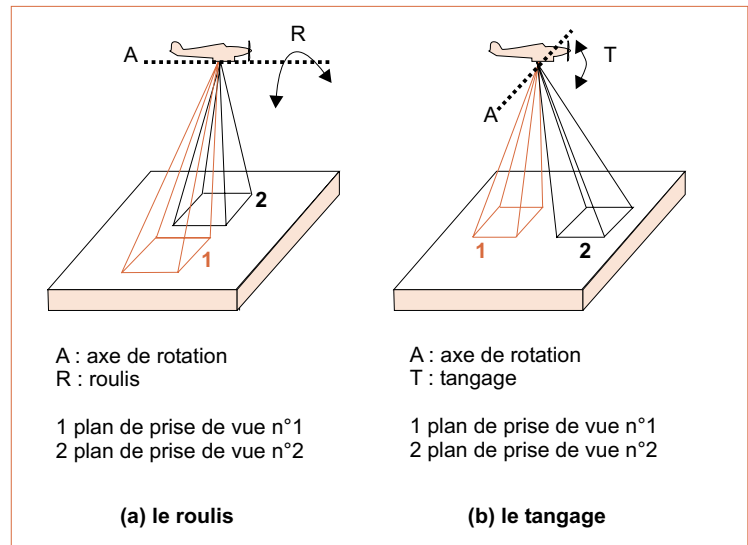
La photographie aérienne

Pour des utilisations en photogrammétrie, les missions aériennes utilisent des appareils photographiques à chambres métriques. Les pellicules d'une taille de 10 pouces (25,4 cm) conduisent à des surfaces utiles d'environ 23 cm de côté, les clichés intègrent des repères de calage précis appelés « marques fiduciaires » (figure 5).

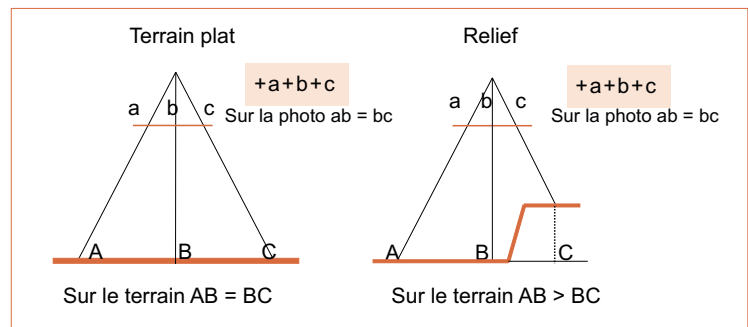
Les émulsions classiquement employées comprennent :

- le noir et blanc, dans les longueurs d'onde visible ou infrarouge ;

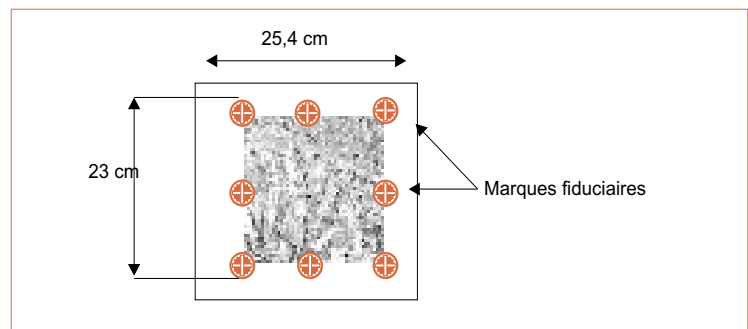
- la couleur : dans le domaine du visible ou d'une combinaison visible/infrarouge ; dans ce dernier cas la photographie apparaît à l'utilisateur en « fausses couleurs » : respectivement le



▲ Figure 3. – Les variations d'angle de prise de vue liées au tangage et au roulis.



▲ Figure 4. – Distorsions dues au relief.



▲ Figure 5. – Photographie aérienne avec marques fiduciaires.

rouge de la photographie se rapporte aux longueurs d'onde de l'infrarouge, le vert au rouge et le bleu au vert. L'IFN (Inventaire Forestier National) utilise couramment des émulsions infrarouge couleur car ces dernières permettent une meilleure discrimination des différents types de végétation. L'IGN (Institut Géographique National) travaille plutôt en couleurs naturelles.

Choix de la résolution

Une image numérique, comme l'image d'un écran électronique, est assimilable à une grille de points élémentaires dénommés « pixel » (contraction de l'anglais « *picture element* »). Pour une photographie aérienne, à chaque pixel correspond une partie du terrain, la taille moyenne du côté de cette surface définit la résolution. Pour une zone d'étude donnée, lorsque cette taille diminue, la résolution augmente, l'image apparaît plus détaillée, mais le volume du fichier correspondant s'accroît.

Le choix de la résolution résultera donc d'un compromis entre les besoins du projet et les possibilités techniques d'acquisition et de traitement de l'image numérique. Par exemple : une photographie aérienne classique (23 cm x 23 cm) au 1/30 000 représente une surface au sol de l'ordre de 7 km x 7 km, si l'on choisit pour notre image numérique un pixel d'un mètre, elle comprendra 7 000 lignes par 7 000 colonnes soit un volume de données de 50 à 150 méga-octets selon que l'image est en noir et blanc ou en couleurs. Des algorithmes de compression d'image permettent de réduire ce volume, mais il reste conseillé d'utiliser des formats répandus, acceptés par le plus grand nombre de logiciels.

Le processus d'orthorectification recomposera l'image, en dégradant légèrement les détails. Il est donc conseillé de prendre une résolution plus fine sur l'image de départ que la résolution finale souhaitée. Par exemple, si l'orthophotographie doit avoir une résolution d'un mètre, une résolution initiale de 50 à 70 cm est appropriée.

Les scanners

Pour obtenir une image numérique à partir d'une photographie (film ou tirage papier), on

utilise un scanner. La qualité de cet appareil conditionne la précision finale de notre orthophotographie. Il existe différents types de scanners caractérisés par : leur format, leurs performances géométriques et colorimétriques.

Un scanner de format A3 permet de numériser en une fois la plupart des photographies aériennes (23 x 23 cm²), un appareil de format A4 ne pourra généralement pas numériser l'intégralité du cliché, notamment les marques fiduciaires indispensables à une orthorectification précise. Pour compenser cela, on peut scanner les photographies en deux parties pour les assembler ensuite, mais cette manipulation introduira d'importantes dégradations de la qualité de l'image.

La résolution maximale est imposée soit par les caractéristiques optiques du scanner, soit par le grain de la photographie. Cette résolution s'exprime souvent en dpi (« *dot per inch* » soit « point par pouce », un pouce mesurant 25,4 mm). Ainsi avec un scanner limité à une résolution optique de 600 dpi, le pixel représentera au moins 42 microns de côté sur le document photographique, ce qui correspond à 1,27 m sur le terrain si l'échelle moyenne est de 1/30 000. Le grain de la photographie sur le film négatif varie entre 1 et 30 microns selon la sensibilité, le type d'émulsion et la qualité de l'optique utilisée.

Dans la pratique on ne gagne plus d'information supplémentaire en scannant en dessous de 5 microns (4 800 dpi) pour des négatifs noir et blanc ou 10 microns (2 400 dpi) en couleur. Le tirage sur papier double environ ce grain. L'utilisation directe des films négatifs apporte donc une meilleure précision mais impose l'usage d'un scanner adapté : les couleurs et intensités ne se mesurent plus par réflexion mais par transmission ce qui impose un éclairage depuis le couvercle du scanner. La numérisation d'un tirage papier reste toutefois acceptable tant que la résolution du scanner reste plus grossière que le grain du cliché, soit en dessous de 1 200 dpi.

Les logiciels de numérisation laissent à l'utilisateur le choix de la résolution de l'image, indépendamment de la résolution optique du scanner. Il est toutefois inutile de dépasser les capacités optiques du scanner, la résolution at-

teinte alors par interpolation logicielle accroît la taille du fichier image sans apporter de précision supplémentaire. Ainsi, si l'utilisateur définit une résolution optimale (se reporter à la partie Choix de la résolution) de 900 dpi, et si la limite optique du scanner est de 1 200 dpi, on paramètre le logiciel de numérisation pour une résolution de 900 dpi. Si, en revanche la limite optique du scanner est de 600 dpi on paramètre à 600 dpi.

Les dérives mécaniques des scanners bureautiques peuvent entraîner des déformations (l'image scannée ne correspond pas à un quadrillage parfait sur la photographie) de l'ordre de quelques pixels optiques. Pour un cliché au 1/30 000 et un scanner à 600 dpi le décalage peut atteindre plusieurs mètres.

