4.7.0

Système d'information Rives naturelles du Lac de Neuchâtel

Prof. O.Kölbl,
J.-C. Pradervand, Ph. Voisin

Institut de Photogrammétrie
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)

---

0. Les méthodes de travail de la photogrammétrie
1. Documents souhaités
2. Utilité d'un système d'information
3. Le modèle numérique de terrain
4. Procédés de travail

0. Outils de travail de la photogrammétrie

1. Photo-interprétation
2. Utilisation d'agrandissements photographiques
3. Utilisation de films infrarouges fausses couleurs
4. Restitution photogrammétrique
5. Restitution photogrammétrique en connexion avec un système d'information

1. Documents pour la cartographie des rives naturelles

1. Photos couleurs, diapositives et agrandissements
2. Table d'identification des associations de plantes
3. Plan de détail des association de plantes 1:2'000
4. Plan de synthèse des associations de plantes 1:5'000
5. Plans 1:2'000 et 1:5'000 avec courbes de niveau (intervalle 10 cm ?)
6. Orthophotos noir/blanc à différentes échelles
7. Listages des parcelles par classes de végetation

2. Pourquoi un sytème d'information ?

1. Elaboration d'une topologie au lieu de simples traits
2. Calcul automatique des superficies des parcelles
3. Gestion de l'information qualitative (listages)
4. Facilité cartographique (élaboration de divers documents graphiques)
5. Facilités pour des requêtes
6. Outil pour des analyses et pour l'aide à la décision

3. Avantages d'un modèle numérique de terrain

1. Flexibilité de la présentation
   (Courbes de niveau, grille, cotes...)
2. Information altimétrique accessible à l'ordinateur
   (Combinaison de l'altimétrie avec les groupes de végétation, dérivation automatique des profils,...)
3. Seule technique possible pour terrains extrêmements plats

4. Technique de saisie d'un modèle numérique de terrain

1. Mesure d'une grille régulière sur restituteur photogrammétrique
2. Mesure des lignes de rupture et des lignes de structure
3. Définition de zones mortes

5. Résultats graphiques d'un modèle numérique de terrain

1. Plans avec courbes de niveau
2. Vues obliques
3. Cartes d'exposition
4. Divers moyens de visualisation
5. Profils

6. Déroulement des opérations photogrammétriques

1. Préparation du plan de vol
2. Signalisation
3. Prise de vues, 1:5'000, couleurs
4. Triangulation aérienne
5. Identification des photos
6. Restitution photogrammétrique et intégration des données dans un SIT
7. Elaboration des synthèses
8. Dessin automatique des plans et des cartes
8. Création des listages

7. Elaboration des orthophotos

1. Préparation du plan de vol
2. Signalisation
3. Prise de vues, 1:20'000, noir/blanc
4. Triangulation aérienne
5. Elaboration des orthophotos par Swissair-Photo ZH
6. Préparation des positifs tramés et des films de surcharge
7. Reproduction par hélio ou par procédés photographiques

PANORAMA DE LA PHOTOGRAMMETRIE MODERNE

Prises de vues de haute résolution, restitution en liaison avec des systèmes d'information, rôle du traitement numérique d'images et applications pratiques

O. Kölbl
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

1. Introduction

Depuis quelques années, la photogrammétrie a subi de profondes modifications. La restitution classique sur des appareils analogiques est progressivement remplacée par des procédés analytiques ou même numériques. L'objectif premier de la restitution photogrammétrique d'aujourd'hui n'est plus la production de cartes, mais l'intégration de données numériques dans des systèmes d'information dont on pourra aussi sortir des cartes. La triangulation aérienne moderne, en liaison avec les nouvelles techniques de géodésie spatiale, permet de densifier un canevas de manière beaucoup plus rationnelle qu'il y a quelques années seulement. Les méthodes de prises de vues ont aussi été sensiblement perfectionnées et l'on peut même espérer que les techniques d'imagerie électronique amélioreront encore et de façon déterminante la présentation cartographique.

Les développements en cours ouvrent des perspectives intéressantes en ce qui concerne l'amélioration de la qualité des images et leur traitement automatique, en particulier par la gestion des données dans des systèmes d'information. Ces développements, qui dépendent essentiellement des progrès en électronique, vont certainement entraîner des bouleversements importants - d'ailleurs déjà tangibles - dans l'industrie photogrammétrique classique.

