

Fig. 3 – Assemblage d'orthophotos disparates (à gauche), en une mosaïque continue (à droite).

orthophotoplan à l'Inventaire Forestier National

Nicolas Stach – Chargé d'étude en télédétection (IFN-CER)

Contexte

Fondé en 1958, l'Inventaire Forestier National (IFN) a pour mission de procéder à l'inventaire permanent des ressources forestières nationales, indépendamment de toute question de propriété. L'IFN a pour cela mis en place un inventaire statistique permanent de la forêt française, dans le cadre géographique des départements et avec une périodicité décennale ou duodécimale. Cet inventaire fournit une estimation des superficies relatives aux grandes catégories d'utilisation du sol ainsi que l'estimation de la ressource de bois sur pied des formations boisées et arborées (IFN, 1985).

La méthode de l'IFN est, depuis sa création, basée sur les photographies aériennes. Il s'agit d'un sondage en trois phases dont la première phase est la photo-interprétation d'une grille de points régulièrement répartis sur les photos. Ces points sont ensuite regroupés en strates en fonction des critères de la photo-interprétation et un échantillon de ces points est tiré dans chaque strate pour constituer l'échantillon de 2^e phase (contrôle de la photo-interprétation) et de troisième phase (mesures sur le terrain).

Depuis les années 1980, une étape de cartographie a été intégrée à la méthode de l'IFN (Didon, 1998) : les types de formation végétale, délimités sur photographies aériennes, sont reportés à vue sur fond cartographique au 1/25 000. Les limites des régions forestières et des classes de propriété sont également tracées sur ces cartes, puis les trois couches d'informations sont numérisées pour former la couche des Domaines d'Étude Cartographiés (DEC).

Le maillon faible de cette procédure de cartographie est le report à vue des tracés sur photo vers le fond cartographique. Cette étape est à la fois coûteuse en temps de travail et source d'imprécisions dans le positionnement des limites. Pour améliorer sa méthode, l'IFN a testé l'utilisation d'un stéréorestituteur analytique avant de faire appel à la procédure de photo numérisation permettant de redresser les contours tracés sur photo à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et de la saisie de points d'amer.

Ces dernières années, les progrès rapides de la micro-informatique en matière de puissance de calcul et de capacité stockage des données, ainsi que la généralisation des logiciels de Système d'Information Géographique (SIG) et de traitement d'images ont rendu envisageable la production et l'utilisation d'un orthophotoplan départemental dans un environnement matériel et logiciel assez courant.

Cette solution présente le double intérêt d'éliminer l'étape de report à vue des tracés et d'améliorer ainsi la précision géométrique de la carte, mais aussi de fournir un produit intermédiaire, l'orthophotoplan lui-même, susceptible d'être valorisé auprès d'autres utilisateurs.

Pour tester la faisabilité de la production d'un orthophotoplan départemental en interne et pour analyser les conséquences que cela implique sur les méthodes d'interprétation et de cartographie, la qualité du résultat et les délais de réalisation de sa carte, l'IFN procède à une première réalisation sur le département de l'Aude pour lequel le 4^e cycle d'inventaire a été engagé en 1999.

Les étapes de réalisation de l'orthophotoplan

Les photographies aériennes

L'IFN fait réaliser à chaque cycle d'inventaire des prises de vue aériennes départementales exhaustives et stéréoscopiques. L'IFN dispose ainsi d'une base de photographies couvrant l'ensemble du territoire métropolitain (ainsi que la Corse) et remontant jusqu'en 1960. Les échelles de ces photographies varient du 1/15 000 au 1/20 000. Les émulsions utilisées sont soit l'infrarouge noir et blanc couplé avec une couverture panchromatique, soit de l'infrarouge couleur (exceptionnellement la couleur naturelle). La stéréoscopie et le caractère exhaustif de ces couvertures sont assurés par un recouvrement de 60 % le long des axes de vol et de 20 % entre les axes.

