

**EXTRACTION AUTOMATIQUE D'OBJETS  
SUR STATIONS PHOTOGRAMMETRIQUES NUMERIQUES  
(Automated Feature Extraction on Digital Photogrammetric Systems)**

Olivier JAMET  
Chargé de Recherches au laboratoire MATIS  
INSTITUT GEOGRAPHIQUE NATIONAL - FRANCE  
EMail : jamet@matis.ign.fr

Commission III, Groupe de travail ICWG II/III

**KEY WORDS:** Automation, Production, Performance, Cartography, Softcopy Photogrammetry

**ABSTRACT**

This paper offers pieces of reflection about the automation of feature extraction on digital photogrammetric workstations (DPW). The wide majority of softcopy stereoplotters includes more or less advanced automatic functions as helps for the data capture, from simple support for image orientation, up to Digital Terrain Model computation or automatic triangulation. This fact outlines the success of research and the investment made by the DPW industry in the field of image analysis. However, feature extraction raises more difficulty. While an impressive effort has been led by the scientific community for many years, few tools have show operational up to now. We attempt a brief analysis of this situation on the basis of a few examples from fields in connection with topographic cartography.

Section 2 presents a brief overview of the research activity on object recognition from aerial images, and of the current operational automatic tools available on DPW. We underline a few general questions, such as the lack for robustness of low level shape recognition algorithms, and the need for an interactive control of the automatic tools in use within the data capture process.

We discuss these two key-points in the following section. Robustness can be looked for in the input image data redundancy. Data cost should anyway be correctly weighted, and the optimal solutions isn't always the more automatic. As far as interactivity is concerned, the problems concern mainly the evaluation of the actual productivity of the proposed methods, and the community is up to now lacking for standards and reference data.

We conclude on the possible evolution within the forthcoming years by pointing out the possible changes to be brought by a diversification of the photogrammetric data market, and the potential improvement that can be expected from digital sensors.

**RESUME**

Cet article propose des éléments de réflexion sur l'automatisation de la saisie photogrammétrique d'objets sur vidéorestituteurs. Les stations de travail photogrammétriques numériques actuelles offrent toutes des fonctions plus ou moins avancées d'automatisation des tâches de saisie, allant de la simple aide à l'orientation des clichés, jusqu'au calcul de Modèles Numériques de Terrain ou à l'aérotriangulation automatique. Ce constat montre le succès des recherches en analyse d'image et l'investissement des constructeurs dans ce domaine. Les tâches d'extraction d'objets posent néanmoins plus de difficultés. Alors que des recherches actives sont conduites dans ce domaine depuis de nombreuses années, peu d'outils opérationnels ont jusqu'alors vu le jour. A partir d'exemples dans les domaines connexes à la cartographie topographique, nous tentons une brève analyse des raisons de cette situation.

La section 2 est consacrée à un rapide passage en revue de l'activité de recherche, et des transferts de technologie effectués sur les vidéorestituteurs du marché. Cette discussion souligne quelques problèmes généraux, concernant la fragilité des algorithmes de bas niveau utilisés en reconnaissance des formes, et la nécessité d'intégrer l'automatisme dans un environnement interactif contrôlé par l'opérateur.

Ces deux points sont développés dans la section suivante. La fragilité des algorithmes d'extraction peut inciter à une recherche de robustesse dans la redondance des données images utilisées. Le coût des données doit toutefois être pesé et conduit à ne pas forcément opter pour les méthodes de saisie les plus automa-

tiques. L'intervention de l'opérateur dans la chaîne de traitement pose quant à elle des difficultés d'évaluation comparative des différentes solutions possibles pour l'environnement de saisie.

Nous concluons sur quelques perspectives d'évolution pour les années à venir, concernant en particulier l'évolution potentielle du marché des données produites par photogrammétrie et les ouvertures qui seraient offertes par l'utilisation de capteurs numériques.

## 1. INTRODUCTION

L'apparition de techniques numériques dans les métiers de la photogrammétrie n'est pas nouvelle. Il y a déjà plus de dix ans, la technologie des appareils de restitution analytiques occasionnait de profonds changements dans la gestion des informations saisies, et dans les méthodes de planification des travaux de restitution. On peut faire remonter l'automatisation des méthodes de saisie à un passé encore plus lointain : les premiers essais de mise en correspondance automatique d'images numériques datent des années 70 (pour la production de modèles numériques de terrain : Kreiling, 1976; ou dans le cadre d'études sur la vision : Marr et Poggio, 1977), et l'on peut dater de la fin des années 50 les premiers essais d'automatisation par des techniques analogiques (Hobrough, 1959).

Si l'avènement des appareils de restitution numériques, appelés également "stations de travail photogrammétriques numériques" ou "vidéorestituteurs", cause une nouvelle révolution, c'est parce qu'il est porteur de fortes réductions des coûts de saisie, d'une part à travers une démocratisation de ces outils automatiques jusqu'alors réservés à la photogrammétrie expérimentale, et d'autre part via une diminution substantielle du prix des équipements.

Ces dernières années, les vidéorestituteurs ont su montrer leur capacité à répondre aux besoins opérationnels d'institutions dédiées à la cartographie nationale, comme l'Institut Cartographique de Catalogne (ICC) ou l'Institut Géographique National français (IGN-F), et commencer à séduire de plus petites entreprises.

Toutefois, si les techniques de mise en correspondance ont déjà montré quelques succès, dans les procédures d'aide à l'aérotriangulation comme dans la fabrication de modèles numériques de terrain, on ne peut en dire autant des outils d'aide à la saisie en mode vecteur. Bien que certains vidéorestituteurs offrent des fonctionnalités telles que l'assistance à la saisie des bâtiments, par exemple, l'opérationnalité de ces outils n'est pas prouvée. Les utilisateurs des vidéorestituteurs ont sur ce point plus investi dans les potentialités futures de ce type d'équipement que dans ses avantages actuels.

Dans cet article, nous proposons d'éclairer ce constat par une brève analyse de l'avancement actuel des recherches et des problèmes de transfert de technologie posés aux industriels, aux chercheurs eux-mêmes, ainsi qu'aux utilisateurs des vidéorestituteurs. Nous ne prétendons pas faire le tour du problème — ni proposer de solution définitive. D'une part, nous nous limitons au domaine des applications topographiques ou cartographiques, qui correspondent à notre champ d'expérience. D'autre part, notre ambition reste plutôt d'ouvrir le débat par quelques exemples qui nous ont paru significatifs.

Nous consacrons une première section à un bref état de l'art concernant les recherches dans le domaine de la vision artificielle. Cette première réflexion n'écarte pas les techniques à base de corrélation, bien qu'elles ne soient pas à proprement parler des techniques d'extraction d'objets, dans la mesure où les succès avérés de ces outils, ainsi que leurs limites, peuvent éclairer la question du transfert de la recherche à l'industrie.