La présentation de nouveautés techniques encore en développement est toujours liée au danger de surestimer certaines options sans évaluer correctement les contraintes et limites. Afin de réduire ce risque, l'auteur se base en bonne partie sur des expériences et recherches effectuées dans son Laboratoire à l'EPF-Lausanne. Certains aspects peuvent par conséquent paraître très subjectifs, mais les résultats présentés sont ainsi bien fondés.

2. Prises de vues et acquisition des données

2.1 Rendement des systèmes de prises de vues modernes

La qualité des prises de vues a été longtemps le résultat d'un compromis entre le pouvoir de résolution des films aériens et la luminosité des objectifs. Pour illustrer ce compromis, il convient d'analyser plus en détail le comportement physique d'une couche photographique. L'exposition d'un grain photographique nécessite un certain nombre de photons, indépendamment de la dimension du grain. Un film à grain grossier, avec un faible pouvoir de résolution, est très sensible et permet des temps d'exposition courts. Un film à grain fin, comme le Panatomic-X ou le High Definition de Kodak, nécessite beaucoup plus de lumière, donc un temps d'exposition plus long (fig. 1).

Article paru dans la revue *xyz* n° 41-42, octobre 1989, pp. 21-39

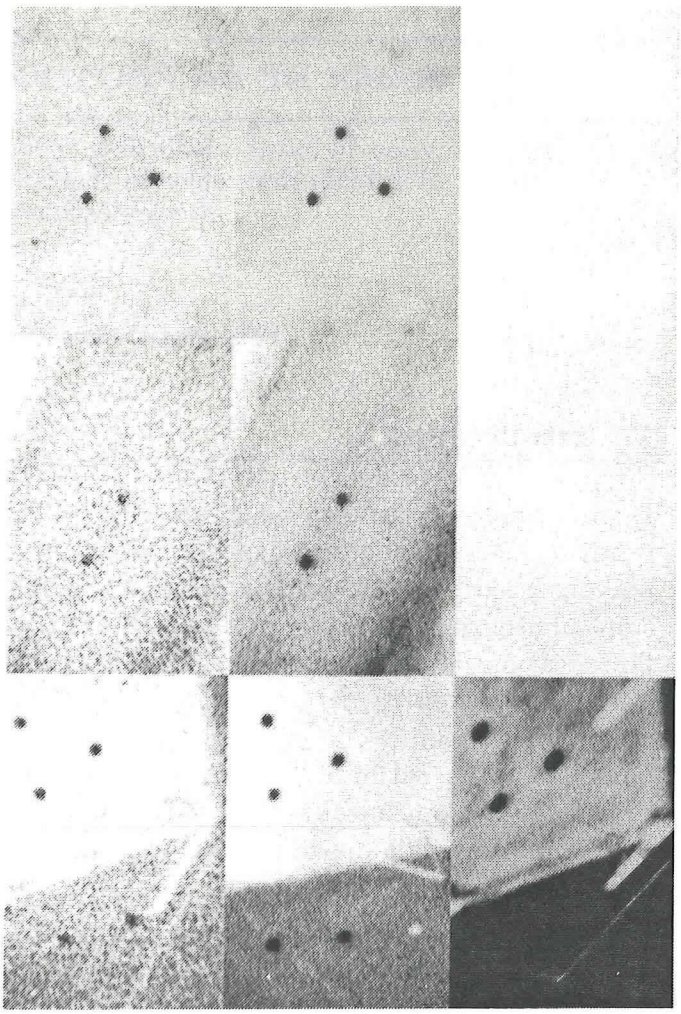

Fig. 1
Reproduction par 3 différents films Kodak de quelques points balisés : à gauche, film Double-X, au centre Panatomic-X puis High Definition. On remarque la granularité des films et, sur le film High Definition, le filé caractérisé par un allongement des signaux. Reproduction telle qu'elle apparaît sur le négatif.