Pour un bon rendu des couleurs le scanner doit pouvoir discriminer deux teintes très proches. Les logiciels permettent d'améliorer les contrastes et peuvent ainsi produire des images avec des gammes de couleur plus ou moins détaillées. Un pixel d'une photographie en noir et blanc est décrit par un niveau de gris (d'intensité) enregistré sur 1 bit (noir ou blanc), 8 bits ou 1 octet (256 niveaux de gris), 16 bits ou 2 octets (65 536 niveaux), ou d'autres combinaisons intermédiaires. 256 niveaux de gris bien choisis suffisent, compte tenu des limites des scanners bureautiques et de l'œil humain. En couleur, le scanner décompose l'image en trois composantes : rouge, vert et bleu et le même raisonnement s'applique à chacune d'elles. Une image codée en trois fois 256 niveaux conduit à plus de 16 millions de couleurs différentes et satisfera à la plupart des applications. Pour diminuer le volume du fichier correspondant l'utilisateur a recours à une réduction du nombre de couleurs (par exemple passer de 16 millions à 256) ou à des techniques de compression (par exemples du type jpeg) qui peuvent dégrader l'image. Même si cette image dégradée convient à l'utilisation finale, mieux vaut réaliser cette dégradation après l'orthorectification ; en effet la prise de points de calage (se reporter à la partie Rééchantillonnage du MNT pour le calcul de l'orthoimage) nécessitera l'image la plus détaillée possible.

Pour des travaux où l'on recherchera une grande précision, il existe des scanners photogram-

métriques (Kölbl, 1999), qui conservent mieux la géométrie du document d'origine et assurent une excellente discrimination des couleurs. Investir dans un tel matériel, beaucoup plus coûteux que les scanners classiques (de 100 à 1000 kF) ne se justifie que dans le cadre de productions intensives ; pour des besoins occasionnels mieux vaut recourir à la sous-traitance.

Les caméras numériques

Les nouvelles missions aériennes emploient également des caméras numériques. Ces appareils permettent d'explorer des parties du spectre électromagnétique non accessibles à la photographie classique. Couplés à des capteurs de positionnement précis (GPS² différentiel, capteurs d'attitude) et à des instruments de mesure de l'altitude du terrain (radar ou laser interférométrique), les futures chaînes de traitement produiront directement des orthoimages.

En revanche, le processus d'acquisition impose à l'utilisateur la taille du pixel et donc la précision de l'image numérique.

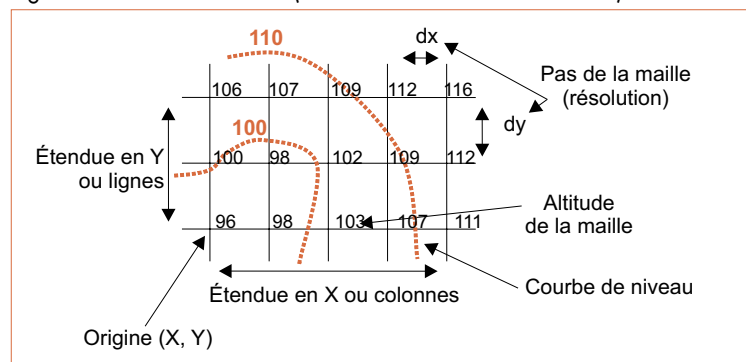
Actuellement, différents organismes de recherche travaillent à la mise au point de ces méthodes et outils, notamment l'IGN (Thom et Souchon, 1999). Ces nouvelles technologies devraient remplacer progressivement les photographies classiques.

■ Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Un MNT consiste en un maillage géoréférencé fournissant des altitudes au centre de chaque maille (figure 6).

2. GPS : Global Positioning System (système de positionnement par satellites).

Figure 6. – Format d'un MNT (courbes de niveau à titre indicatif). ▼



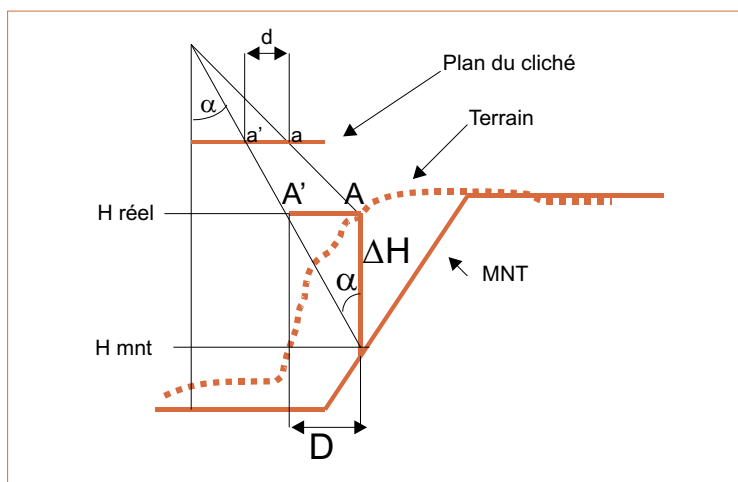
La précision d'un MNT, qui conditionne la qualité de l'orthophotographie, dépend à la fois de la taille de la maille, et de l'erreur sur l'altitude à chaque nœud. Beaucoup de MNT sont disponibles à différents pas, précisions et donc prix. Pour donner des éléments de choix, nous allons avant tout évoquer l'influence de l'incertitude de l'altitude sur la précision géométrique de l'orthoimage.

Influence des erreurs d'altitude sur la géométrie de l'image orthorectifiée

Lors du calcul de l'orthophotographie, on recherchera pour chaque pixel cible de celle-ci le pixel source sur le cliché de départ. La position du pixel source dépend, parmi plusieurs paramètres, de son altitude. Comme le montre la figure 7 pour une image acquise en visée verticale (le plan du cliché est horizontal) : une imprécision ΔH du MNT au point A conduit à estimer sa position sur l'image en a' au lieu de a. Le décalage d sur l'image correspond à un décalage $AA' = \Delta H \cdot \text{tg}(\alpha)$ sur le terrain (à l'altitude du point A).

L'angle α , nul au centre de la photographie, atteint son maximum aux coins de l'image. Cette valeur maximale de l'ordre de 30° à 40° pour des objectifs courants varie entre 15° pour des téléobjectifs et 60° pour des objectifs grand angles. Une différence de 5 m entre le MNT et le terrain pour un α max de 35° conduira à une erreur de positionnement de 3,5 m sur l'orthophotographie.

Figure 7. – Influence d'une erreur d'altitude. L'erreur ΔH sur l'altitude entraîne une erreur $AA' = \Delta H \cdot \text{tg}(\alpha)$ lors de l'orthorectification. ▼



Minimiser cette erreur revient à réduire l'intervalle des valeurs de α utilisées et diminuer l'incertitude sur l'altitude ΔH . Pour utiliser des valeurs faibles de α le calcul de l'orthoimage sera limité autant que possible à la partie centrale du cliché, notamment s'il existe un fort recouvrement entre les clichés successifs. ΔH dépend du MNT choisi et de la morphologie du terrain.

Choix et limites du MNT

Les multiples façons d'obtenir un modèle numérique de terrain comprennent :

- les levés directs sur le terrain, précis mais souvent trop coûteux ;
- l'interpolation à partir de données cartographiques (courbes de niveau, points cotés) ;
- les méthodes interférométriques (laser ou radar) ;
- les méthodes stéréoscopiques.

L'utilisateur peut construire un MNT à partir de données terrain ou cartographiques ou l'acquérir déjà élaboré auprès de distributeurs. Dans chaque cas l'incertitude ΔH dépendra de plusieurs paramètres :

- la précision et la densité des données initiales ;
- la méthode d'interpolation employée pour renseigner chaque maille à partir de ces données initiales ;
- le pas final retenu ;
- la nature du terrain.

Les MNT décrivent généralement la surface du terrain alors que la photographie reproduit le « sur-sol » (sommets de la végétation ou toits des bâtiments) et qu'une correction exacte nécessiterait un modèle numérique de cette surface notamment dans les zones de fortes différences (forêt, zones urbaines, etc.).

En fonction de ses objectifs et des autres paramètres d'erreurs l'utilisateur choisit un ΔH acceptable. Par exemple, si les autres sources d'erreur (« sur-sol », optique, déformation du support, scannage, calage, etc.) conduisent à des déformations géométriques de l'ordre de 10 m, un ΔH de l'ordre de 10 à 20 m n'entraînera en moyenne que quelques mètres ($\Delta H \cdot \text{tg}(\alpha)$) de dégradation supplémentaires et apparaîtra gé-

néralement admissible ; des courbes de niveau équidistantes de 20 m conviendront alors à la construction du MNT.

En outre, le pas du MNT doit s'accorder à la morphologie du terrain (figure 8). Ainsi, pour une zone relativement plane, on pourra se contenter d'une maille lâche, d'autant que la taille de la maille détermine souvent le prix du MNT.