La section suivante propose des éléments de réflexion sur les difficultés intrinsèques à l'automatisation des tâches de saisie d'objets sur images numériques, que nous illustrons par quelques exemples dans le domaine de la restitution tridimensionnelle des bâtiments et du réseau routier.

Nous proposons enfin une synthèse sous la forme de propositions pour les futures orientations de la recherche et les collaborations entre recherche et industrie.

## 2. LES TRANSFERTS DE TECHNOLOGIE

### 2.1. Panorama de la recherche

Les applications de l'analyse d'image à la restitution se partagent en deux groupes distincts : d'une part, les calculs de mise en correspondance à base de corrélation automatique ou d'appariement de primitives (*feature-based matching*), et d'autre part les outils d'extraction d'objets. Cette séparation a, en premier lieu, un sens historique. Même si, dans le domaine de la robotique, les applications de reconnaissance d'objets ont été étudiées aussi

tôt que les méthodes de mise en correspondance, leur application au domaine de la photogrammétrie est plus récente — et les recherches sur ces thèmes ont même connu un nouvel essor dans ces dernières années, notamment sous l'impulsion de programmes de recherche militaires (programmes de l'ARPA aux Etats-Unis, par exemple), en particulier pour ce qui concerne la restitution des bâtiments.

La distinction entre ces deux familles de problèmes a toutefois également un sens plus fondamental. Les techniques de mise en correspondance sont des techniques que l'on peut qualifier de bas niveau au sens où elles ne supposent pas d'interprétation de la scène. A l'inverse, l'extraction d'objets nécessite (au minimum dans la phase finale de filtrage des erreurs) une interprétation, c'est à dire, dans un sens purement informatique, l'association du contenu des images à un modèle de l'objet cherché.

Il est difficile de faire brièvement un panorama complet de l'activité de la communauté scientifique sur ces deux classes de problèmes. Pour ce qui concerne les techniques de mise en correspondance, on pourra se reporter à (Heipke, 1996). Les recherches sur l'extraction d'objets peuvent, quant à elles, être rapidement esquissées en fonction de la souplesse des modèles employés.

De façon schématique, les méthodes les plus contraintes utilisent des modélisations paramétriques : la forme de l'objet cherché est connue avec un nombre limité de degrés de liberté, et le problème se réduit à la recherche d'un jeu de paramètres optimaux pour l'ajustement entre images et modèle. Cette technique reste bien entendu limitée à un ensemble de formes prédéfinies (e.g. Weidner et Förstner, 1995) à moins d'introduire de l'information externe pour permettre un choix automatique dans un ensemble important de modèles. Quint (1995) utilise par exemple des techniques d'ajustement pour l'extraction tridimensionnelle de bâtiments dont le contour 2D a été vectorisé sur un plan à grande échelle. Une modélisation plus souple consiste à définir les objets à l'aide de cônes généralisés (McGlone, 1995), ou comme des assemblages de modèles paramétriques. Le problème de la recherche, dans l'image, de la décomposition appropriée n'est toutefois pas résolu (Braun et al., 1995). Les modèles les plus souples sont ce que l'on peut appeler des modèles génériques. Les objets sont alors définis par des primitives (segments, points caractéristiques...) et un ensemble de possibilités d'assemblage. Les

techniques de groupements perceptuels sont un exemple d'exploitation de ce type de modèle (e.g. Lin et al., 1995).

Cet axe d'analyse peut bien entendu être complété par d'autres. Les objets peuvent être caractérisés dans l'espace 3D ou uniquement par leurs projections dans les images ; les modèles utilisés peuvent être fondés uniquement sur la radiométrie et la géométrie des objets cherchés (à base de groupements et de mise en correspondance pour des bâtiments : Dissard et Jamet, 1995; ou à base de recherche de chemin optimal pour des éléments linéaires : Grün et al., 1995), ou intégrer des relations avec leur environnement (e.g. utilisation des ombres Bejanin et al., 1994) ; l'implantation du modèle peut être faite sous forme de règles (McKeown et al., 1985), d'agents, d'arbre de déclenchement (Lin et al., 1995) ; l'application peut intégrer l'intervention d'un opérateur ou rester entièrement automatique ; etc...

On trouvera dans (Braun et al., 1995) une proposition de processus de restitution du bâti intégrant plusieurs niveaux de modèles, ainsi qu'une discussion sur les problèmes liés au contrôle des processus d'interprétation automatique complexes.

Cette bibliographie sommaire montre la diversité des travaux de recherche en cours et fait comprendre que la clef de l'efficacité des méthodes proposées ne repose que pour très peu dans le choix des détecteurs de bas niveau. Pour ne prendre que l'exemple de la reconnaissance des bâtiments, la plupart des travaux s'appuient sur les mêmes opérateurs de gradient. Le problème abordé par les chercheurs aujourd'hui concerne la limitation des erreurs de détection, que les différents modèles employés tentent d'éliminer en imposant des contraintes rendant improbable un échec non diagnostiqué.

## 2.2. Des succès (relatifs)...

Les vidéorestituteurs du marché offrent aujourd'hui presque tous des fonctions automatiques ou semi-automatiques d'aide à la saisie, les plus élémentaires étant l'aide au pointé des repères de fond de chambre pour l'orientation interne, et les plus sophistiquées étant l'aérotriangulation automatique (logiciel HATS d'HELAVA, ou PHODIS AT de ZEISS; fonctionnalité sous peu disponible sur la plate-forme SAPHIR Geo de SYSECA), ou la production de modèles numériques de terrain (présente en option sur la majorité des systèmes : logiciels ATE pour HELAVA, MATCH-T pour INTERGRAPH, TopoSurf pour ZEISS).

Le développement de ces outils est dans une part des cas le fruit d'une collaboration étroite avec les universités, et plus généralement la recherche. C'est la cas de ZEISS, par exemple, dont tous les outils automatiques sont élaborés en lien avec les universités allemandes (e.g. orientation relative : Tang et Heipke, 1996; ou logiciel de corrélation : Krystek, 1991), ou d'INTERGRAPH avec MATCH-T (Ackermann et Krystek, 1991). On peut également citer SYSECA dont le logiciel d'aérotriangulation provient des recherches de l'IGN-F (travaux de J. Ducloux : Thom et Jurvillier, 1994).

Il peut également être le fruit d'un effort de recherche interne des constructeurs eux-mêmes, comme dans le cas d'HELAVA qui travaille en étroite collaboration avec GDE Systems, industrie privée possédant ses propres équipes de recherche et développement.

Ces exemples montrent que la coopération recherche-industrie est effective, et conduit à des résultats sur au moins une classe de problèmes. Cependant, les méthodes mises au point doivent parfois encore convaincre, même dans le cadre de processus de bas niveau. Les deux exemples les plus probants sont l'aérotriangulation automatique et la génération de modèles numériques de terrain par corrélation.