Les fabricants de chambres aériennes se sont d'abord efforcés d'améliorer la luminosité des objectifs, mais un diaphragme de 1:4 semble représenter actuellement la limite des possibilités techniques. On a ensuite essayé de corriger le filé par un déplacement du film pendant la prise de vue, ce qui a permis d'augmenter le temps d'exposition jusqu'à 1/100 sec environ, du moins pour des prises de vues à haute altitude. Cependant, les turbulences atmosphériques à basse altitude (700-1500 m) ne permettent pas de profiter vraiment de la compensation du filé pour les prises de vues à grande échelle. Tout récemment, Carl Zeiss Oberkochen a présenté une chambre aérienne comportant un système inertiel pour la compensation des basculements, qui autorise l'utilisation de films à haute résolution même pour des vols à basse altitude. Il reste à déterminer dans quelle mesure les solutions trouvées n'ont pas pour seul effet de nous ramener au problème de départ, c'est-à-dire la qualité des objectifs et les limites dues à la diffraction. On peut mentionner ici des investigations effectuées au Laboratoire de photogrammétrie, au cours desquelles 3 chambres de prises de vues aériennes ont été comparées et leurs fonctions de transfert déterminées sous des conditions de vol [1]. Le tableau 1 récapitule les objectifs testés, et la fig. 2 présente les fonctions de transfert de ces objectifs et du film Kodak Panatomic-X. Pour une meilleure compréhension des courbes de transfert, une série de micro-photos de quelques points signalisés illustre la différence de qualité entre ces objectifs. Il s'avère ainsi que, selon le type d'objectif utilisé, des signaux de 7 cm sur le terrain sont visibles sur des clichés à l'échelle 1:3'000. Une augmentation de la qualité des objectifs devrait par

conséquent être particulièrement intéressante lors de travaux à grande échelle et pour des applications cadastrales, le balisage des points étant dans ce dernier cas un facteur déterminant pour la rentabilité de la photogrammétrie.

Les essais mentionnés ont eu lieu en 1984; depuis lors, Carl Zeiss Oberkochen a annoncé un objectif grand-angulaire avec une meilleure définition d'image, ce qui prouve que les chambres de prises de vues aériennes sont encore en plein développement [2].

	Firme		
	Zeiss Jena	Wild	Zeiss Oberkochen
Chambre de prise de vues	LMK	RC10A	RMK A2
Objectif	Lamegon Pl 4.5/150c Nr. 244679A	Universal Aviogon 15/4 UAGA Nr. 13033 (prototype)	Pleogon A2 4/153 Nr. 127782
Ouverture maximum de l'objectif	1:4,5	1:4	1:4
Valeur effectivement utilisée	1:5,6	1:4	1:4

Tableau 1

Caractéristiques des chambres de prises de vues utilisées pour le test comparatif.

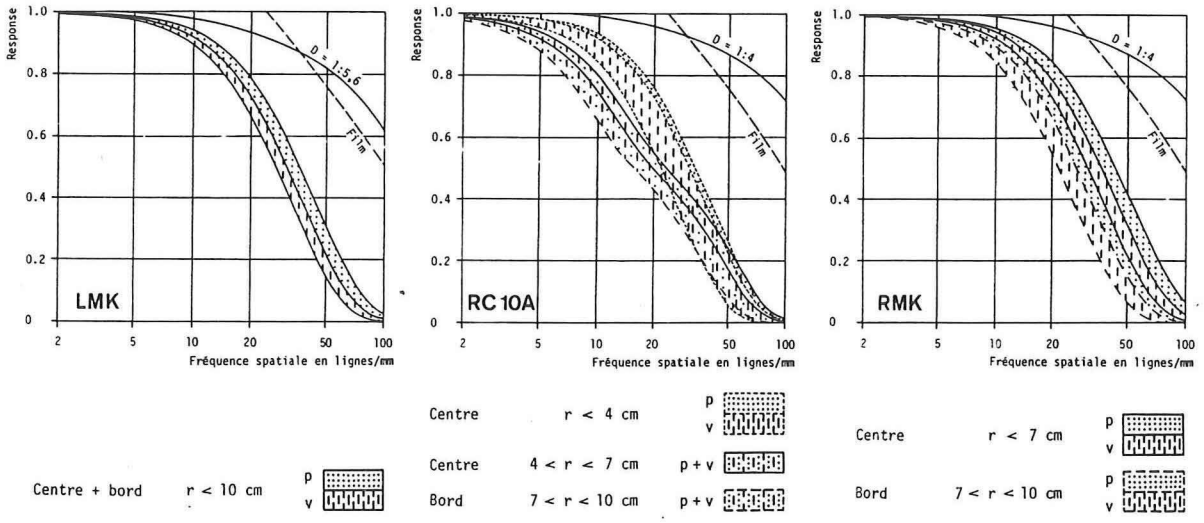

Fig. 2

Fonctions de transfert des différentes chambres de prises de vues aériennes, obtenues sous des conditions de vol, avec le film Panatomic-X. Les courbes donnent ces fonctions dans la direction du vol (v) et perpendiculairement à cette direction (p). Les valeurs limites des fonctions pour les ouvertures utilisées (D) sont également représentées.