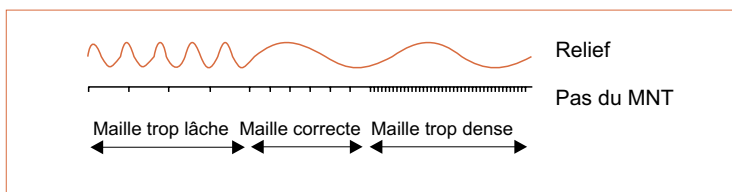
Rééchantillonnage du MNT pour le calcul de l'orthoimage

Le plus souvent, le pas du MNT diffère du pas d'espace de l'orthophotographie (le pixel de cette dernière est généralement de l'ordre du mètre sur le terrain, alors que la maille des MNT courants couvre plusieurs dizaines de mètres). Or, lors du redressement de l'image il faudra connaître l'altitude de chaque point de l'orthophotographie (se reporter à la partie Influence des erreurs d'altitude sur la géométrie de l'image orthorectifiée). Cette altitude s'obtiendra donc par interpolation entre les points du MNT. Certains logiciels ne réalisent pas d'interpolation et assignent à chaque pixel l'altitude du point le plus proche sur le MNT, cela conduit à un effet de « marches d'escalier » peu représentatif du relief et accroît ΔH (figure 9). Avec cette gamme de logiciels, il convient de rééchantillonner au préalable le MNT à un pas suffisamment petit. On calcule ainsi un nouveau MNT de pas compatible avec la taille du pixel de l'orthophotographie (par simplification, souvent égal). La méthode d'interpolation choisie lors de ce calcul doit conserver le mieux possible l'altitude, dans la plupart des cas on retiendra une interpolation bilinéaire.

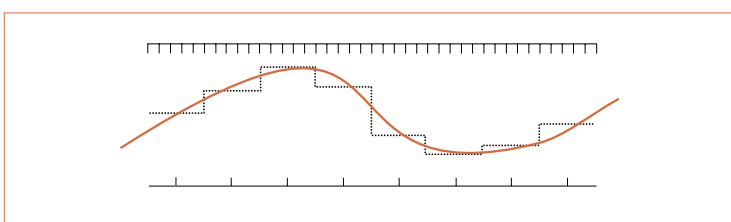
Cas particulier des couples stéréoscopiques

Deux photographies de la même zone acquises selon deux angles de visée différents forment un couple stéréoscopique à partir duquel on peut reconstituer le relief par construction optique (stéréoscope) ou numérique (corrélation d'images) (Cory et McGill, 1999). Pour obtenir une série de couples les missions aériennes prévoient des recouvrements d'environ 60 % entre deux clichés successifs.

Les logiciels d'extraction automatique de MNT proposent une chaîne complète de traitement intégrant l'élaboration des orthoimages (Kaczynski et Ziobro, 1999). Les paramètres



▲ Figure 8. – Adaptation du pas du Modèle Numérique de Terrain au relief de la zone d'étude.



▲ Figure 9. – Erreurs d'altitude induites par l'absence d'interpolation.

nécessaires à la réalisation de l'orthophotographie proviennent des phases de calcul précédentes qui s'appuient sur les mêmes principes photogrammétriques. Le MNT calculé convient particulièrement pour l'orthorectification des photographies qui ont permis sa construction : il décrit de façon précise le « sur-sol » (si la maille retenue est adaptée) et son calage avec la photographie est acquis d'emblée.

Toutefois ces techniques, fondées sur la corrélation d'images, présentent des résultats de qualité médiocre dans les zones de faible variabilité des couleurs et intensités de l'image (certains types d'occupation du sol peu contrastés comme les plans d'eau).

L'orthorectification

Le modèle d'orthorectification se base sur deux équations qui donnent la position (x, y) sur l'image à rectifier de tout point terrain de coordonnées (X, Y) en projection cartographique. Ces équations décrivent le trajet de la lumière depuis un point du terrain jusqu'à la pellicule photographique. Elles prennent en compte d'une part, la géométrie de prise de vue ou orientation externe du cliché, d'autre part, les caractéristiques optiques de la chambre photogrammétrique ou orientation interne.

Le calcul de l'orientation interne

Les constructeurs fournissent les paramètres de calibration des chambres photogrammétriques :

3. Amer : point fixe et visible servant de repère sur un site, une carte ou un plan.

- les coordonnées (x_0, y_0) du point principal sur le cliché, image de l'axe optique de l'objectif ;
- la distance principale séparant le centre optique de l'objectif et le point principal du cliché ;
- les mesures de distorsions radiales de l'objectif ;
- les coordonnées des marques fiduciaires sur le fond de chambre (x_f, y_f) .

Il convient de demander ces informations lors de l'acquisition des photographies aériennes. Elles conditionnent en effet une mesure rigoureuse de « l'angle de visée » en chaque point de l'image. Certains logiciels reconstruisent cette géométrie de façon plus ou moins précise en exploitant tout ou partie de ces informations.

La rectification suppose d'établir une transformation (généralement bilinéaire [1]) entre les coordonnées x, y d'un point du cliché dans la géométrie de la chambre photographique et les coordonnées ligne / colonne (l, c) sur l'image numérique.

Système de transformation bilinéaire

$$l = p_1 \cdot x + p_2 \cdot y + p_3 \quad [1]$$

Paramètres à rechercher p_1 à p_6

$$c = p_4 \cdot x + p_5 \cdot y + p_6$$

La correspondance entre les coordonnées des marques fiduciaires sur le fond de chambre (x_f, y_f) et sur l'image scannée (l_f, c_f) permet de calculer les paramètres de cette transformation. Les coordonnées (l_f, c_f) s'obtiennent par pointé à l'écran pour chaque image. Trois points fiduciaires suffisent à calculer la transformation, la saisie de l'ensemble des points conduit à un système surdéterminé que l'on résout par la méthode des moindres carrés. On dispose ainsi d'une estimation de la précision de ces paramètres et de la qualité du pointé de chaque marque fiduciaire ; on recommence la saisie des mauvais pointés.

Le calcul de l'orientation externe

La position de l'appareil de prise de vue par rapport au terrain (X_0, Y_0, Z_0) et son orientation en roulis, tangage et lacet (ω, ϕ, κ) définissent l'orientation externe. Ces données, qui pourraient aujourd'hui se mesurer en vol (GPS différentiel et capteurs d'attitude), sont en pratique rarement disponibles. Leur estimation se

déduit alors d'un jeu de points de calage (ou amers³) dont on connaît la localisation exacte à la fois dans l'espace (X, Y, Z) et sur l'image (l, c) . La phase de stéréopréparation consiste à identifier ces points.

Les points de calage

Ces points doivent être repérables sur le terrain, ou sur une représentation cartographique du terrain, et sur la photographie. On choisit généralement des points remarquables tels une intersection de routes, un pont, l'angle d'un bâtiment...

Les coordonnées planimétriques (X, Y) de ces points peuvent s'obtenir de diverses manières :

- une mesure directe sur un document cartographique ;
- la numérisation d'une carte papier sur une table à digitaliser ;
- la saisie à l'écran sur une carte numérique référencée (ex : SCAN 25 de l'IGN) ;
- la saisie sur une orthophotographie existante ;
- directement sur le terrain (GPS, levées topographiques, etc.).

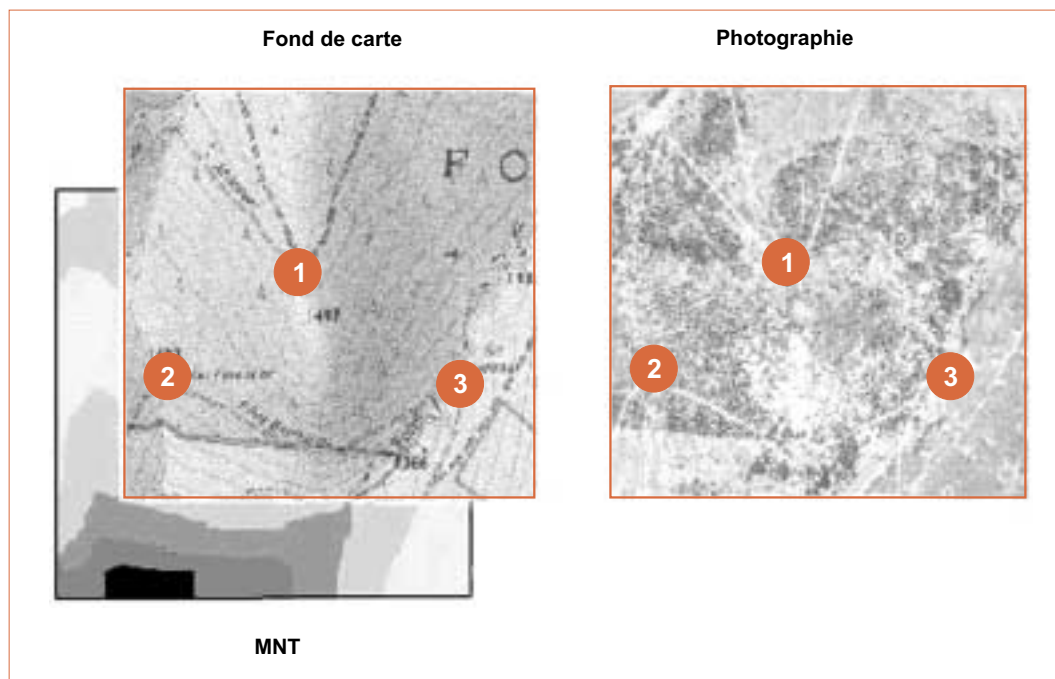
L'altitude Z s'obtient de la même manière : par lecture sur la carte ou levée sur le terrain. Cependant, si l'on dispose au préalable du MNT, les coordonnées planimétriques X, Y permettent également au logiciel de calculer automatiquement l'altitude Z .

Si la mission n'a pas eu lieu, on peut placer à des points de coordonnées connues des repères artificiels qui apparaîtront nettement sur la photographie.