Les procédés d'aérotriangulation automatique n'ont peut-être pas encore atteint leur maturité : les comparaisons effectuées par O. Kölbl (Kölbl, 1996) entre les productivités respectives d'une aérotriangulation automatique (logiciel HATS d'HELAVA) et d'une aérotriangulation manuelle (sur ImageStation d'INTERGRAPH) ont laissé quelques doutes sur la stabilité du logiciel automatique, et donc sur son opérationnalité réelle. Il est toutefois vrai que la version de HATS dont disposait l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne était encore en cours de mise au point — et l'expérience que nous avons à l'IGN-F de ce problème nous conduit à penser que ce type de fonctionnalité sera assez rapidement disponible pour de la production régulière.

Pour ce qui est de la corrélation automatique, son opérationnalité pour les applications à petite échelle est largement démontrée. Son emploi à des fins cartographiques autres que l'orthophoto sur des images de résolution métrique pose encore question : les procédures d'élimination du sursol n'ont pas une fiabilité démontrée, et les zones exploitables restent bien entendu limitées aux surfaces dépourvues de couvert forestier.

### 2.3. ...et des échecs (relatifs).

Contrairement aux méthodes de corrélation, et malgré l'ampleur des efforts de recherche, les procédés d'aide à l'extraction d'objets n'ont jusqu'à présent pas eu de débouché réel. Le constructeur ayant le plus investi (en moyens humains) dans ce domaine est sans doute GDE Systems (sur financement gouvernemental). Des études ont commencé dès la fin des années 80 sur l'extraction de segments, les procédés de croissance de région, les contours actifs et l'appariement de primitives, tandis qu'en parallèle étaient conduites des recherches sur les systèmes à base de connaissances pour l'aide à l'affectation d'attributs.

Ce sont sans doute ces dernières techniques qui ont donné les meilleurs résultats. Les extractions de primitives ne se sont pas montrées très intéressantes en terme de gain de productivité, les taux d'erreurs restant trop élevés pour que ces techniques soient efficaces.

Actuellement, HELAVA s'oriente vers des méthodes semi-automatiques, fondées sur l'entrée d'amorces par l'opérateur, soit sous la forme de saisies approximatives — avec positionnement fin automatique — soit sous la forme de points de départ initialisant des algorithmes de suivi (source : Scott Miller, HELAVA).

La société SYSECA, plus récente sur le marché, investi également sur le sujet : le portage des outils d'aide à la saisie du réseau routier sur SAPHIR Geo développés à l'IGN-F par S. Airault est en cours. Si les résultats d'étude sont encourageants (Airault et Jamet, 1995), ces fonctionnalités doivent toutefois encore faire leurs preuves à l'échelle industrielle.

### 2.4. Synthèse

Ces considérations amènent d'ores et déjà quelques remarques générales qui seront développées dans la section 3.

**La coopération recherche-industrie** n'est de toute évidence pas en cause. On peut constater que l'industrialisation des outils issus de la recherche fonctionne plutôt bien, pourvu que soit établie leur portée générale et leur robustesse. Nous discuterons plus bas le problème de la généralité des outils. Pour ce qui concerne la robustesse se pose le problème des méthodes d'évaluation. Un outil comme l'aérotriangulation automatique reste un cas de figure simplifié par rapport aux techniques d'extraction d'information : le processus automa-

tique épouse ici en effet intégralement le fonctionnement (en terme de décomposition des tâches) du processus manuel qu'il se propose de remplacer. La corrélation automatique pour la production de MNT aurait pu poser plus de questions, dans la mesure où elle apportait un produit différent (d'un jeu de courbes de niveau — et pas seulement au niveau du format, mais aussi du contenu). Elle ne s'est imposée... qu'avec le temps et l'usage.

On peut craindre que les propositions de nouveaux outils de saisie semi-automatiques ne soient confrontés à la même situation et que les passages de la photogrammétrie expérimentale à la photogrammétrie opérationnelle ne soient possible qu'à un rythme assez lent.

**La fragilité des algorithmes de bas niveau** reste le principal facteur limitant de l'évolution des vidéorestituteurs. L'expérience d'HELAVA à la fin des années 80 est en ce sens encore significative de la situation actuelle. La recherche a largement progressé depuis, en particulier dans le domaine de la modélisation des objets, et des pas importants ont été franchis pour la résolution de problèmes restreints. Toute la communauté scientifique s'accorde toutefois, au vu de la variabilité des contextes naturels, pour admettre qu'il n'y aura pas de solution automatique à court terme, et qu'il faut donc se tourner vers des outils interactifs pour l'élaboration de solutions opérationnelles.

**L'intervention de l'opérateur** reste donc nécessaire. Elle n'apporte pourtant pas de panacée, en particulier parce qu'elle soulève des problèmes non triviaux d'évaluation des outils. L'introduction d'interventions d'un opérateur dans une chaîne de traitement automatique ne peut être faite indépendamment de celle-ci, et conduit donc, sauf rare exception, à une refonte de l'interface. S'il est déjà délicat de comparer des processus différents dans un contexte opérationnel défini (i.e. chez un utilisateur donné), l'évaluation de nouveaux processus indépendamment d'une application précise (i.e. dans le contexte du constructeur de systèmes, qui veut satisfaire l'ensemble de sa clientèle) pose de beaucoup plus sérieuses difficultés.

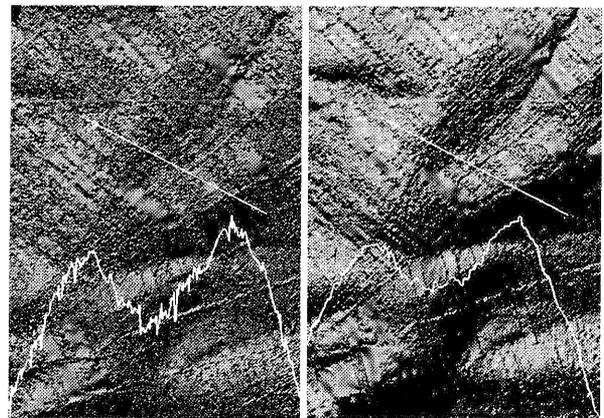
**La généricité des outils** ne peut pour l'instant que rester un objectif à long terme. En dépit des progrès effectués en terme de modélisation, force est de constater que les seuls résultats concrets disponibles ont été obtenus dans des cadres relativement restreints. Même lorsque des modèles plutôt génériques sont utilisés, comme dans le cas de l'extraction du réseau routier, l'application se limite à une gamme d'échelles de prise de vue comme de type d'objets (e.g. Airault and Jamet,

1995). Ceci peut conduire à faire porter le poids des investissements de recherche-développement aux utilisateurs, et donc à limiter les nouveaux outils aux besoins des gros producteurs, qui sont rarement les plus mobiles pour ce qui concerne la définition de nouveaux produits.

### 3. DES SOLUTIONS ET DES ENJEUX

La fragilité des outils de bas niveau est un obstacle à l'utilisation industrielle des techniques de reconnaissance de forme. Il ne faut pourtant pas attendre de progrès notables dans les améliorations purement algorithmiques de ces outils.