Pour le 4^e cycle d'inventaire de l'Aude, une couverture aérienne a été réalisée entre le 24/7/99 et le 24/9/99 en infrarouge couleur. La chambre photogrammétrique utilisée par le prestataire est une chambre ZEISS LMK 1030. Elle a un format de 224 x 224 mm. La distance focale est de 305 mm. L'échelle moyenne des photos est le 1/17 000. La couverture complète et stéréoscopique de ce département représente 1 500 clichés.

Réception des photographies et organisation du projet

À la réception de la couverture, confiée à un prestataire, l'IFN contrôle les différents points du cahier des charges : exhaustivité de la couverture et recouvrement intra et inter bande, échelle, verticalité de la prise de vue, couverture nuageuse, date et heure d'acquisition, qualité des diapositives.

Certaines photos de la mission pouvant faire double emploi (du fait des reprises de vol effectuées selon les tranches d'altitude), seules les photos utiles sont sélectionnées et retenues. Le centre de chaque photo est alors repositionné sur fond cartographique au 1/25 000, puis digitalisé afin d'obtenir un fichier de coordonnées cartographique du centre approximatif de chaque photo.

Les photos retenues sont alors réparties en « blocs », ensemble de photos qui seront rectifiées conjointement. La taille des blocs actuellement retenue est d'environ 30 photos

Numérisation des diapositives

Toutes les photographies utiles du département sont numérisées. Afin de conserver le plus de détail possible, se sont les films (positifs) eux-mêmes qui sont numérisés et non les tirages papier.

Pour réaliser cette opération, l'IFN utilise un scanner à plat de type bureautique de format A3 et de résolution native de 800 dpi. Le format des photographies (224 x 224 mm) interdit en effet l'utilisation d'un scanner A4 si l'on veut numériser l'ensemble de la photo y compris ses bordures où sont localisées les marques fiduciaires dont la présence sur le fichier numérique est indispensable.

Les photographies sont numérisées à une résolution de 600 dpi, soit environ 70 cm au sol compte tenu de l'échelle moyenne de la prise de vue. Cette résolution résulte d'un compromis entre la précision souhaitée et la taille des fichiers générés. À cette résolution, le fichier image de chaque cliché couleur (24 bits) a une taille de près de 90 Mo (135 Go pour le département).

Les paramètres de la numérisation, sont fixés une fois pour toutes pour l'ensemble du projet et ne prennent donc pas en compte les variations de teinte ou de luminosité entre photos.

Toutes les photographies numérisées sont enregistrées sous forme de fichiers TIF qui sont archivés sur bande magnétique.

Orientation interne

Cette opération consiste à repositionner les photos numérisées dans la géométrie de la chambre de vue. Les paramètres de l'orientation interne sont indiqués dans le certificat de calibration de la chambre de prise de vue utilisée.

Ces paramètres sont : la distance focale de l'objectif, les coordonnées du point principal de symétrie, les mesures de distorsions radiales de l'objectif, les coordonnées des marques fiduciaires.

L'orientation interne, ainsi que les autres étapes de l'orthorectification (orientation externe et orthorectification) sont réalisées sur le logiciel Orthobase d'ERDAS.

Après avoir saisi les paramètres de l'orientation interne et les avoir enregistrés dans un modèle de chambre de prise de vue, les marques fiduciaires sont digitalisées à l'écran de façon à calculer un modèle de passage entre les coordonnées image (ligne/colonne) et les coordonnées dans la géométrie de la chambre de prise de vue.

Orientation Externe

Le calcul de l'orientation externe consiste à déterminer pour chaque cliché la position et l'orientation de la chambre de prise de vue au moment de l'acquisition de l'image. 6 paramètres décrivent cette orientation :

- les coordonnées géographiques dans le référentiel cartographique utilisé : X_0, Y_0 ,
- l'altitude Z_0
- le roulis : ω , le tangage, ϕ et le lacet, κ .