Si l'on dispose d'un fond de référence cartographique numérique et d'un MNT, l'enregistrement des coordonnées des amers se fait de manière simple et peu onéreuse (figure 10).

Les points sont dits « complets » lorsque leurs trois coordonnées terrain X, Y et Z sont connues. Néanmoins le processus de calcul permet d'exploiter l'information apportée par des points « incomplets » :

- les points de calage en planimétrie, ou « horizontaux », dont on connaît uniquement les coordonnées X et Y ;



◀ Figure 10. – Saisie des amers sur la photographie aérienne et sur un fond cartographique (fond de carte IGN Top 25, 2739 OT).

– les points de calage en altimétrie, ou « verticaux », renseignés uniquement par leur altitude.

Pour estimer la position de l'appareil de prise de vue sur une seule photographie il faut au minimum trois points de contrôle « complets ».

Calcul des paramètres par blocs : l'aérotriangulation

Le terme « aérotriangulation » désigne les méthodes de calcul qui fournissent les éléments de l'orientation externe pour un bloc de clichés constitué d'une série de photographies se recouvrant partiellement et pouvant appartenir à une ou plusieurs bandes parallèles. Ce recouvrement, pour des missions destinées à produire des couples stéréoscopiques, avoisine 60 % à l'intérieur d'une bande et 20 % entre bandes parallèles.

L'emploi de ces méthodes permet de réduire considérablement le nombre d'amers par photographie en introduisant des points de liaison, ou « *tie points* ». Un « *tie point* » est un point localisable précisément sur au moins deux images ; ses coordonnées terrain n'ont pas besoin d'être connues. Contrairement aux points de calage « terrain », coûteux et parfois longs à localiser sur l'image, les points de liaison s'identi-

fient facilement. Il suffit en effet de localiser un même objet sur plusieurs photographies souvent acquises presque au même moment. Des amers localisés uniquement sur le pourtour du bloc suffisent si l'on a introduit suffisamment de points de liaison.

Certains logiciels intègrent des fonctions permettant la recherche automatique de ces points moyennant cependant un contrôle précis des résultats (Kaser *et al.*, 1999 ; Heipke et Eder, 1998). Dans les zones où la recherche de points de calage est difficile en raison soit de l'absence de références terrain précises soit par la nature même de l'occupation du sol (forêt), ce calcul par bloc se révèle approprié.

Amélioration du calcul de l'orientation externe

La répartition des amers et points de liaison, et la précision de leurs coordonnées, sur l'image comme sur le terrain, conditionnent la qualité de l'orthorectification.

Pour le repérage des amers sur l'image, certains logiciels incluent des fonctions sophistiquées de visualisation qui permettent une localisation précise des points. Lors de zooms à très grande échelle le rendu des éléments linéai-

res est amélioré en subdivisant le pixel par interpolation (bilinéaire ou bicubique).

Concernant les coordonnées terrain des amers, leur imprécision dépassent souvent l'ensemble des autres erreurs. Une rectification précise requiert en théorie des points mesurés sur le terrain avec une précision meilleure que le pixel de l'orthophotographie. Le recours à des sources cartographiques, même scannées, n'offre pas ce degré de précision : à partir du Scan 25 de l'IGN les points ne seront localisés qu'à quelques mètres près, soit généralement plusieurs pixels.

À partir d'un jeu initial de points de calage (photographie isolée), ou de points de calage et de liaison (bloc de photographies), le logiciel estime les paramètres de l'orientation externe. Cette estimation est faite par la méthode des moindres carrés en utilisant un nombre de points supérieur au minimum requis pour calculer tous les paramètres des équations. Cette surdétermination fournit une estimation pour chaque point de l'écart au modèle (résidu). Cette mesure permet d'écarter progressivement les points jugés peu précis en recalculant à chaque fois un nouveau modèle. Ce processus d'amélioration du calage pouvant conduire à ne conserver que la moitié des amers initiaux, on en prévoira donc un nombre suffisant. La variance des résidus (RMS : *Residual Mean Square*) donne une évaluation de l'erreur qui affectera l'orthophotographie. Une mesure plus précise de cette erreur peut être réalisée à partir de points de contrôle, indépendants des points de calage qui ont servi à bâtir le modèle.

L'optimisation du nombre et de la répartition des amers et des points de liaison relève autant de l'expérience que de la théorie. Quelques consignes générales peuvent cependant être données.

Pour une photographie isolée, il convient qu'une dizaine d'amers subsistent après sélection, et qu'ils soient répartis pour couvrir la périphérie de l'image et quelques points au centre.

Pour un bloc de photographies (figure 11) :

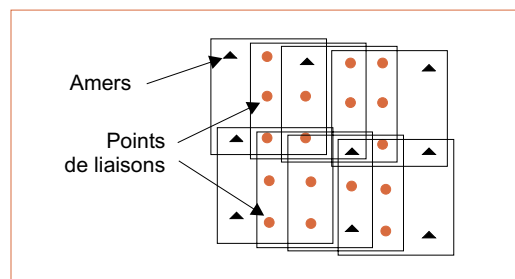
- des amers localisés sur le pourtour du bloc sont indispensables, en particulier aux extrémités des bandes ;
- en dehors des photographies situées en bout de bande, une solution satisfaisante pour des recouvrements classiques consiste à positionner neuf points de liaison par image ;
- en cas de présence simultanée d'un point de liaison et d'un amer sur une zone de recouvrement ce dernier sera conservé ; l'ajout de points de calage à l'intérieur du bloc n'entraîne pas forcément une augmentation significative de la précision lorsque les points de liaison sont bien choisis sauf s'il permet d'augmenter la variabilité de l'altitude du jeu d'amers.

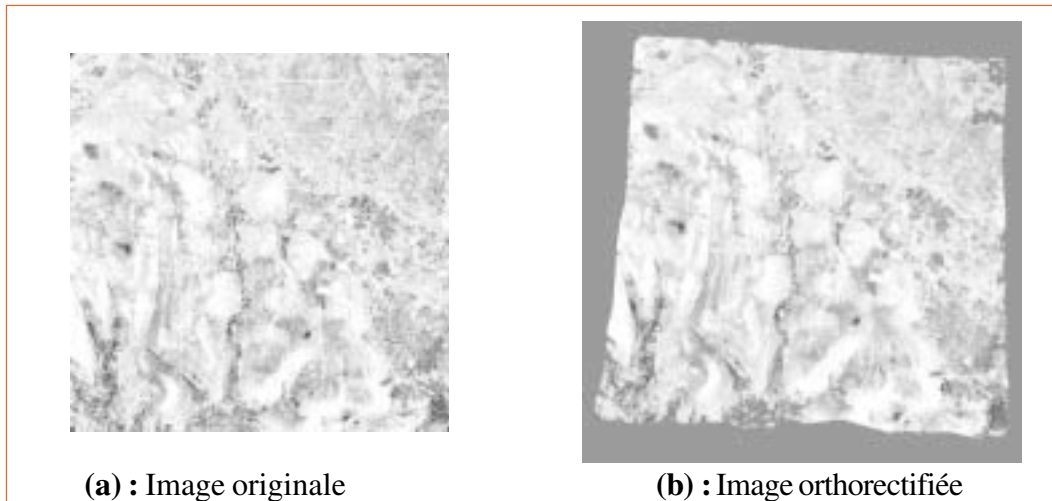
Une fois l'orientation externe définie et associée à l'orientation interne, le modèle de redressement nécessaire au calcul de chaque orthoimage est complètement déterminé.

Calcul d'une orthoimage (figure 12)

Le modèle de calcul de l'image orthorectifiée procède à « l'envers », depuis la cible vers la source. L'image cible, en coordonnées cartographiques, est au départ une grille vide à la résolution choisie par l'utilisateur. Pour chaque pixel le modèle de redressement donne sa position (son centre et ses quatre coins) dans l'image source et permet ainsi d'en calculer la « couleur » (les valeurs dans chacun des plans rouge, vert et bleu de l'image). L'antécédent du pixel cible peut ainsi recouvrir tout ou partie de un ou plusieurs pixels source contigus. Suivant les logiciels les méthodes d'interpolation de la couleur résultante sont plus ou moins complexes. Certains affectent simplement la couleur du pixel où tombe l'antécédent du centre du pixel cible (méthode du plus proche voisin), d'autres prennent en compte un nombre déterminé de pixels source parmi les plus proches et leur affectent un poids variable en fonction de leur position (par exemple méthode bilinéaire sur une fenêtre 2 x 2, méthode bicubique sur une fenêtre 3 x 3), les plus précis prennent en compte l'en-

Figure 11. – Exemple de répartition de points de calage et de liaison pour un bloc de 4 x 2 photographies. ▶





◀ Figure 12. – Photographie aérienne et orthoimage correspondante.

semble des pixels source qui participent effectivement à l'élaboration du pixel cible. La résolution de l'image source (se reporter à la partie Choix de la résolution) et la méthode d'interpolation employée conditionnent la qualité de l'image cible.