On prend l'exemple d'une technique aussi "simple" et bien établie que la corrélation automatique. La figure 1 illustre le résultat de calculs de Modèle Numérique de Terrain (représentés ici en estompage) par le corrélateur ATE d'Helava, sur le même couple de photographies aériennes numérisé d'une part avec le scanner PS1 de ZEISS/INTERGRAPH et d'autre part avec le scanner DSW 200 d'Helava.



**Figure 1** : MNT calculés par corrélation avec le logiciel ATE d'Helava.. *A gauche*, MNT calculé sur images scannées sur DSW 200 (Helava). *A droite*, MNT calculé sur images scannées sur PS1 (Zeiss/Intergraph). *En blanc*, deux coupes du terrain suivant la même section (portée sur la figure).

Cette exemple montre la sensibilité d'un processus, qui pourtant comprend des contrôles de cohérence interne (sur la pente locale du terrain extrait, par exemple), à la qualité des images. Dans le domaine de la reconnaissance d'objets, les outils de segmentation (détecteurs de discontinuités comme opérateurs de croissance de régions) montreront une sensibilité encore plus grande ; et la robustesse des méthodes proposées est donc à rechercher dans un contrôle à plus haut niveau du résultat.

On peut distinguer quatre pistes principales dans cette recherche de robustesse — même si cette

séparation reste théorique, nombre de démarches les exploitant toutes simultanément. La première consiste à se placer dans un contexte interactif, et à confier à l'opérateur à la fois des tâches d'initialisation "stratégiques" et un contrôle ultime du résultat (e.g. Airault and Jamet, 1995). La seconde vise à exploiter les redondances internes de la scène, en les exprimant soit sous la forme de contraintes, soit sous la forme d'un modèle à optimiser. Un exemple simple de cette démarche est donné par les techniques de corrélation automatique en terrain naturel (la contrainte interne étant généralement formulée comme une borne à la pente). L'exemple précédent montre les limites de l'efficacité de cette contrainte (les deux reliefs calculés présentent, outre une différence importante de rugosité, des écarts de plusieurs mètres sur les extrema du terrain). La troisième repose sur la mise en concurrence des résultats de plusieurs algorithmes. Les méthodes employées peuvent rester procédurales (e.g. compétition entre plusieurs corrélations amorcées aléatoirement pour la restitution des bâtiments : Kim et Muller, 1995), mais relèvent souvent de techniques plus élaborées mariant concurrence, coopération et contraintes, au sein de systèmes à base de connaissance (McKeown et al., 1985; Clément et al., 1993). La troisième s'appuie sur une redondance des données exploitées, et peut être induite par l'application visée (accumulation d'images dans une application de surveillance — on pourrait citer ici nombre de recherches effectuées dans le cadre de financements ARPA) ou constituer un choix délibéré de méthode de production (e.g. Gabet et al., 1995).

Nous n'aborderons pas ici les problèmes relatifs à la modélisation des objets cherchés, ni aux méthodes de coopération d'algorithmes. Ces questions font aujourd'hui l'objet de recherches actives (dont la section précédente a tenté d'esquisser la diversité), mais ne sont pas pour l'instant arrivées à un stade opérationnel en mode automatique. Les paragraphes qui suivent seront consacrés aux deux autres voies (redondance des données et interactivité). L'apport de la redondance des données est discuté sur la base d'un exemple, en termes économiques et du point de vue du producteur de données (i.e. de l'utilisateur d'outils photogrammétriques). L'interactivité est ensuite abordée, en soulignant les problèmes liés à l'évaluation des gains de productivité.

### 3.1. Redondance des données

Gabet et al. (1995) ont récemment proposé, en collaboration avec la société ISTAR (France) une méthode de restitution des bâtiments fondée sur un

processus de corrélation automatique fortement redondant.

Sur une zone test du centre de Marseille, une série de photographies à l'échelle du 1:8000 a été acquise avec un recouvrement longitudinal de 87%. Ce recouvrement permet de couvrir tout point de la zone de travail par 6 couples de photographies avec un rapport base sur hauteur (B/H) faible (inférieur à 0.5). Sur chacun de ces 6 couple, 3 algorithmes de corrélation automatique à fenêtre de taille fixe sont mis en oeuvre : un algorithme de corrélation standard, un algorithme contraint (contrainte d'ordre), et un algorithme fondé sur la recherche de surfaces planes optimales dans l'ensemble des hypothèses d'appariement de tous les points.

On obtient ainsi 18 MNT de précisions a priori différentes (les rapports B/H des couples n'étant pas les mêmes), qui sont utilisés pour la constitution du MNT filtré par une procédure de vote majoritaire.

Le MNT filtré est ensuite segmenté par croissance de région, afin de séparer les bâtiments du sol. On déduit de ce dernier résultat les contours planimétriques des îlots de bâtiments. Ces contours sont corrigés manuellement, puis un MNT final est calculé en affectant à chaque contour l'altitude médiane de la région qu'il délimite.

La méthode a été testée sur une zone d'un kilomètre carré. Le taux de bâtiment à corriger est d'environ 30%. La précision planimétrique est estimée à 40 cm (écart moyen quadratique). La société ISTAR commercialise aujourd'hui des MNT urbains calculés par cette méthode.

**Une comparaison de ce processus avec le processus de saisie de la BDTopo®** mis en oeuvre actuellement à l'IGN-F nous a paru intéressante.

La BDTopo® contient, en milieu urbain, une description du bâti assez proche du résultat obtenu par la méthode précédente. Seuls y sont représentés les îlots, par leur contour en 3 dimensions. Leur précision planimétrique est a priori moindre (un mètre d'écart moyen quadratique sur les angles de bâtiment), mais leur description altimétrique est plus fine (localisation en Z avec une précision d'un mètre — ce que le procédé de Gabet et al. ne garantit pas —, et description des décrochements d'altitude à l'intérieur des îlots).

La BDTopo® est saisie par voie photogrammétrique classique (sur appareils de restitution analytique ou numérique), à partir de prises de vue à l'échelle du 1:20000 en ville (1:30000 en zone rurale).

En admettant les deux processus comparables au niveau de l'intérêt économique des données produites, une entreprise souhaitant mettre en place une chaîne de production de MNT en milieu urbain aurait le choix entre :

- un processus de restitution classique ;
- et un processus à base de corrélation automatique, demandant moins de temps opérateur, mais plus d'images.

Le graphique de la figure 2 propose une comparaison économique de ces deux processus en évaluant le coût interne (sans prise en compte des frais généraux de l'entreprise) de production par kilomètre carré suivant les deux méthodes, que nous appellerons respectivement manuelle et automatique.