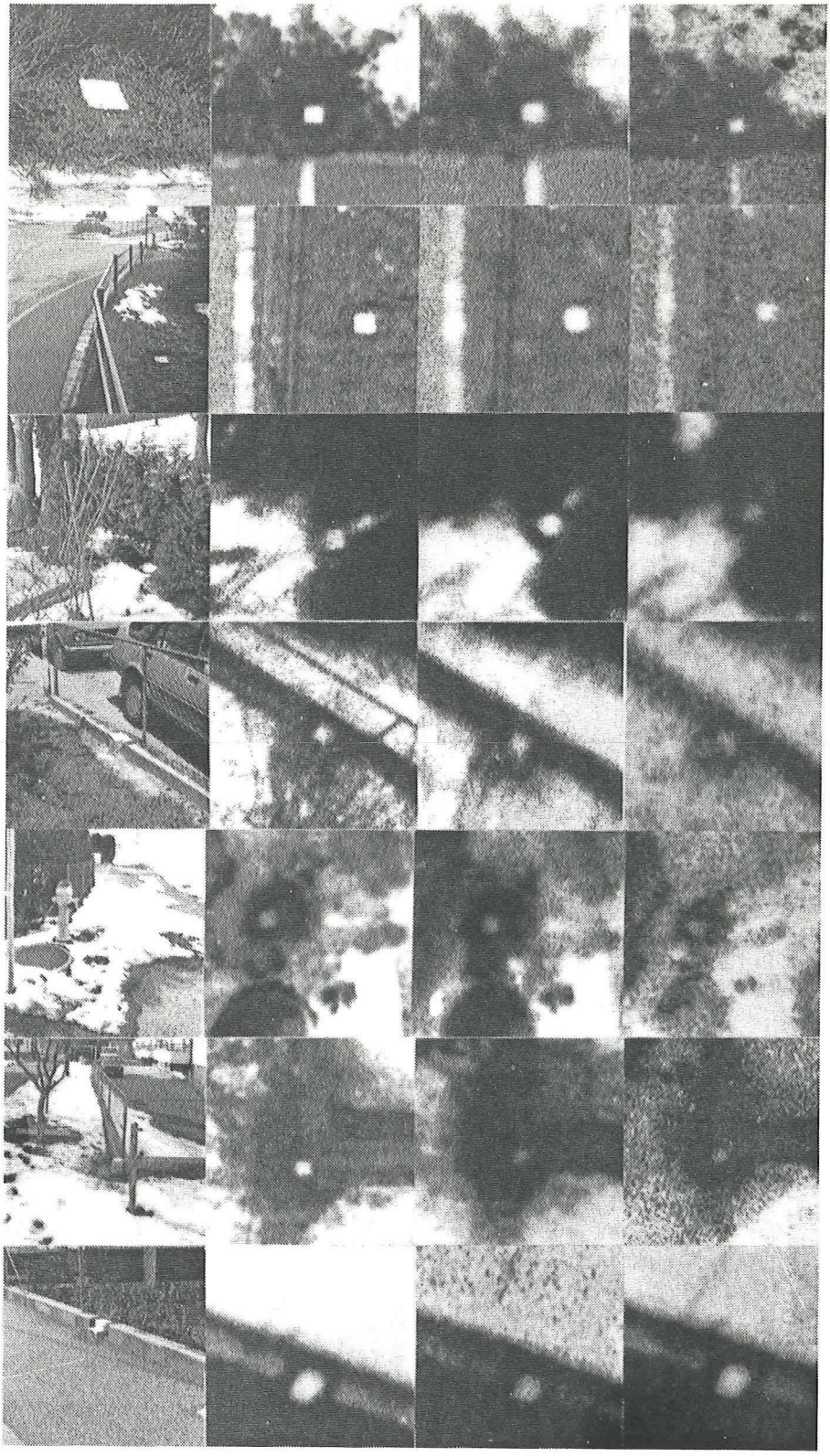

Fig. 3

Micro-agrandissements de points signalisés sur le terrain : extraits de photographies prises avec les chambres LMK et RC10A.