La détermination de ces paramètres est réalisée par bloc de photo grâce au procédé d'aérotriangulation.

L'aérotriangulation fait appel à un jeu de points d'amer dont les coordonnées images et les coordonnées cartographiques (X, Y et Z) sont connues. En pratique, une trentaine de points d'amer sont choisis par bloc de 1^e photos. Ces points doivent être repérables à la fois sur les photos et sur carte au 1/25 000 (figure 1). Leurs coordonnées cartographiques sont déterminées par digitalisation de la carte au 1/25 000 et leurs coordonnées images sont saisies à l'écran. Ces points doivent être bien répartis sur le bloc et couvrir tout particulièrement ses bordures.

L'intérêt de l'aérotriangulation par bloc est de pouvoir compenser un nombre relativement modéré de points d'amer par la détermination d'un nombre important de points de liaison. Contrairement aux points d'amer, les points de liaisons ont des coordonnées images relatives à chacune des images sur lesquelles ils sont visibles (au moins deux) mais n'ont pas de coordonnées cartographiques connues. Le logiciel Orthobase permet une détection automatique de ces points de liaison (ERDAS, 1999). Plus de 500 de ces points sont ainsi déterminés pour chaque bloc.

L'aérotriangulation utilise les informations sur les coordonnées images et cartographiques des points de liaison et des points d'amer pour déterminer les paramètres de l'orientation externe de chaque photo. Ce procédé est basé sur le principe de co linéarité stipulant que le point au sol, le point sur la photo et le centre de perspective de l'objectif sont alignés. La résolution du système se fait de façon itérative par moindres carrés (ERDAS, 1999).

Le logiciel calcule pour chaque point une erreur résiduelle quadratique. L'analyse de ces erreurs permet de détecter et d'éliminer les points aberrants et de contrôler la précision planimétrique globale du modèle. Les erreurs résiduelles quadratiques moyennes des blocs réalisés à l'IFN varient de 5 à 10 mètres.

Orthorectification

Une fois l'orientation externe des photos établie, le modèle de transformation entre les coordonnées images et les coordonnées cartographiques est entièrement déterminé, sous réserve de disposer d'une représentation du relief de la zone. Cette représentation est donnée par le Modèle Numérique de Terrain (MNT)