Cette évaluation est établie sous les hypothèses suivantes :

- le marché n'est limité que par la capacité de production de l'entreprise ;
- l'entreprise emploie 10 opérateurs de restitution à un coût horaire d'un peu plus de 20 EURO (coût interne) ;
- le temps moyen de restitution manuelle est, sur l'ensemble des chantiers urbains, de 7 heures-opérateur par kilomètre carré ;
- le temps de correction, dans le cadre de la méthode automatique, est de l'ordre de 50% du temps de saisie manuel (temps de vérification et temps de saisie complémentaire compris — le temps de saisie complémentaire sur un bâtiment est supposé égal au temps de saisie initiale du même bâtiment) ;
- les deux méthodes utilisent des images numériques ;
- le coût de numérisation est calculé en fonction du nombre de photographies utilisées dans l'année ; pour l'hypothèse manuelle, l'entreprise consomme peu de cliché et sous traite la numérisation pour 42 EURO par photographie ; pour l'hypothèse automatique, l'entreprise achète son propre scanner, et numérise à un coût minimal de 26 EURO par cliché.

Sous ces hypothèses, la méthode automatique permet de produire un peu plus de 3000 km<sup>2</sup> par an de MNT urbains et se montre plus économique que la méthode manuelle (pour le temps moyen de saisie de 7 heures/km<sup>2</sup>). La différence entre les deux processus n'est toutefois pas très grande, et le processus manuel reprend de l'intérêt pour les charges de restitution inférieures à 6 heures/km<sup>2</sup>. Dans le cas de la ville de Marseille, le rendement de restitution, lors de la saisie de la BDTopo®, était de l'ordre de 9h/km<sup>2</sup>. Sur ce type de chantier, l'écart entre les coûts évalués est important. Par contre, sur une ville comme Lyon,

nous avons observé des rendements de l'ordre de 5 heures et demi par km<sup>2</sup>. La saisie manuelle reste dans ces cas là plus rentable.

Le graphique complète cette comparaison en proposant deux évaluations complémentaires. On suppose que l'utilisation de 3 images supplémentaires par point permet de faire diminuer le taux de correction de 10 points. Cette hypothèse est largement optimiste (cela signifie diminuer le nombre d'erreurs de 33% !), mais permet d'imaginer une mise en concurrence entre les gains de productivité apportés par la redondance des données, et les coûts supplémentaires qu'elle occasionne.

La méthode de Gabet et al. demande la numérisation de 7 images par point (contre 2 pour une restitution manuelle). Une configuration à 4 images par point correspondrait par exemple à une acquisition avec 60% de recouvrement longitudinal et latéral ; une configuration à 10 images par points, à une acquisition avec 80% de recouvrement longitudinal et 60% de recouvrement latéral.

La figure 2 montre que, sous les hypothèses effectuées, la méthode à 7 images par point est la plus intéressante : pour pouvoir augmenter la redondance avec profit, il faudrait qu'elle permette d'atteindre une diminution bien plus importante du nombre d'erreurs.

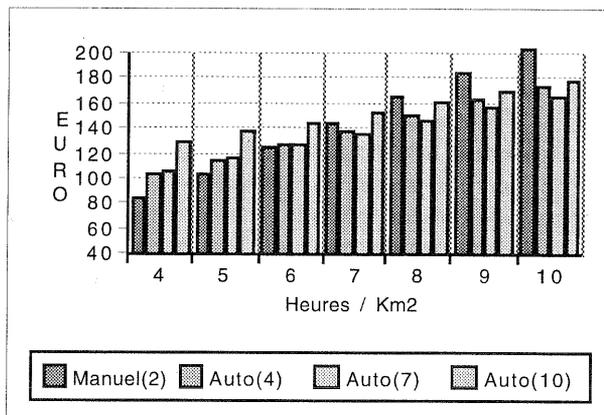


Figure 2 : évaluation fictive des coûts de production par kilomètre carré d'un MNT urbain.

*Manuel(2)* : restitution classique sur couple (2 images par point observé) ;

*Auto(x)* : méthode automatique utilisant x images par point. Auto(7) correspond à la méthode décrite par Gabet et al. (1995).

**Ces résultats sont bien entendu discutables** à plusieurs points de vue. Il est clair que cette comparaison ne tient pas lieu d'étude économique : les coûts réels d'exploitation devraient être évalués. D'un côté, l'estimation réelle des temps de correction ferait peut-être ressortir les avantages de la méthode automatique. Nous avons basé notre hypothèse sur le temps de mise à jour d'une feuille cartographique qui est actuellement

estimé à environ 50% du temps de saisie initiale (avec largement moins de 30% d'objets à corriger ou à rajouter), mais ce chiffre n'a pas encore été vérifié expérimentalement. L'hypothèse de gain de temps faite pour la méthode automatique peut donc être sous-évaluée.

A l'opposé, nombre de facteurs n'ont pas été pris en compte. L'augmentation du nombre d'images manipulées est importante (d'un facteur presque 20). Même si le coût de stockage n'est plus aujourd'hui un facteur déterminant, la manipulation de très gros volumes de données (un chantier IGN-F représenterait 200 gigabytes) peut avoir des conséquences sur l'organisation du travail. Nous n'avons actuellement pas d'outil pour évaluer cet impact. La faible surface des images traitées peut également constituer un facteur de diminution de la productivité. Sous les hypothèses de temps de saisie effectuées, et compte tenu du changement d'échelle, un opérateur devrait changer de couple environ toutes les 4 heures. Même avec des procédures automatisées de préparation des données, le temps d'archivage du couple terminé et de chargement du nouveau couple peut être non négligeable devant le temps de saisie.

Sur un autre plan, en admettant que les gains de productivité soient démontrés, il n'en reste pas moins que les produits de la saisie automatique et de la saisie manuelle ne sont pas les mêmes (en particulier au niveau de la représentation en Z). En ce sens, la méthode de Gabet et al. ne réponds pas à une demande d'automatisation d'un processus existant, avec ses spécifications de produit, mais propose un nouveau produit — à moindre coût. Ce type de solution aura donc du mal à convenir aux gros producteurs, dont la réactivité à l'évolution des produits est faible.

### 3.2. Interactivité

La mise au point d'outils semi-automatiques peut être vue comme la recherche du meilleur équilibre entre la complexité de l'interface opérateur (facteur de perte de productivité) et la robustesse des méthodes employées (facteur de gain de productivité). Schématiquement (figure 3), plus le processus automatique est simple, plus son temps de mise en oeuvre est court (temps de saisie faible), mais plus le temps de reprise sur erreur est élevé (temps de correction). Inversement, on peut rendre le processus automatique plus robuste au prix d'une augmentation de l'interaction (entrée de paramètres, saisie d'amorces complexes, choix de modèle, etc...).

On peut donner plusieurs exemples à ce type de démarche. L'utilisation du corrélateur ATE est

contrôlée par 3 modèles de terrain (terrain plat, terrain vallonné et terrain montagneux), qui correspondent à des jeux de paramètres de contrôle de l'algorithme. L'ajustement individuel de chaque paramètre conduirait probablement à de meilleurs résultats, mais demanderait un temps opérateur prohibitif. De même, dans les méthodes de restitution des bâtiments, l'emploi de modèles génériques permet la mise en oeuvre de méthodes entièrement automatiques (Dissard and Jamet, 1995) au prix d'un taux d'erreurs trop élevé pour une utilisation opérationnelle de la méthode, tandis qu'une méthode à base de modèles paramétriques, plus robuste, (e.g. Weidner and Förstner, 1995) ne sera rentable que si l'on impose pas à l'opérateur de choisir interactivement entre un nombre trop important de modèles.