A - Aspect sur le terrain des points signalisés.

B - Image obtenue avec la chambre LMK, avec compensation du filé; échelle originale 1:3'000, agrandissement 40 x

C - Image obtenue avec la chambre RC10A; échelle originale 1:3'000, agrandissement 40 x

D - Image obtenue avec la chambre RC10A; échelle originale 1:5'500, agrandissement 80 x

2.2 Systèmes de prises de vues alternatifs

La qualité du matériel de prise de vues est loin d'être uniforme et, lors de l'établissement de contrats, il est important de s'assurer que le rapport qualité-prix est optimum. L'extrême bas de gamme dans ce domaine peut être représenté par un système de prise de vues régulièrement utilisé au Laboratoire de photogrammétrie et par quelques entreprises privées en Suisse. Il s'agit de la chambre aérienne manuelle Linhof Aerotechnika, format 9x12 cm, qui s'utilise à partir d'avions de tourisme ou d'hélicoptères (fig. 4 + 5).

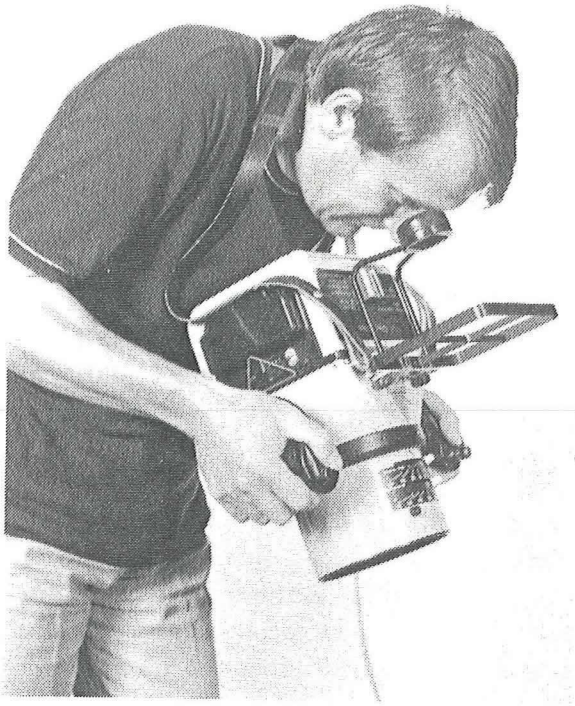

Fig. 4
Chambre de prises de vues aérienne Linhof Aerotechnika.

Fig. 5
Manipulation de la chambre Linhof à partir d'un avion léger. L'opérateur travaille avec la porte ouverte et cherche à obtenir des vues aussi verticales que possible.

Avec ce matériel, on n'arrive à respecter la verticale qu'à 10-15 degrés près, ce qui est suffisant pour ne pas gêner la vision stéréoscopique. Un restituteur analytique n'a en outre guère d'autre limitation concernant la verticalité des photos; il permet aussi de tenir compte des distorsions de l'objectif, même si celles-ci sont très importantes. La navigation avec un avion de tourisme pose également des problèmes, mais le plus gênant demeure l'instabilité de la chambre lors des prises de vues. Un tel système ne se prête qu'à des projets limités à quelques modèles. Sur un restituteur analytique, il n'y a guère d'autre limitation; d'autre part, ces appareils permettent de prendre en considération des distorsions considérables.

Pour un vol photogrammétrique, il est très important de travailler avec des prises de vues de grand format et il n'est pas recommandé d'utiliser des formats encore plus petits. Un tel équipement de prises de vues devrait aussi trouver un champ d'application en photogrammétrie architecturale pour la conservation des monuments. Quelques autres développements, comme par exemple le système Rollei, semblent s'engager dans cette direction.

2.3 Géodésie spatiale

En photogrammétrie, la géodésie spatiale est intéressante à double titre : d'une part pour la navigation, et d'autre part pour réduire le nombre de points d'appui d'un canevas.