■ *L'assemblage des orthoimages*

Les SIG peuvent afficher les orthoimages calculées et reconstituer ainsi une vision d'ensemble de la zone d'étude. Toutefois des problèmes de limite apparaissent fréquemment :

- le bord de l'orthoimage comprend une zone sans donnée, souvent noire (figure 12), que certains logiciels ne savent pas masquer ;
- les erreurs géométriques produisent des aberrations visuelles au niveau du raccordement entre les images (décalages brusques) ;
- des écarts de contraste apparaissent d'une image à l'autre ;
- certaines applications nécessitent que l'ensemble de l'information appartienne à une seule image.

Le traitement et l'assemblage de ces orthoimages deviennent alors nécessaires (figure 13).

Pour reconstituer une homogénéité visuelle de l'ensemble de la zone, dans l'optique d'un produit de communication, on égalise globalement le contraste entre les images. On réduit également l'écart lors de la transition entre deux images en remplaçant dans la zone de recouvre-

ment les pixels initiaux par la moyenne des pixels des deux images. Certains logiciels permettent de calculer une interpolation linéaire progressive pour une transition encore plus douce. En revanche, ces techniques introduisent des dé-

Figure 13. – Un assemblage résultant de quatre orthophotographies Infra-rouge noir et blanc (Bassin versant du Briançon à Cocures, versant sud du Mont Lozère. Mission de 1963 - source : *Inventaire Forestier National*). ▼



gradations des contrastes de l'image et réduisent parfois la netteté des zones de transition.

Pour les applications exigeant de l'orthophotographie une bonne lisibilité géométrique et la conservation du contraste de l'image, on découpe chaque couple d'images de façon à faire coïncider la ligne de raccord entre deux photographies avec des « limites naturelles » (bordures de parcelles, routes, cours d'eau, etc.) ou à l'intérieur de zones peu contrastées. Ainsi, l'effet visuel des ruptures géométriques ou des variations de contraste est atténué. Pour optimiser la précision on retient de préférence les limites situées au milieu de la zone de recouvrement et présentant la meilleure cohérence géométrique entre les deux images.

Généralement les orthophotographies font l'objet d'interprétation visuelle pour corriger les hétérogénéités d'exposition lumineuse. Les traitements automatiques supposeraient de réaliser des corrections poussées des intensités lumineuses, ces corrections appartiennent encore aujourd'hui au domaine de la recherche. Souvent, un cliché reçoit plus de lumière au centre qu'en périphérie, ce qui apparaît nettement sur d'anciens clichés ; pour palier cet inconvénient les objectifs modernes intégrant des filtres qui corrigent l'essentiel de cette distorsion. Les variations des conditions d'éclairage (relief) et de l'angle d'observation (position du point dans le cliché, relief) entraînent une forte variabilité de l'intensité lumineuse pour les objets de même nature sur un cliché ou pour le même objet sur deux clichés successifs. Enfin, la difficulté s'accroît avec l'assemblage de clichés réalisés à différentes époques de l'année qui combinent des conditions d'éclairage très différentes et la transformation saisonnière de la couverture végétale.

Le fort recouvrement entre photographies de couples stéréoscopiques permet de se contenter d'une photographie sur deux pour couvrir la zone d'étude. Cependant, pour une meilleure qualité de l'assemblage, compte tenu tant de l'accentuation des distorsions géométriques (se reporter à la partie Influence des erreurs d'altitude sur la géométrie de l'image orthorectifiée) que des différences d'éclairage du centre vers les bords des photographies, il est préférable de ne conserver que les parties centrales des orthophotographies. Cela suppose de traiter

tous les clichés de la série, mais n'induit pas nécessairement des coûts supplémentaires importants si l'on réalise une aérotriangulation par bloc (réduction du nombre d'amers) on ouvre alors des perspectives en matière de vision stéréoscopique numérique (vision du relief à l'écran).

L'assemblage d'une grande quantité d'orthophotographies conduit à des fichiers volumineux, difficiles à gérer. En conséquence on découpe ensuite cette orthoimage en une mosaïque de « dalles » de taille constante que les SIG savent manipuler de manière transparente pour l'utilisateur.

Aspects logistiques du traitement des photographies numériques

■ Prendre en compte les besoins du projet

Le marché de l'orthophotographie, encore en émergence, doit établir ses normes et définir une gamme de produits standards. Ainsi, l'utilisateur non spécialiste pourra traduire avec précision ses propres besoins et choisir le produit le mieux adapté. Pour plus d'informations, on pourra se reporter au dossier de la revue « Géomètre » (n° 5 mai 1999, p. 37-51).

En première analyse la constitution d'une mosaïque d'orthophotographie peut répondre à plusieurs types de besoins tels que :

- la constitution d'un référentiel géométrique (SIG ou orthophotoplan) ;
- la production d'un outil de communication ou d'information ;
- la création ou mise à jour de cartes et/ou de bases de données par photointerprétation ;
- le traitement d'images numériques pour renseigner automatiquement des données géographiques.

Les applications envisagées détermineront les paramètres et méthodologies de constitution, notamment :

- le choix du noir et blanc ou de la couleur, du visible ou de l'infrarouge ;
- la qualité géométrique absolue, qui dépend de l'ensemble de la chaîne de traitement, plus

particulièrement de l'échelle de la photographie initiale et de la précision des amers ;

- la qualité géométrique relative, surtout si l'orthophotographie sert de support à des calculs locaux de longueurs et de surface ; la résolution, la qualité du MNT jouent ici un rôle important ;

- la stabilité en intensité, couleur, texture, etc. d'une orthophotographie à la suivante, ou d'un thème d'occupation du sol sur une même orthophotographie, etc.

L'utilisateur doit préciser quels choix sont retenus pour chacun de ces critères, choix qui conditionnent le coût du projet. Il peut ensuite confier la réalisation à une société spécialisée et le contractualiser par un cahier des charges qui reprend ces options et définit quelles procédures permettront d'en mesurer la qualité effective.

Une autre solution consiste à réaliser en interne l'orthophotographie, ce qui suppose que l'utilisateur déploie les moyens matériels, logiciels et de formation correspondants.

Nous présentons ci-après quelques sources de données, puis plusieurs logiciels. Les références commerciales citées ne sont ni exhaustives et ne peuvent constituer de notre part une quelconque recommandation. Les exemples présentés se limitent à des cas de production peu onéreux d'orthophotographie et excluent donc toute nouvelle mission aérienne ou levé topographique sur le terrain.

■ Les sources des données

Les photographies aériennes

Pour les utilisateurs ne possédant pas leurs propres photographies aériennes, le tableau 1 présente un ordre de grandeur des coûts d'acquisition pour des données issues des photothèques de l'Institut Géographique National et de l'Inventaire Forestier National. Les échelles varient selon les époques et les missions entre le 1/15 000 et le 1/30 000.

À ces coûts, on doit ajouter les droits de numérisation, variables selon l'utilisation finale, le nombre de postes (par exemple à l'IFN 100 F par photo par poste), etc. Les sites Internet de ces organismes précisent ces coûts de manière détaillée.

Distributeur	Coût	
	Noir et blanc	Couleur naturelle
IGN http://www.ign.fr	70 F	210 F
IFN http://www.ifn.fr	Infrarouge Noir et blanc	Infrarouge Couleur
	50 F + 50 F/photo	50 F + 140 F/photo

▲ Tableau 1. – Coût des photographies aériennes.

Les fonds cartographiques

La saisie des amers sera réalisée sur le support le plus exact possible. On exploitera les référentiels à la plus grande échelle disponible, telle une autre orthophotographie précise, ou une planche du cadastre récemment rénovée et référencée. Une autre alternative consiste à réaliser un repérage local avec un GPS différentiel.

À défaut, les cartes au 1/25 000 constituent une des meilleures références. Le tableau 2 indique les coûts de ces cartes au format papier assortis des droits de numérisation correspondants ou des cartes numériques (Scan 25). L'IGN ne produit plus de carte à plat, ce qui rend plus délicat la digitalisation de points précis sur des cartes pliées.

Le Modèle Numérique de Terrain

Le tableau 3 présente quelques sources de modèles numériques de terrain. La taille de la maille résulte d'un compromis entre la nature du relief (se reporter à la partie Choix et limites du MNT), la précision recherchée et le coût de la donnée correspondante. Certains logiciels permettent l'extraction du MNT depuis les couples stéréoscopiques de photographies. Quel-

Tableau 2. – Exemple de coût des cartes des fonds cartographiques de l'IGN. ▼

Type	Coût
1 : 25 000 Top 25 papier	58 F
1 : 25 000 « classique » papier	46 F
Droits de numérisation 1:25 000 Top 25	1 600 F / carte
Droits de numérisation 1:25 000 « classique »	1 200 F / carte
Carte 1 : 25 000 numérique (SCAN 25, raster)	1 000 F par pavé de 10 x 10 km ²

Distributeur	Précision	Coût
IGN http://www.ign.fr	pas de 100 m	8 F / km ² 10 200 F / département 459 000 F / toute la France
	pas de 75 m	12 F / km ² 12 000 F / département 540 000 F / toute la France
	pas de 50 m	16 F / km ² 2 21 600 F / département 729 000 F / toute la France
GEOSYS http://www.geosys.com	pas de 75 m pas de 100 m pas de 250 m	MONA : modèle numérique d'altitude. Coût variable selon la surface commandée.