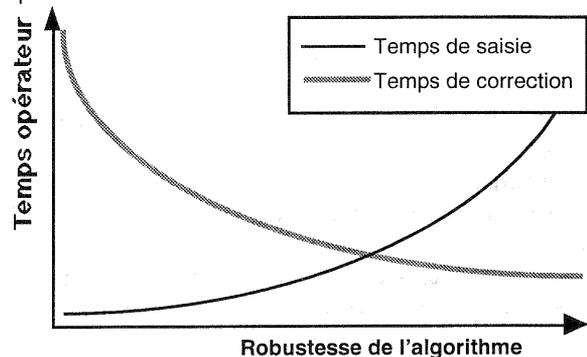


Figure 3 : La mise au point d'un processus semi-automatique est un compromis entre la complexité de l'interface (temps de saisie initiale) et le taux d'erreur admis (temps de correction).

L'IGN-F est actuellement en train d'évaluer deux approches semi-automatiques, concernant la restitution des courbes de niveau et la saisie du réseau routier sur photographies à moyenne échelle (résolution au sol de 40 à 60 cm). Cette expérience met en évidence plusieurs difficultés dans l'estimation des gains de productivité réels apportés par les méthodes proposées.

**Le choix de sites de tests représentatifs** constitue le premier problème. Lors des évaluations des méthodes de corrélation automatique pour la production de courbes de niveau, conduites par A.Duperet (IGN-F), une dizaine de couples ont été sélectionnés pour assurer un échantillonnage minimal des paysages possibles (terrain plat, vallonné, montagneux ; variations dans la densité du couvert végétal ...). S'agissant de comparer les performances de plusieurs algorithmes de corrélation et de post traitement (élimination du sursol, lissage, corrections interactives), le coût d'une telle expérience s'avère élevé, et les délais de réalisation importants (la mise en oeuvre de l'ensemble des tests s'est étalée sur neuf mois). Pour autant, sa représentativité reste assez faible. Dix couples

de photographies représentent 0,05% de la surface du territoire. Compte tenu de la variabilité des paysages, cet échantillon ne peut être considéré comme statistiquement suffisant. Les expériences conduites ne sont exploitables que si elles confirment un modèle de comportement théorique des algorithmes utilisés. Dans le cas présent, nous avons vérifié que l'exactitude des MNT produits était suffisante dans tous les cas, en l'absence de végétation — conformément à l'attente que la couverture forestière constitue l'obstacle majeur à l'utilisation de la corrélation. Dans un cas aussi simple, on peut oser une extrapolation à l'ensemble du territoire, sur la base d'information sur les surfaces boisées. Il reste toutefois difficile d'annoncer un intervalle de confiance sur les gains de productivité moyens ainsi estimés.

L'évaluation des outils d'aide à l'extraction du réseau routier en cours actuellement à l'IGN-F posera probablement plus de problèmes. Si les conditions générales de fonctionnement de l'algorithme choisi sont assez bien modélisées (chaussées dépourvues de marquage au sol, absence d'éléments masquant le réseau sur les images), les données statistiques nationales les concernant ne sont pas toutes disponibles.

**L'influence de l'opérateur** est le second facteur important de variabilité des résultats d'évaluation des méthodes semi-automatiques. Il est notoire que le temps de saisie d'une même quantité de données peut varier — en mode manuel — du simple au double suivant les opérateurs. Cette observation a été faite par Hsieh (Hsieh, 1995) lors de la comparaison entre deux méthodes de saisie de modèles tridimensionnels de bâtiments dans l'environnement SIMCITY. Hsieh conduit une expérience avec 12 sujets et constate que selon le site saisi, les images traitées, et les individus, la méthode semi-automatique proposée peut se révéler plus ou moins productive que la méthode manuelle (même si elle reste en moyenne plus efficace).

De même que pour le choix des sites de test, la détermination d'un ensemble représentatif d'opérateurs est mal maîtrisée, et les contraintes de coûts et de délai conduisent à opter pour des solutions empiriques (expérimentation avec quelques opérateurs soigneusement choisis).

Le facteur humain est également sensible pour ce qui concerne la maîtrise des outils à évaluer. Lorsqu'on propose une nouvelle technique de production, les données qui font référence portent sur l'efficacité des chaînes de production existantes, pour lesquelles les opérateurs sont formés de longue date. Un nouvel environnement de travail sera généralement moins efficace dans les

premiers temps d'utilisation pour cette seule raison.

Hsieh insiste sur ces difficultés et préconise la comparaison de saisies identiques (quant aux données produites) effectuées deux fois par le même opérateur — une fois par la méthode de référence, et une fois par la méthode à évaluer.

Le protocole expérimental qu'il propose est intéressant à ce titre. Effectuant son évaluation sur deux sites, Hsieh divise les 12 opérateurs sujets de l'expérience en quatre groupes, chaque groupe étant caractérisé par un ordre de traitement des sites (site A puis B ou l'inverse), et un ordre d'utilisation des méthodes de saisie (manuel puis semi-automatique, ou l'inverse). Ceci permet de compléter les évaluations de temps de saisie moyen par des mesures du gain de productivité entre la première et la deuxième saisie de chaque site, ce gain de productivité traduisant simultanément les gains éventuels dus à l'outil de saisie (manuel ou semi-automatique), l'apprentissage de la plate-forme (la plate-forme de saisie manuelle est la même que la plate-forme de saisie semi-automatique), et l'apprentissage du site (un opérateur travaille généralement plus vite lors de la seconde saisie). Les observations croisées de toutes les configurations permettent de mettre en évidence l'effet réel de l'outil semi-automatique.

Dans un environnement opérationnel, de telles précautions opératoires ne sont toutefois par toujours possibles, par exemple lorsque l'évaluation porte sur la comparaison de deux plates-formes de travail différentes (l'introduction d'une technique d'automatisation pouvant conduire à réorganiser la chaîne de production). C'est en particulier le cas lorsqu'il faut comparer les techniques de restitution numérique (et les outils automatiques dont elles bénéficient aujourd'hui) aux techniques de restitution analytiques. La prise en compte du facteur d'apprentissage de l'outil de travail ne peut alors être faite que par un facteur correctif empirique sur la productivité atteinte sur le nouveau matériel (pouvant conduire à une réévaluation de l'ordre de 10 à 20%).

**La plate-forme de saisie** joue donc aussi un rôle central dans l'évaluation des méthodes de saisie interactive. Hsieh préconise une comparaison entre saisie manuelle et saisie semi-automatique dans le même environnement de travail, la saisie manuelle étant effectuée en désactivant les fonctions semi-automatiques du logiciel. C'est également la méthodologie qui a été suivie par Airault (Airault and Jamet, 1995) pour l'évaluation d'une méthode de restitution semi-automatique du réseau routier.