2.3.1 Navigation

En règle générale, les vols photogrammétriques se font en navigation à vue, à l'aide notamment de la lunette de navigation et du régulateur de recouvrement. Comme référence, on utilise un plan de vol reporté sur une carte au 1:25'000 ou au 1:50'000. On se sert du régulateur de recouvrement pour déclencher les prises de vues à intervalles réguliers, en fonction du recouvrement désiré (généralement entre 60 et 90%); pour des prises de vues à grandes échelles, on peut de cette manière respecter la ligne de vol avec une précision de ± 50 m. Cependant, un déclenchement manuel demande des précautions particulières; en effet, un bloc formé de plusieurs lignes montre rarement une composition très régulière et les photos sont souvent décalées dans le sens du vol, d'où la nécessité d'augmenter le nombre de points de liaison. L'utilisation de la technique de navigation GPS (Global Positioning System) devrait permettre d'obtenir la formation de blocs réguliers par le déclenchement automatique des prises de vues sur des points préalablement définis. Les frais relativement bas pour des instruments de navigation faciliteraient leur grande diffusion et simplifieraient même les missions de prises de vues avec les techniques alternatives décrites plus haut. C'est malheureusement à partir de 1991 seulement que l'on disposera de satellites en nombre suffisant pour une utilisation opérationnelle.

2.3.2 Positionnement cinématique par GPS

En photogrammétrie, il est aussi intéressant de connaître les coordonnées exactes des prises de vues ainsi que l'inclinaison de l'axe de la chambre. Actuellement, les éléments d'orientation des chambres de prises de vues sont déterminés lors des orientations relative et absolue des clichés ou lors d'une triangulation aérienne. En mode cinématique, la technique GPS permet d'obtenir des précisions de l'ordre du décimètre ou même mieux, ce qui nécessite de recourir à la technique différentielle (fig. 6). Couplé avec un système inertiel pour déterminer aussi l'inclinaison de l'axe

de prise de vue, ce procédé permet de réduire considérablement le nombre de points d'appui du canevas, donc de réduire encore le coût d'une triangulation aérienne.

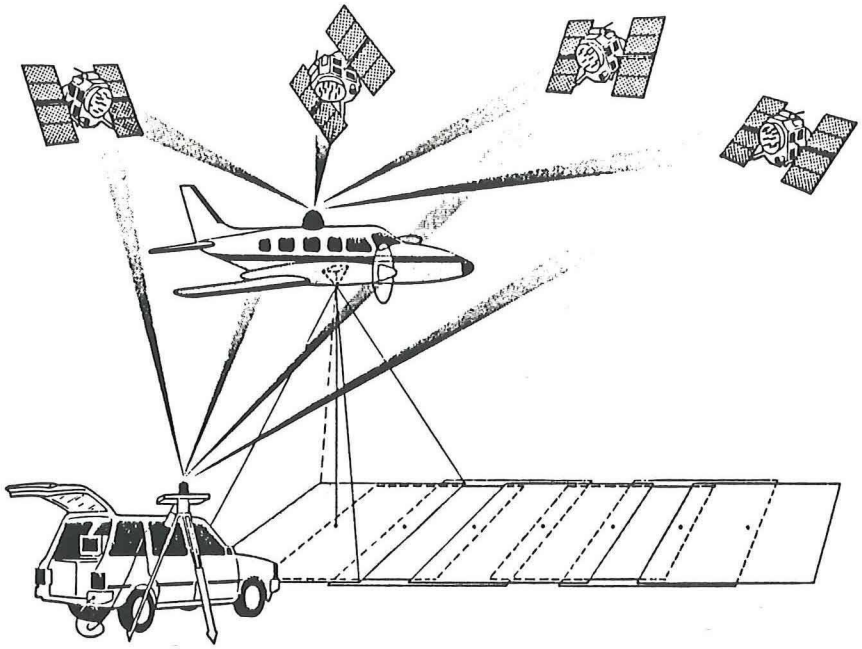

Fig. 6

Utilisation de la géodésie spatiale pour la localisation de la position des prises de vues lors d'un vol photogrammétrique. Une station de référence au sol permet de travailler avec la technique différentielle.

(figure tirée de 'GPS Test Flight Flevoland' par H.J.W. van der Vegt, actes de la 42e Semaine photogrammétrique, Stuttgart 1989)

3. Restitution photogrammétrique

Au cours de ces dernières années, la restitution photogrammétrique a subi de profonds changements. Il y a quelques années encore, le restituteur analogique représentait l'appareil standard; aujourd'hui, par contre, on utilise presque exclusivement des instruments analytiques. Au début, le restituteur analytique ne se distinguait d'un appareil analogique que par le système de projection, composé d'éléments électroniques au lieu d'éléments mécaniques. De ce fait, le travail de l'opérateur lors de la restitution n'était guère modifié, cependant, le processus d'orientation des clichés était largement facilité. La possibilité de diriger l'instrument sur un point déterminé à l'aide de coordonnées prédéfinies a permis l'interaction entre la mémoire des données et le processus de restitution. Avec les méthodes de dessin assistées par ordinateur, l'information cartographique est aujourd'hui stockée sous forme numérique et n'est dessinée que dans la phase finale du travail. On commence aussi à intégrer cette information dans des systèmes d'information à référence spatiale. D'autre part, à l'analyse purement visuelle des photos lors de la restitution vient s'ajouter la possibilité du traitement numérique d'image.