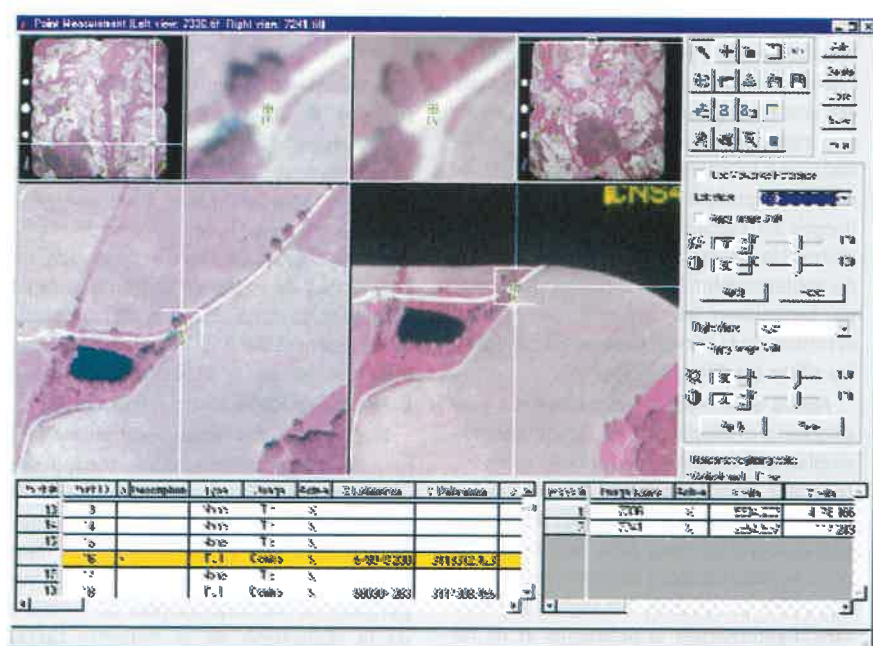
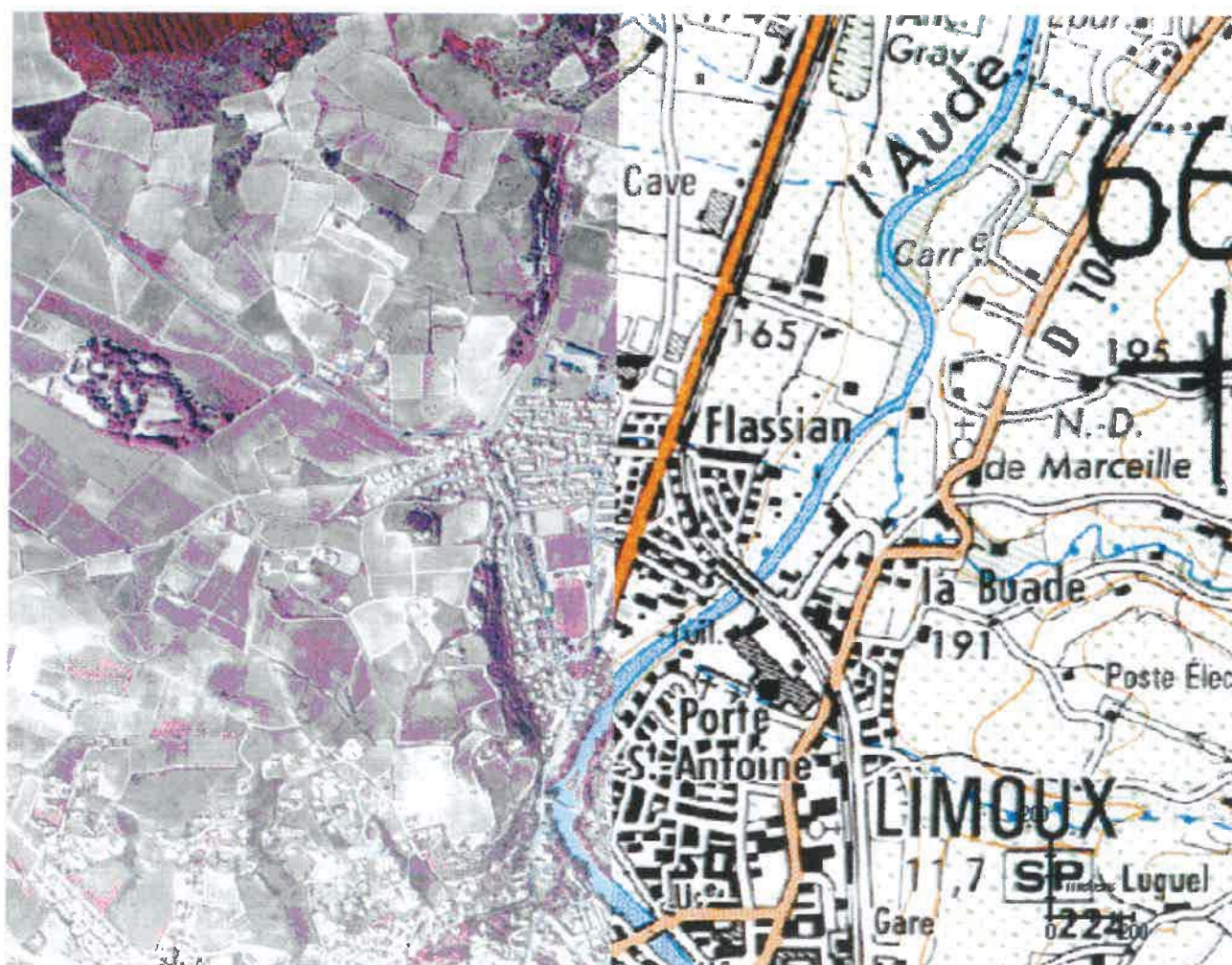