Si ces expériences mettent en évidence l'intérêt potentiel des méthodes automatiques, l'implantation dans une application de saisie industrielle pose toutefois deux questions. La première concerne l'incidence de l'introduction d'une assistance semi-automatique sur le choix du matériel de saisie. La plupart des vidéorestituteurs fournissent par exemple aujourd'hui une assistance à la saisie du Z, par asservissement du ballonnet à un MNT calculé par corrélation des images du couple traité. Cette fonctionnalité n'a pas, à notre connaissance, prouvé son efficacité (en terme de gain de productivité). Par contre, elle pourrait permettre la saisie de certaines classes d'objets sur des stations de travail monoscopiques, et réduire ainsi les besoins des utilisateurs en équipement. L'évaluation de l'intérêt industriel d'une telle fonctionnalité met ainsi en jeu des paramètres hors d'atteinte de l'évaluation de laboratoire : l'adéquation de l'outil à un besoin de production dépendra d'un intérêt économique dont l'estimation devra prendre en compte des données spécifiques à l'entreprise utilisatrice (choix des durées d'amortissement du matériel, entre autres).

La seconde question porte sur l'incidence de la définition du produit conçu par l'utilisateur sur l'efficacité réelle des méthodes d'assistance à la saisie. Les recherches sur l'extraction semi-automatique d'objet se concentrent sur la saisie de la géométrie 3D de certaines classes d'objets. Dans un environnement opérationnel, cette saisie est souvent accompagnée de l'enregistrement de nombreuses informations annexes (attributs d'objets, relations, etc...) pour la constitution de données géographiques structurées destinées à l'utilisation au sein de Systèmes d'Information Géographique (SIG).

L'interaction de l'opérateur dans l'environnement opérationnel ne pourra donc pas toujours être organisée aussi efficacement (vis à vis de la saisie de la géométrie) qu'en laboratoire — et l'intérêt d'une méthode semi-automatique devra généralement être réévalué sur un prototype présentant l'ensemble des fonctionnalités souhaitées. Ajoutons à cela que les tâches de saisie d'informations annexes (non géométriques) représentent une part non négligeable de la saisie, et que dans tous les cas, les mesures de gain de productivité s'en ressentiront.

**L'étape d'intégration dans les chaînes de production existantes** peut également faire obstacle aux solutions proposées. Les possibilités ouvertes par une méthode de saisie semi-automatique quant au choix de l'organisation des tâches et du matériel de saisie n'auront pas la même incidence suivant le profil de l'utilisateur. Un producteur de données doté d'une petite structure aura

plus de facilités à réorganiser sa chaîne de production en fonction de nouveaux outils. Inversement, il aura généralement une capacité d'investissement moindre lorsqu'il s'agira de modifier les composants matériels de sa chaîne de production.

Cette phase d'intégration de nouvelles techniques dans une chaîne de production existante soulève par ailleurs pour le producteur de données plusieurs problèmes annexes, concernant l'organisation du flux de traitement (l'outil semi-automatique proposé interviendra-t-il préférentiellement sur une station de travail dédiée, en amont d'une restitution classique complémentaire, ou sera-t-il intégré sur chaque appareil de restitution ?), les coûts de formation associés (quelle est l'incidence réelle à moyen terme sur la formation des opérateurs ?), etc...

**De façon synthétique**, le problème de l'évaluation des méthodes interactives est une clef essentielle pour la progression des recherches, comme pour l'industrialisation des méthodes. Nous avons souligné ici, partant de notre expérience, les questions posées à l'utilisateur de techniques photogrammétriques lors de l'évaluation de nouvelles techniques de saisie interactive. Cette réflexion peut conduire à une meilleure compréhension du rôle des différents acteurs de l'évolution technologique que sont les laboratoires de recherche, qui mettent au point de nouveaux outils, les industriels fabriquant les vidéorestituteurs, et les utilisateurs (ou producteurs de données).

Au niveau des laboratoires de recherche, une formalisation des méthodes d'évaluation est souhaitable. Les questions soulevées ici montrent le risque industriel que représente l'investissement dans le développement d'outils semi-automatiques : s'il doit être pris en charge par le fabricant de vidéorestituteurs, il ne le sera que moyennant des garanties minimales sur ses potentialités à satisfaire un besoin pour une communauté suffisamment large d'utilisateurs. On ne peut que souhaiter l'établissement, par la communauté scientifique, de protocoles de tests à l'image de celui proposé par Hsieh à l'Université de Carnegie Mellone (Hsieh, 1995), incluant en outre des bases d'images et de données vecteurs de référence couvrant des applications génériques. Cet effort, déjà entrepris au sein de la SIPT par la distribution de lots de données, doit progresser.

Pour ce qui concerne les producteurs de données, il est clair qu'in fine, ils seront confrontés à l'évaluation des outils pour leur besoins propres, et en fonction de leur contexte de production précis. Ces évaluations doivent être conduites en lien avec les industriels, comme avec la recherche.

Leur intervention serait toutefois souhaitable plus en amont. D'une part, ils devraient contribuer à la définition d'applications génériques couvrant les besoins du marché à moyen terme. D'autre part, on peut attendre qu'ils mettent à la disposition de la communauté scientifique les données nécessaires à l'expérimentation amont.

Enfin, ces réflexions montrent les lacunes actuelles des stations de travail pour les tâches de prototypage. L'étude conduite par Hsieh met en évidence l'intérêt de mesures précises concernant l'activité de l'opérateur lors de l'évaluation de méthodes semi-automatiques. Nous avons discuté par ailleurs l'incidence que pouvaient avoir les tâches de saisie annexes sur l'estimation des gains de productivité. La recherche, comme les utilisateurs, manque de moyens de mesure, et de données historiques, concernant ces questions. On peut attendre des industriels qu'ils fassent progresser les environnements de prototypage, comprenant les outils nécessaires pour l'enregistrement et l'exploitation statistique des temps-opérateurs sur les différentes phases de saisie.

#### 4. CONCLUSION

Nous sommes confiants dans le potentiel d'évolution des vidéorestituteurs pour ce qui concerne l'automatisation des tâches de saisie, et c'est d'ailleurs une des raisons majeures qui ont poussé l'IGN à investir dans ce type de matériel. Les outils proposés dès aujourd'hui par les constructeurs pour la production de MNT, d'orthophotos, ou pour l'aérotriangulation ouvrent en quelque sorte la voie — au moins dans le sens où ils doivent permettre un élargissement de la communauté des utilisateurs, qui en tireront un profit immédiat. Cette diffusion plus grande des stations de travail photogrammétrique garantit une poursuite des efforts d'investissement pour l'évolution du matériel.

Si les efforts de recherche à long terme pour l'automatisation de la saisie doivent être poursuivis, la communauté scientifique est convaincue que les solutions à court ou à moyen terme intégreront nécessairement l'intervention de l'opérateur. Cette prise de conscience conduit de plus en plus de laboratoires à prendre en compte cette dimension dans la conception même des méthodes étudiées, et les résultats publiés se montrent encourageants.