Un restituteur photogrammétrique moderne se compose des éléments suivants :

- porte-clichés avec système de balayage et système de mesure
- sytème d'asservissement et processeur temps réel
- système d'observation stéréoscopique
- ordinateur-hôte avec système de gestion des données

Comme périphériques, on a notamment :

- table traçante
- dispositif d'injection d'image
- processeur d'image
- traceur électrostatique pour la sortie des documents graphiques ou pictoriels

3.1 Restituteurs analytiques

Les premières recherches pour concevoir un restituteur analytique ont débuté en 1956 sous la direction de U.V. Helava et un premier prototype a été officiellement présenté en 1963. Il a ensuite fallu attendre 1976 pour voir apparaître le Planicomp de Carl Zeiss Oberkochen et, à peu près en même temps, le Traster de Matra. Quelques années plus tard, Wild a produit le AC1 et Kern le DSR1. Dès cette époque, les restituteurs analytiques ont commencé à être largement utilisés dans la pratique, la fiabilité des composants électroniques ayant alors atteint un niveau permettant une grande diffusion de ces instruments.

3.1.1 Instruments avec monoprocesseur

A l'exception du DSR1 de Kern, qui disposait déjà d'un processeur spécial pour le cycle temps réel, les instruments de la première génération avaient encore une structure très simple; le cycle temps réel et l'asservissement des porte-clichés s'effectuaient sur l'ordinateur principal (fig. 7). On pouvait de cette manière travailler avec un seul ordinateur, mais la possibilité d'extension des programmes de calcul était très limitée et représentait une tâche ardue.

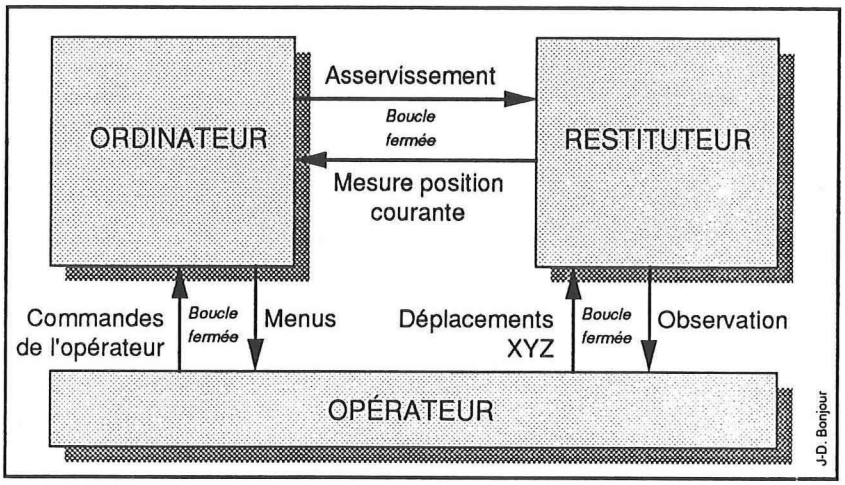

Fig. 7
Schéma de base du restituteur analytique. On remarquera les trois boucles fermées d'interaction entre les 3 composants en présence : opérateur, restituteur et ordinateur.

3.1.2 Instruments avec multiprocesseur

Dans un restituteur analytique, l'asservissement des porte-clichés est soumis à des contraintes strictes car chaque déplacement nécessite le calcul en continu des coordonnées-terrain; ce calcul doit en outre tenir compte des éléments d'orientation et de

la distorsion. Cette opération doit s'effectuer en temps réel, c'est-à-dire 50 à 100 fois par seconde, sinon l'opérateur a le sentiment que la marque-repère "vibre" lors des déplacements. Lors de l'asservissement des chariots, il est aussi primordial de s'assurer que le déplacement est en parfaite synchronisation avec les mouvements des manivelles.