▲ Tableau 3. – Quelques sources de MNT.

ques MNT à petite échelle (maille de l'ordre du km) peuvent être gratuitement récupérés sur Internet.

■ Les logiciels

À la frontière entre la photogrammétrie, le traitement d'image et les SIG, on peut situer les logiciels de calcul d'orthophotographies numériques qui relèvent de ces différentes disciplines. Compte tenu du développement permanent des logiciels, nous indiquons dans le tableau 4 quelques adresses de sites web relatifs à ces logiciels depuis des logiciels gratuits jusqu'à des chaînes photogrammétriques professionnelles. Tous ces logiciels existent pour des configurations du type PC, la plupart également pour des configurations station de travail. Certains peuvent être dédiés exclusivement au calcul d'orthophotos, alors que d'autres incluent des fonctions beaucoup plus étendues.

Études de cas

Deux exemples issus des recherches de l'unité Qualité et fonctionnement hydrologique des systèmes aquatiques du *Cemagref* illustrent l'utilisation d'orthophotographies :

– le premier, orienté information et analyse géographique, concerne l'influence de l'évolution du couvert forestier sur les régimes hydrologiques ;

– le second, plutôt axé communication s'applique à l'illustration d'un poster scientifique.

■ *Suivi de l'évolution du couvert forestier sur 70 bassins versants du Massif Central*

Contexte et objectif de l'étude

Le projet vise à caractériser et à quantifier le rôle de la forêt sur le comportement hydrologique des bassins versants. Cette analyse se base notamment sur un suivi diachronique des transformations du couvert végétal. Des données d'archives existent à l'Inventaire Forestier National sous forme de photographies aériennes. Les missions d'acquisition de l'IFN, entreprises vers 1960, permettent de couvrir l'ensemble du territoire en une dizaine d'années. Pour une zone d'étude donnée on dispose donc aujourd'hui de trois à quatre photographies. De plus, l'IFN réalise depuis quelques années une cartographie numérique par interprétation de ces photographies, mais cette cartographie n'est pas disponible pour les premières missions. Aussi, avons-nous choisi d'interpréter nous-mêmes les photographies aériennes disponibles en nous appuyant sur la cartographie réalisée à partir de la dernière mission (figure 14).

Seules les évolutions forestières donnent lieu à une modification des contours du cycle 3 dans les cartes des cycles précédents. Cette méthode impose de rendre la cartographie du cycle 3 superposable aux photographies de chaque cycle, et l'usage de l'orthophotographie apparaissait donc la mieux appropriée. De plus, elles s'intègrent directement au SIG, outil adapté à notre projet pour le traitement des données (digitalisation, calcul statistiques, ...) et son automatisation (70 bassins versants à traiter).

Par rapport à une interprétation réalisée directement sur des photographies, le travail sur des orthophotographies nous a permis :

– de minimiser les erreurs liées aux reports manuels d'une photographie non rectifiée vers une carte ;

– de réduire le biais lié à la subjectivité de l'interprétation en révisant simplement une interprétation existante ;

Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG ?

Logiciel	Distributeur	Site Internet
ENVI	RSI	http://www.rsinc.com/envi/index.cfm
ER Mapper	EarthStar, Digitech	http://www.ermapper.com/product/ermapper6
Géolmage	Géoimage	http://www.geoimage.fr/
GRASS	Grass	http://www.baylor.edu/~grass
MIPS	Microimages	http://tnt.microimages.com/product/tntmips.htm
Orthobase	Erdas	http://www.erdas.com/products/index.html
OrthoGIS	Vexcel	http://www.vexcel.com/aerial/orthogis.html
Orthoengine	PCI	http://www.orthoengine.com/
Tera Vue Ortho	Editions de la Boyère n	http://www.teravue.com/html/teravue_ortho.htm

▲ Tableau 4. – Quelques logiciels permettant l'orthorectification.

– de disposer directement de données numériques exploitables au sein d'un logiciel SIG.

Chaîne de traitement mise en place

Le système de production, de traitement et de stockage des données géographiques pour ce projet comprend deux stations de travail sous WindowsNT™. La première, équipée d'un scanner et d'un graveur de CD-Rom, est destinée en premier lieu à la numérisation des photographies et au stockage des données (photographies, orthophotoplans, MNT, données, paramètres, etc.). La seconde, équipée des logiciels TeraVue Ortho® (ed. la Boyère) et Arcview® (ESRI), est orientée vers la production et l'assemblage des orthoimages, ainsi que l'interprétation et l'analyse des données.

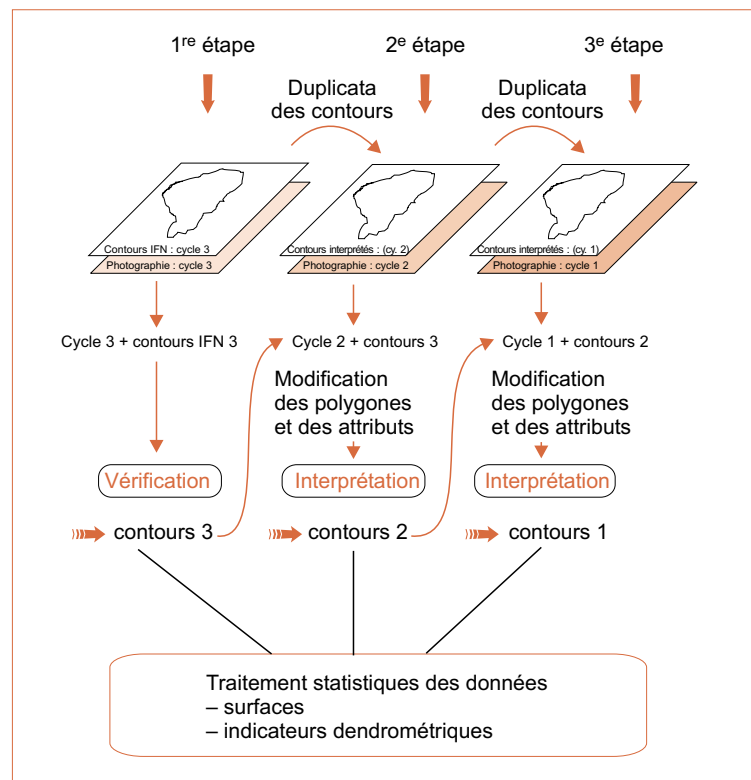
Réalisation des orthophotographies

Choix de la résolution

L'orthophotographie devait nous permettre, dans le cadre d'une interprétation à l'écran, de distinguer les houppiers des arbres, les lisières de forêts, ou encore de faire la différence entre un massif de conifères et une forêt de feuillus. Une résolution trop fine implique de manipuler des fichiers de plus grande taille, de disposer de machines plus puissantes, et allonge les temps de traitement. La résolution finale, un pixel de 2,5 m, résulte du compromis entre ces deux impératifs de précision et de volume des données à traiter.

Par exemple, pour englober un bassin versant de 50 km² il faut en moyenne une image de 10 km de côté (4 000 lignes x 4 000 colonnes) dont la taille sera de 16 Mo en niveau de gris (8 bits) et 50 Mo en couleur (24 bits) en l'absence de compression.

Figure 14. – Méthode de photo-interprétation régressive du couvert forestier. ▼



Numérisation et mise en forme des photographies

Pour obtenir une orthoimage à 2,5 m par pixel, nous avons choisi de numériser les photographies à environ 1,5 m (pour une échelle moyenne du cliché de 1/17 000 cela conduit à un scannage à 300 points par pouce, soit 0,085 mm/pixel). Un format de 24 bits (couleurs) a été retenu pour les clichés infrarouge couleur, et 8 bits (niveaux de gris) pour les clichés infrarouge noir et blanc

Pour estimer l'orientation interne, TeraVue Ortho® s'appuie sur une image dite « normalisée », recalculée par l'utilisateur de façon que les coins de l'image coïncident avec les marques fiduciaires. Un pixel de 0,1 mm, soit environ 1,7 m a été retenu pour ces images normalisées dans notre étude.

La figure 15 récapitule cette première phase de traitement.

Rectification

TeraVue Ortho® n'interpolant pas l'altitude, le MNT initial, d'un pas de 75 m, a dû être rééchantillonné à une maille comparable à l'orthophotographie (maille choisie : 3 m).

Le logiciel ne travaillant pas par bloc, l'orientation externe de chaque image doit être calculée au moyen d'une quinzaine d'amers. Compte tenu de l'élimination des points de calage lors de l'amélioration, une trentaine de points par photographie se sont avérés nécessaires. Les coordonnées terrain ont été digitalisées à partir de cartes topographiques au 1/25 000.

Les écarts moyens de calage obtenus, reflet de la précision géométrique, varient entre 1 et 1,5 pixel en x et en y (soit moins de 5 m sur le terrain).

Assemblage des orthophotographies

Des raccords peu esthétiques apparaissent entre les images. Mais dans un objectif de photo-interprétation, il est préférable de ne pas dégrader l'information contenue dans la couleur. Nous avons donc renoncé à un lissage entre les photographies. Et aucune correction colorimétrique n'a été réalisée pour améliorer les raccords.