Le facteur qui nous paraît aujourd'hui déterminant pour le succès des recherches en cours est celui de l'évaluation des méthodes interactives — tant au niveau de la recherche, pour une communication claire des performances aux constructeurs susceptibles d'intégrer les nouveaux algorithmes

sur les plates-formes opérationnelles — qu'au niveau de la production de données, pour la mise en évidence des gains de productivité potentiels dans un contexte d'utilisation bien précis. La définition de standards d'évaluation pourrait également contribuer à la progression même des recherches, en facilitant les comparaisons de méthodes entre laboratoires. Cet effort demandera la contribution des scientifiques, des constructeurs et des utilisateurs.

Dans le même ordre d'idée, le second point qui nous paraît important concerne la disponibilité de données sur les méthodes de saisie actuelles. Ce besoin concerne plus directement les utilisateurs, qui souhaitent comparer les systèmes en terme de productivité. Cette comparaison restera très lourde à mettre en oeuvre, et surtout peu fiable, tant qu'une décomposition des tâches de saisie, assortie d'une évaluation de leur coût, ne sera pas accessible. Là encore, chercheurs et constructeurs peuvent également intervenir, les uns au niveau des choix méthodologiques, et les autres pour l'implantation des outils nécessaires sur les stations de travail photogrammétriques.

Les facteurs d'évolution ne sont toutefois pas uniquement là. Nous n'en citerons que deux qui vont dans le sens des remarques effectuées dans cet article. Le premier est la "démocratisation" des stations de travail numériques. Nous ne pouvons que plaider en faveur d'une diminution des coûts des équipements (qui ferait le contraire dans notre position!) : si les gains de productivité déjà offerts par les vidéorestituteurs peuvent séduire les opérateurs actuels de la photogrammétrie, la baisse sensible des coûts d'investissement peut être la clef de l'ouverture à des marchés nouveaux et à l'intervention plus grande de petits opérateurs. Cette diversification va dans le sens d'une plus grande évolutivité des produits, et pourra assurer le succès de techniques automatiques qui ne répondraient pas aux spécifications de la cartographie classique (comme dans l'exemple du paragraphe 3.1).

Le second porte sur le coût des données images. L'avènement de satellites à haute résolution (submétrique) changera fondamentalement les données du problème du compromis entre les gains de productivité et les coûts d'acquisition. Sans attendre cette échéance (qui n'a aujourd'hui rien de certain), le développement de capteurs numériques aéroportés aura, par le biais d'un accroissement possible, à moindre coût, de la fiabilité des processus automatiques, un impact déterminant sur le coût de production des données photogrammétriques.

## Références

- Ackermann, F., et Krzystek, P., 1991. MATCH-T : Automatic mensuration of digital elevation models. Dans Proc. Sistemas Fotogramétricos Analíticos y Digitales : Una nueva generación emergente, Barcelona, p.67-74.
- Airault, S., et Jamet, O., 1995. Evaluation of the operationality of a semi-automatic road network capture process. Dans Proc. Conf. on Digital Photogrammetry and Remote Sensing'95, Saint-Petersburg, SPIE Proceedings Series, Vol. 2646, p.180-191.
- Bejanin, M., Huertas, A., Medioni, G., et Nevatia, R., 1994. Model Validation for Change Detection. ARPA Image Understanding Workshop. Monterey, California, 13-16 nov.
- Braun, C., Kolbe, T. H., Lang, F., Schickler, W., Steinhage, V., Cremers, A. B., Förstner, W., et Plumer, L., 1995. Models for photogrammetric building reconstruction. Computer and Graphics, 19 (1), p.109-118.
- Clément, V., Giraudon, G., Houzelle, S., et Sandalky, F., 1993. Interpretation of Remotely Sensed Images in a Context of Multisensor Fusion Using a Multispecialist Architecture. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 31 (4), p.779-791.
- Dissard, O., et Jamet, O., 1995. 3D reconstruction of buildings from stereo images using both monocular analysis and stereo matching : an assessment within the context of cartographic production. Dans Proc. Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision, Orlando, Florida, SPIE Proceedings Series, Vol. 2486, p.255-266.
- Gabet, L., Giraudon, G., et Renouard, L., 1995. Construction automatique de modèle numérique de terrain à haute résolution en zone urbaine. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 135 (3), p.9-25.
- Grün, A., Agouris, P., et Li, H., 1995. Linear feature extraction with dynamic programming and globally enforced least square matching. Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, p.83-94.
- Heipke, C., 1996. Overview of image matching techniques. OEEPE Workshop on the Application of Digital Photogrammetric Workstations. Lausanne, Suisse, 4-6 mars.
- Hobrough, G. L., 1959. Automatic stereo plotting. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 25 (5), p.763-769.
- Hsieh, Y., 1995. Design and evaluation of a semi-automated site modeling system. Technical Report CMU-CS-995-195, Carnegie Mellone University, Carnegie Mellone.
- Kim, T., et Muller, J.-P., 1995. Automated building height estimation and object extraction from multi-resolution imagery. Dans Proc. Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision, Orlando, Florida, SPIE Proceedings Series, Vol. 2486, p.267-276.
- Kölbl, O., 1996. An overview on commercial software products for digital aerial triangulation. OEEPE Workshop on the Application of Digital Photogrammetric Workstations. Lausanne, Suisse, 4-6 mars.
- Kreiling, W., 1976. Automatische Erstellung von Höhenmodellen und Orthophotos durch digitale Korrelation. Dissertation, I. f. Photogrammetrie, Universität Karlsruhe.
- Krystek, P., 1991. Fully automatic measurement of digital elevation models with MATCH\_T. Dans Proc. 43rd Photogrammetric Week, Stuttgart, p.203-214.
- Lin, C., Huertas, A., et Nevatia, R., 1995. Detection of Buildings from Monocular Images. Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, p.125-134.
- Marr, D., et Poggio, T., 1977. Cooperative computation of stereo disparity. Science, 195 p.283-287.
- McGlone, C., 1995. Some Considerations in 3D Object Modeling. ISPRS Joint workshop on the Role of Models in Automated Scene Analysis. Stockholm, Sweden, aug.30-sept.1.
- McKeown, D. M., Jr., Harvey, W. A., et McDermott, J., 1985. Rule based interpretation of aerial imagery. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 7 (5), p.570-585.
- Quint, F., et Sties, M., 1995. Map-based semantic modeling for the extraction of objects from aerial images. Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, p.307-316.
- Tang, L., et Heipke, C., 1996. Automatic relative orientation of aerial images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62 (1), p.47-55.
- Thom, C., et Jurvillier, I., 1994. Réalisation d'un prototype de caméra numérique. Bulletin d'Information de l'Institut Géographique National, 62 p.27-29.
- Weidner, U., et Förstner, W., 1995. Towards automatic building extraction from high-resolution digital elevation models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 50 (4), p.38-49.