Figure 1 - Fenêtre de saisie des points d'amer sur ERDAS Orthobase

Figure 2 - Juxtaposition de l'orthophoto (à gauche) et de la carte IGN (à droite)



BDalti au pas de 100 mètres. Chaque photo est alors redressée dans la géométrie de la carte (figure 2). Le rééchantillonnage radiométrique nécessaire à cette opération est réalisé avec une résolution de 1 mètre au sol par interpolation bilinéaire de la radiométrie des pixels voisins.

Mosaïquage

Les photographies étant orthorectifiées, il s'agit de les raccorder en un plan continu où les limites entre les photographies originales ne sont plus perceptibles (figure 3, en tête de l'article). Deux difficultés de nature différente sont à surmonter pour mener à bien cette opération :

• Du point de vue géométrique

Les orthophotos individuelles ont une précision planimétrique de l'ordre de 10 mètres. Ce niveau de précision implique que des décalages allant jusqu'à 20 mètres peuvent être présents entre deux orthophotos. Des décalages de cette importance occasionnent des zones de discontinuité dans la mosaïque et peuvent dans certains cas produire des aberrations visuelles non acceptables.

La solution à ce problème passe par la définition des lignes de raccord entre photos. Celles-ci peuvent être déterminées par l'opérateur de façon à passer par les zones où les photos présentent le moins de discordance ou par des zones de faible contraste pour lesquelles les aberrations engendrées par les discordances sont moins visibles. Cette opération de détermination manuelle des lignes de raccord est longue et fastidieuse. Des procédés automatiques permettent d'atteindre le même résultat (Le Men, 1999). Ces procédés font généralement appel à la minimisation d'une fonction de coût de transition entre deux images, le coût étant calculé à chaque point comme la différence entre deux images.

• Du point de vue radiométrique

Les sources de variation de la radiométrie entre photographies et à l'intérieur d'une même photographie sont nombreuses :

- vignetage (effet de l'optique),
- réflectance bidirectionnelle (effet « hot spot » ou « tâche claire »),
- conditions de prise de vue : phénologie, atmosphère, éclairage, température,
- qualité émulsion, stockage des films, développement,
- conditions de numérisation.

Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour égaliser la radiométrie des photographies. Une simple égalisation d'histogramme peut permettre d'égaliser la radiométrie entre les différents clichés mais ne prend pas en compte la variabilité au

sein d'une photo. Une retouche manuelle des radiométrie avec un logiciel d'amélioration d'image peut être envisagée mais est une opération relativement longue et non reproductible. Les égalisations automatiques peuvent faire appel à des modèles empiriques qui subdivisent les images en secteurs et normalisent la radiométrie de ces secteurs sur l'ensemble du projet ou bien à des modèles physiques qui formalisent les différentes sources de variation de la radiométrie et en corrigent les effets (Le Men, 1999).

Après avoir réalisé les premières mosaïques d'orthophotos en délimitant manuellement les zones de raccord et en retouchant manuellement la radiométrie, le temps nécessaire à cette opération s'est avéré être trop long pour la production d'un orthophotoplan départemental dans des délais acceptables. Un logiciel permettant d'automatiser le processus et de réduire les délais de réalisation (Orthovista, Inpho/stellacore) est en cours d'évaluation à l'IFN.