La figure 16 synthétise les différentes étapes de l'intégration des photographies au SIG.

Moyens mis en œuvre

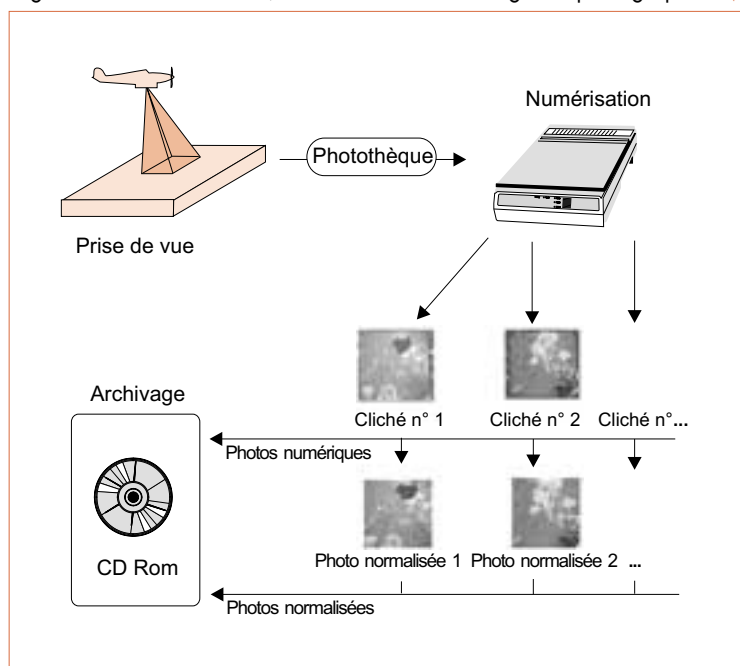
À partir de notre expérience dans le cadre de ce projet, le tableau 5 fournit une estimation du temps nécessaire à la production, puis l'assemblage d'une dizaine d'orthophotographies. Le temps de prise en main du logiciel n'est pas pris en compte (pour le logiciel TeraVue Ortho®, la prise en main est rapide).

Ces temps de traitement et de calcul varient significativement selon la précision et la résolution des images. Une résolution d'1m conduit à des images six fois plus volumineuses, lourdes à manipuler à tous les stades du traitement (du scannage à l'assemblage) ; les temps de travail peuvent ainsi être doublés.

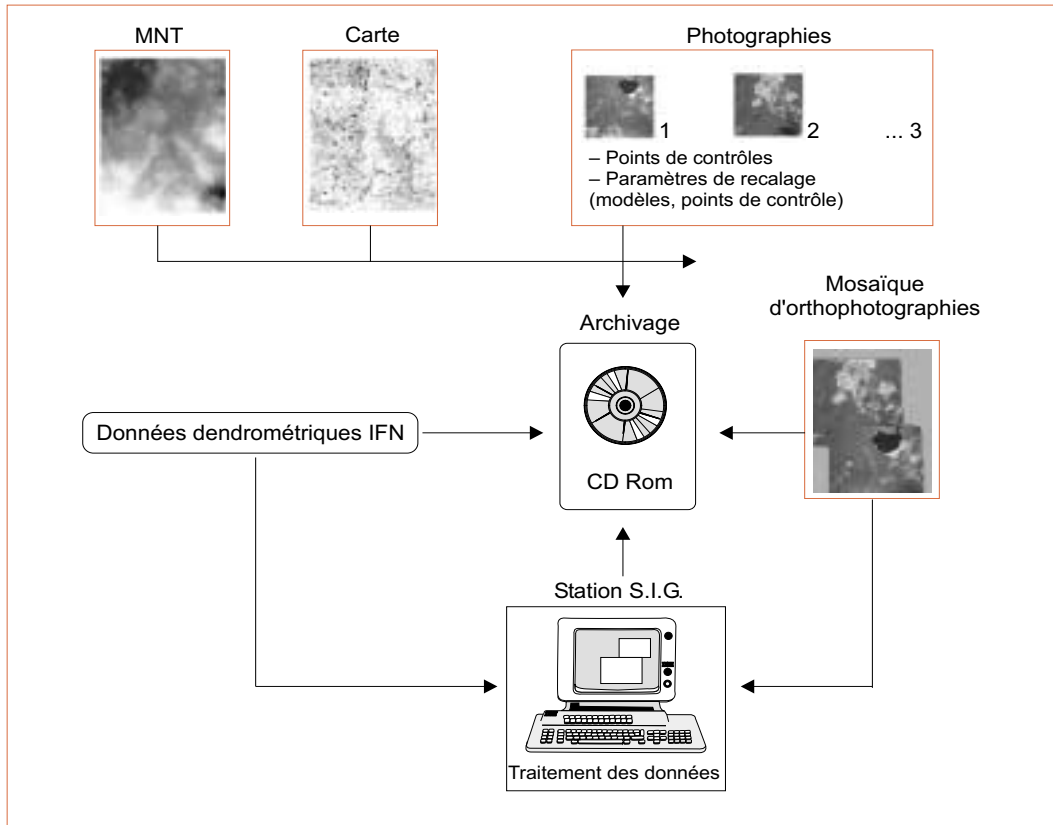
■ L'orthophotographie comme support de communication

Notre second exemple concerne le bassin versant de l'Orgeval. Ce bassin versant est une zone d'étude expérimentale, au centre d'un réseau de mesures, et fait donc l'objet de nombreuses expérimentations (modélisation hydrologique, suivi météorologique, rôle de la forêt sur l'écoulement, etc.).

Figure 15. – Numérisation, normalisation et archivage des photographies. ▼



Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG ?



▲ Figure 16. – Chaîne de traitement utilisée.

Un assemblage d'orthophotographies conçu à des fins de référentiel géométrique dans un environnement SIG (production de travaux cartographiques, repérage) a été réalisé avec le logiciel TeraVue Ortho® (résolution de 2.5 m/pixel). Le lissage radiométrique des zones de contact, ici nécessaire, a été fait avec un logiciel classique de traitement d'image.

La figure 17 représente un poster où l'on a utilisé cette image comme point central autour duquel s'articule des informations à caractère scientifique et des photographies des équipements installés. L'utilisation des orthophotographies sur ce document permet ainsi de présenter d'une manière visuelle les travaux scientifiques réalisés, et constitue ainsi un outil efficace de communication scientifique.

On peut également réaliser à partir d'un orthophotoplan et du MNT un « drapage » de l'image sur un bloc diagramme pour une présentation plus réaliste d'une zone d'étude. La

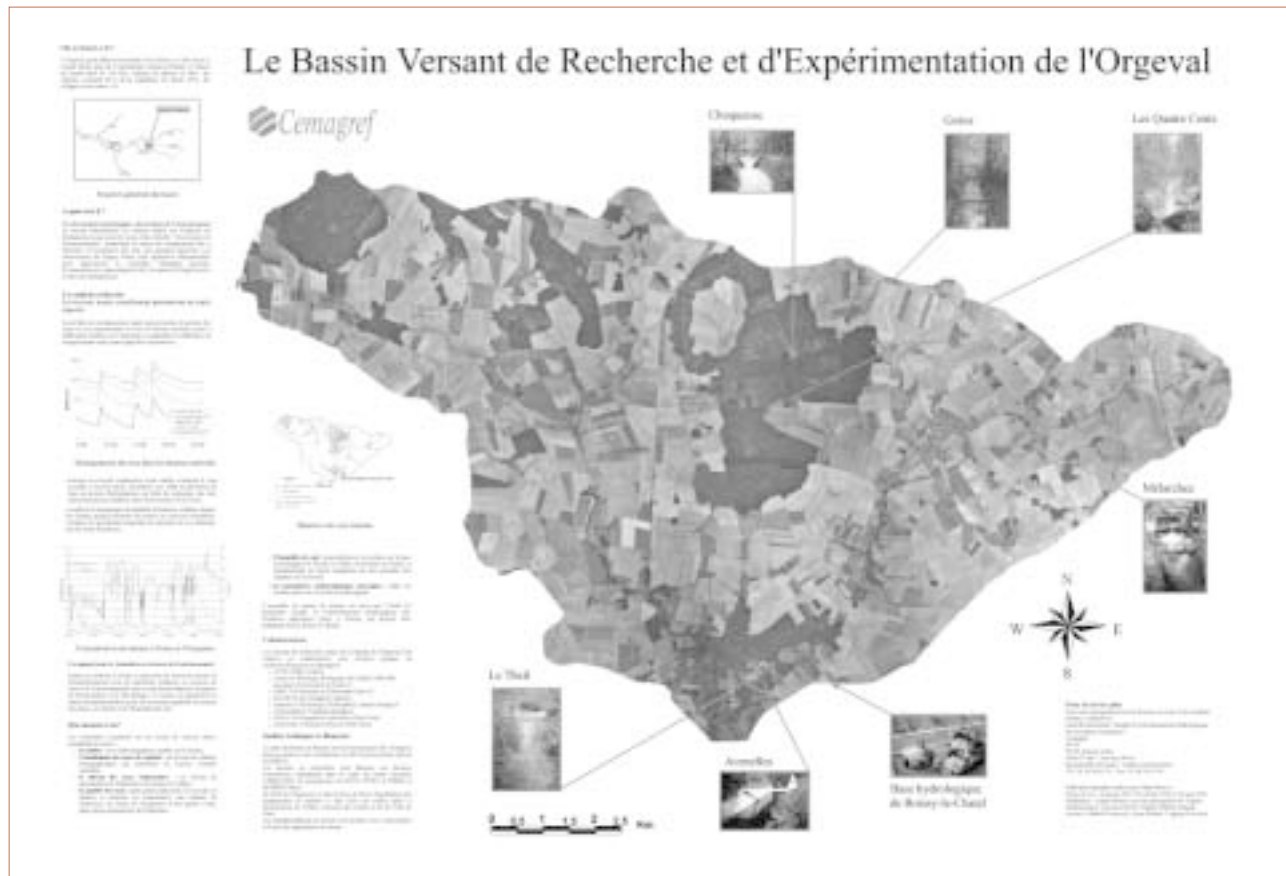
figure 18 illustre cette technique sur le bassin versant du Briançon à Cocures.