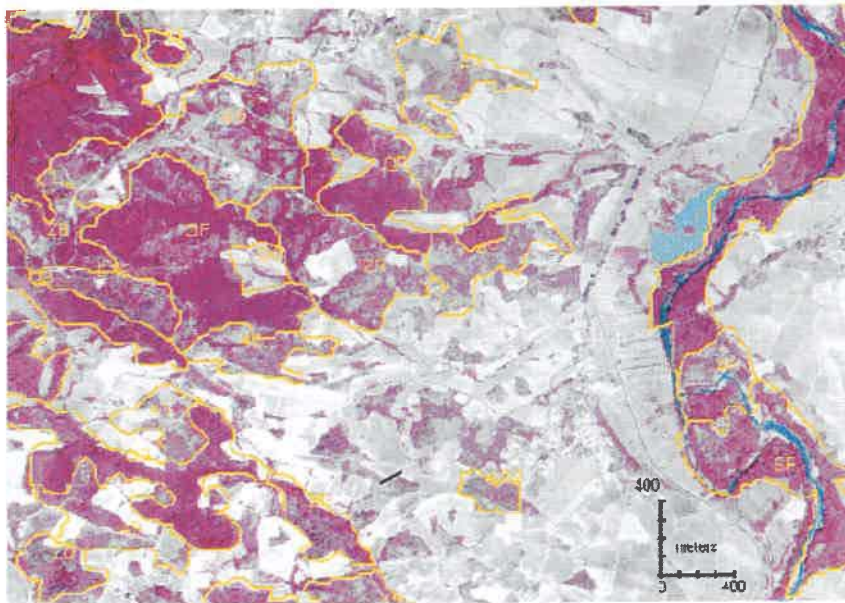
La mosaïque entière du département correspondant à un fichier beaucoup trop volumineux, l'orthophotoplan départemental est découpé en dalles régulières de $7.5 \times 10 \text{ km}^2$ (1/8 de coupure IGN 1/50 000).

tion sous stéréoscope et des tournées de terrain.

L'utilisation de l'orthophotoplan comme support de la photo-interprétation à l'écran sous SIG (Arcview, ESRI) permet de tracer des limites qui sont directement sous forme numérique et dans une géométrie cartographique. Cependant, l'affichage à l'écran de l'orthophotoplan ne permet pas de restituer la vision en relief (topographie et hauteur des arbres), particulièrement utile à la détermination des essences et de la structure forestière (taillis, futaie, taillis sous futaie).

Néanmoins, les fonctionnalités du SIG peuvent en partie compenser cette perte d'information. En particulier, toute la France ayant déjà fait l'objet d'une cartographie lors des cycles précédents d'inventaire, cette cartographie peut être superposée à l'orthophotoplan au moment de la réalisation de la nouvelle carte. Toute la richesse de l'information contenue dans cette ancienne carte, issue de l'interprétation au stéréoscope et de nombreuses vérifications sur le terrain est alors à la disposition du photo-interpète qui se trouve plus dans un contexte de mise à jour que de création de carte (figure 4).

Figure 4 - Superposition de l'orthophotoplan et de la carte des types de peuplement IFN du cycle précédent (en jaune)



Utilisation de l'orthophotoplan

Dans la méthode traditionnelle de l'IFN, les types de formations végétales sont dans un premier temps délimités sur les photographies avant que ces limites ne soient reportées à vue sur fond cartographique au 1/25 000. La détermination et la délimitation des types sont réalisées par un aller retour entre la photo-interpréta-

tion sous stéréoscope et des tournées de terrain. Par ailleurs, le confort de vision à très grande échelle apporté par l'affichage à l'écran de l'orthophotoplan permet de compenser partiellement l'absence de stéréoscopie.

Enfin, le recours au stéréoscope et aux visites sur le terrain est conservé dans le cas où l'information contenue dans l'orthophotoplan et la carte du cycle précédent sont insuffisantes pour la détermination du type.

Conclusions

Bien que cette première expérience de réalisation et d'interprétation d'un orthophotoplan départemental ne soit pas entièrement achevée, des premières conclusions peuvent d'ores et déjà être tirées au vu des premiers résultats obtenus.

La première conclusion est que la réalisation d'un orthophotoplan dans un environnement informatique relativement courant, et par du personnel non spécialisé en photogrammétrie est possible. Cette opération est cependant relativement longue. Pour ne pas détourner les photo-interprètes de leur métier, il est nécessaire qu'un équilibre soit trouvé entre le temps de réalisation de l'orthophotoplan et celui passé en photo-interprétation. Il convient pour cela de s'attacher à l'optimisation de la production de l'orthophotoplan, notamment par l'automatisation des tâches qui peuvent l'être (détection de points de liaison, aérotriangulation, mosaïquage).

L'orthophotoplan produit selon la chaîne de traitement de l'IFN a une résolution de 1 mètre pour une précision planimétrique de 10 mètres. Ce niveau de qualité est largement suffisant pour les besoins de l'inventaire. Une amélioration de cette qualité ne pourrait être atteinte qu'en

améliorant simultanément chaque maillon de la chaîne : numérisation avec un scanner photogrammétrique, localisation précise par mesures GPS ou géométrie sur le terrain, utilisation d'un MNT plus précis ou auto corrélation.

Compte tenu du niveau de précision de l'orthophotoplan actuel, les bénéfices attendus par l'IFN sont importants : amélioration de la précision de la carte, meilleure comparabilité des cartes de cycles successifs, valorisation possible de l'orthophotoplan auprès d'autres utilisateurs.

À l'issue de cette première expérience et au vu des temps passés à chacune des tâches, des conclusions seront tirées sur la faisabilité de la procédure en interne. Le cas échéant, il pourrait être envisageable d'externaliser toute ou partie de la production de l'orthophotoplan pour certains départements, voire d'utiliser le produit standard d'IGN – la BD-ortho – qui présente l'inconvénient de ne pas correspondre aux spécificités de l'IFN en ce qui concerne l'émulsion (couleur naturelle au lieu d'infrarouge couleur).

À moyen terme, l'acquisition directe de photographies numériques, couplée avec des enregistrements précis à bord (GPS, centrale inertielle) devait permettre de s'affranchir de plusieurs étapes de la production d'un orthophotoplan (numérisa-

tion des photographies) ou du moins de les alléger considérablement (saisie de points d'amer et aérotriangulation).

Bibliographie

Didon, E., 1998. 1973-1998, 25 ans de cartographie à l'IFN. Actes du séminaire "Les données de l'inventaire forestier national dans les systèmes d'informations géographiques", Nogent-sur-Vernisson (Loiret), 26-27 mai 1998. pp 13-24.

ERDAS, 1999. *IMAGINE OrthoBASE V8.3.1. Tour guide*. ERDAS, Inc., Atlanta, Georgia.

IFN, 1985. *But et méthodes de l'inventaire forestier national*, Ministère de l'agriculture Service des forêts.

Kraus, K. et P. Waldhäusl, 1998. *Manuel de photogrammétrie, principes et procédés fondamentaux*. trad. P. Grussenmeyer et O. Reis, Hermès, Paris.

Le Men, H. et D. Boldo, 2000. *Mosaïque automatique d'orthophotographies*. Actes du 12^e congrès francophone AFRIF – AFIA de reconnaissance des formes et intelligence artificielle, Paris, 1-3 février 2000.

Muraz, J., S. Durrieu, S. Labbé, V. Andréasian et M. Tangara, 1999. *Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG?* Ingénieries EAT (Ed. Cemagref) 20h 39-58.

(Texte de la conférence du séminaire ESRI-AFT du 08/06/00)

E-mail : nstach@inf.fr

VUES AERIENNES METRIQUES

TOUTES ÉCHELLES - TOUTES ÉMULSIONS : POUR TOUTES APPLICATIONS



AU SERVICE DES AMENAGEURS

670, rue Jean Perrin • Z.I. • 13851 AIX EN PROVENCE CEDEX 03

Téléphone : 04.42.60.05.45 • Télécopie : 04.42.24.26.04