■ Analyse des études de cas

Si l'exploitation de photographies orthorectifiées nous a permis d'atteindre nos objectifs, il nous a fallu nous adapter et nous familiariser avec le système de traitement des données correspondant. La mise au point des aspects

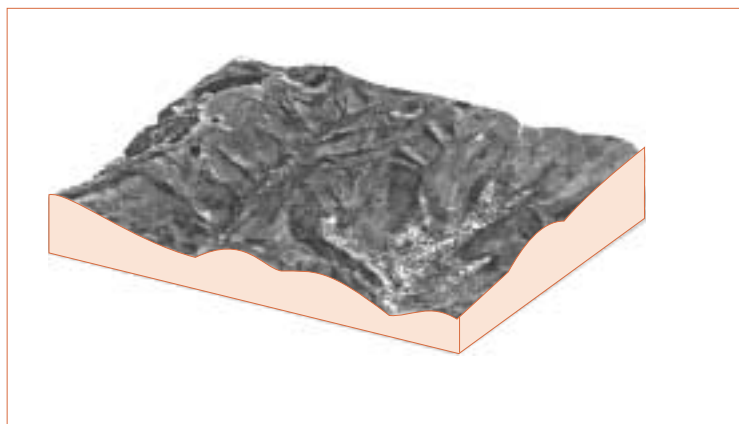
Tableau 5. – Estimation du temps de travail nécessaire au calcul et à l'assemblage d'une dizaine d'orthophotographies. ▼

Opération	Temps requis
Préparation	1 h
Numérisation des amers sur carte	3 à 4 h
Scannage des images	2 h
Rééchantillonnage et mise en forme du MNT	2 à 3 h
Orthorectification des photographies, et assemblage simple (estimation pour une dizaine de photographies)	8 à 10 h
Total pour une dizaine d'orthophotographies	16 à 20 h



▲ Figure 17. – Exemple de communication scientifique réalisée sur la base d'un orthophotoplan (six photographies).

Figure 18. – Bloc diagramme du bassin versant du Briançon à Cocures (habillage d'un MNT avec un orthophotoplan sur le logiciel TeraVueOrtho®).



techniques du projet, comme l'échelle de travail ou l'organisation logistique, a nécessité plusieurs essais, et a donc demandé un temps d'adaptation de plusieurs semaines.

Produire soi-même des orthophotographies demande donc un investissement initial (matériel, données, formation, temps de traitement) non négligeable qui doit être compensé par l'apport spécifique de ces données au projet. Dans notre cas, cette approche nous a permis d'atteindre plusieurs objectifs :

- l'interprétation de la couverture végétale pour différentes périodes (suivi chronologique) en cohérence avec des données existantes (IFN) ;
- le traitement automatique des données dans un environnement SIG.

Conclusion

L'orthophotographie connaît un essor important et ouvre de nouveaux horizons en combinaison avec les SIG : référentiel géométrique, représentation précise et naturellement lisible du terrain.

L'avènement des caméras numériques, des capteurs de positionnement et de mesure de l'altitude, conduiront à court terme à la production automatique d'orthophotographies numériques. Les satellites commerciaux à haute résolution offrent déjà des produits comparables. Le prix de ces produits doit donc diminuer et leur richesse thématique conduira à introduire plus fréquemment ces images dans les bases de données géographiques.

Les photographies aériennes existent depuis près d'un siècle et des couvertures systématiques du territoire sont disponibles depuis plusieurs dizaines d'années. Cette mémoire du terrain constitue un patrimoine précieux que l'on peut pérenniser grâce aux techniques de numérisation et de rectification présentés dans ce dossier. On s'attachera naturellement à mesurer l'investissement nécessaire à la production d'orthophotographies et à explorer les alternatives :

– dans les zones à faible relief une rectification plus simple (sans MNT) peut se montrer suffisamment précise ;

– des sous-traitants (géomètres, bureaux d'étude, etc.) équipés peuvent réaliser efficacement ces travaux de redressement.

Une fois disponible, ces images permettent des analyses diachroniques cohérentes et efficaces dans un environnement SIG et constituent un excellent support de communication.

Les chercheurs travaillent aujourd'hui, notamment au *Cemagref*, sur les méthodes d'extraction assistées voire automatiques d'objets depuis ces données (imagerie satellitale haute résolution et photographie aérienne) : compter automatiquement les arbres, les bâtiments, ou calculer une carte d'occupation du sol apportera une valeur ajoutée importante à ces images, y compris les anciennes photographies numérisées. De nouvelles perspectives d'analyse pour une décision efficace sur le terrain s'offriront alors à l'ingénieur et à l'aménageur. □

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Inventaire Forestier National (J.-G. Bourreau, E. Didon, N. Hamza, J. Wolsack, D. Lopez) pour son appui technique et la mise à disposition gracieuse des photographies aériennes utilisées dans cet article et pour les besoins de l'étude sur l'impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique de petits bassins versants du Massif Central. Ce travail bénéficie d'une subvention du Programme Environnement, Vie et Sociétés du CNRS (Programme systèmes écologiques et développement durable).

Les auteurs remercient également M. J.-M. Monget du Centre d'Informatique Géologique de l'École des Mines de Paris (Sophia Antipolis) et M^{me} A. Druel des Editions de la Boyère pour leur aide dans l'utilisation de TeraVue Ortho[®].

Résumé

Les avancées récentes dans le domaine de la micro-informatique ont mis à la portée d'un large public des techniques sophistiquées de traitement d'image. Les utilisateurs de photographies aériennes disposent ainsi d'outils performants de traitement et d'utilisation de ces images leur permettant notamment la réalisation d'orthophotographies, que l'on peut aisément intégrer à un logiciel de traitement de l'information géographique (SIG). Ce dossier fait le point sur le principe de l'orthorectification, ses contraintes en matériel, logiciels et données et aborde son application concrète au travers d'une étude hydrologique.

Abstract

The fast progress of microcomputers has made available new mass storage capacities and new techniques of image processing. Users of aerial photographs have now access to friendly softwares, allowing the integration of these images in a digital environment. These tools allow to orthorectify aerial photographs to integrate them in Geographical Information Systems. This technical note provides some technical background concerning orthorectification and the software, hardware and data necessary to accomplish this task, and presents a study based on this technique aimed at following forest cover evolution at the watershed scale.

Bibliographie

CORY, M.-J., MCGILL, A., 1999, *DTM Derivation at Ordonance Survey Ireland*, (OEEPE Workshop, Automation in Digital Photogrammetric Production, 22-24 juin 1999, École Nationale des Sciences Géographiques, Marne-la-Vallée.)

Dossier, mai 1999, Le redressement des images numériques. *Géomètre* n° 5, p 37-51.

HEIPKE, C., EDER, K., 1998, *Performance of tie point extraction in automatic aerial triangulation*, (OEEPE Official publication n° 35).

KACZYNSKI, R., ZIOBRO, J., 1999, *Digital Aerial Triangulation for DTM and Orthophoto Generation*, (OEEPE Workshop, Automation in Digital Photogrammetric Production, 22-24 juin 1999, École Nationale des Sciences Géographiques, Marne-la-Vallée.)

KASER, C *et al.*, 1999, *Digital aerotriangulation for map revision with Match-AT*, (OEEPE Workshop, Automation in Digital Photogrammetric Production, 22-24 juin 1999, École Nationale des Sciences Géographiques, Marne-la-Vallée.)

KÖLBL, O., 1999, *Reproduction of Image Sharpness with Photogrammetric Scanner, Conclusions of the OEEPE Scanner test*, (OEEPE Workshop, Automation in Digital Photogrammetric Production, 22-24 juin 1999, École Nationale des Sciences Géographiques, Marne-la-Vallée.)

KRAUS, K., WALSDHAÜSL, 1998, *Manuel de photogrammétrie*, HERMES, Paris. Traduction de Pierre Grussenmeyer & Olivier Reiss, 407 p.

THOM, C., SOUCHON, J.P, 1999, *The IGN Digital Camera System*, (OEEPE Workshop, Automation in Digital Photogrammetric Production, 22-24 juin 1999, École Nationale des Sciences Géographiques, Marne-la-Vallée.)