Comme le cycle temps réel requiert un effort de calcul important, il est avantageux de prévoir un processeur spécifique pour cette tâche. Pratiquement tous les restituteurs analytiques de la nouvelle génération sont équipés d'un processeur temps réel spécialement destiné à cet usage.

3.2 Cartographie assistée par ordinateur

Une des caractéristiques principales de la restitution photogrammétrique est la possibilité de restituer directement des lignes et des courbes de niveau. Cette possibilité existait déjà sur les restituteurs analogiques, mais le résultat de la restitution graphique n'était qu'un manuscrit qui nécessitait encore un travail cartographique. Les systèmes de dessin assistés par ordinateur ont permis d'améliorer la présentation graphique; aujourd'hui, un plan est généralement stocké sous forme numérique et n'est représenté graphiquement que sur demande, sur table à dessin ou sur écran graphique.

Le traitement numérique des données cartographiques permet non seulement l'élaboration d'une carte, grâce à un système d'édition, mais également l'incorporation de mesures complémentaires effectuées sur le terrain. Pratiquement tous les restituteurs analytiques utilisés aujourd'hui peuvent être équipés d'un logiciel pour la cartographie numérique.

3.3 Dialogue homme-machine et injection d'image

En photogrammétrie, on attache une grande importance au confort de l'opérateur. La quantité d'informations à traiter lors d'une restitution photogrammétrique est considérable, et un bon confort d'utilisation conduit à un meilleur rendement. Le dialogue avec l'ordinateur d'un restituteur analytique se fait en général par l'intermédiaire de menus et ne nécessite pas un apprentissage trop long. Cependant, ce confort d'utilisation n'atteint pas encore le degré de convivialité d'un Macintosh par exemple. Des essais de commande par la parole ont été tentés mais n'ont pas été concluants.

Si le dialogue avec l'ordinateur se limite à quelques commandes lors de l'orientation des clichés, la restitution elle-même, en particulier pour les mises à jour, nécessite une analyse comparative poussée entre les photographies aériennes et le plan. Ce dernier est généralement placé sur la table à dessin, ou affiché sur un moniteur s'il est fourni sous forme de données numériques. Les photographies aériennes, par contre, sont observées à travers les oculaires du restituteur. La marque-repère dans le restituteur et le crayon sur la table à dessin établissent la relation entre les photos et le plan. Une comparaison entre ces deux documents lors de la mise à jour ou du contrôle de l'intégrité peut se révéler assez laborieuse.

Dans ce contexte, l'injection d'image représente un formidable progrès. Cette technique consiste à injecter dans le système optique du restituteur l'image de la carte, affichée par ailleurs sur un moniteur et correspondant à la zone couverte par le

couple de clichés aériens. Le premier système d'injection d'image, développé par Intergraph, a été présenté vers 1983, puis Carl Zeiss Oberkochen a proposé le Video Map. Il s'agissait de systèmes monoculaires, la carte n'étant superposée qu'à une seule photo du couple stéréoscopique. Enfin, en 1986, Wild a produit son nouveau restituteur analytique S9-AP, dont le système d'injection d'image en stéréo a été développé au Laboratoire de photogrammétrie de l'EPF-Lausanne (fig. 8 et 9). Depuis lors, d'autres firmes ont aussi essayé de développer des systèmes d'injection d'image en stéréo.

Les exigences techniques pour une injection d'image, surtout en stéréo, sont très élevées à cause des déplacements continuels des porte-clichés du restituteur analytique. Ainsi l'image sur le moniteur doit être déplacée, en fonction des mouvements des photos sur les porte-clichés, à une fréquence d'au moins 60 fois par seconde. La résolution optique et la précision géométrique de l'affichage doivent aussi correspondre à celles des photographies aériennes. On réalise très vite la nécessité de disposer d'un écran comportant au moins 1000 x 1000 pixels; la dimension des pixels devrait être de 10 microns au maximum à l'échelle des clichés. Dans le S9-AP, ces conditions ont pu être remplies grâce à une mémoire virtuelle de 32'000 x 32'000 pixels et à l'utilisation de processeurs de signaux spécialisés. Lors de l'injection, il est important que la projection centrale des deux images soit respectée de manière rigoureuse; une parfaite vision stéréoscopique de la carte superposée est indispensable pour pouvoir contrôler l'exactitude de la géométrie et pour assurer une observation confortable.

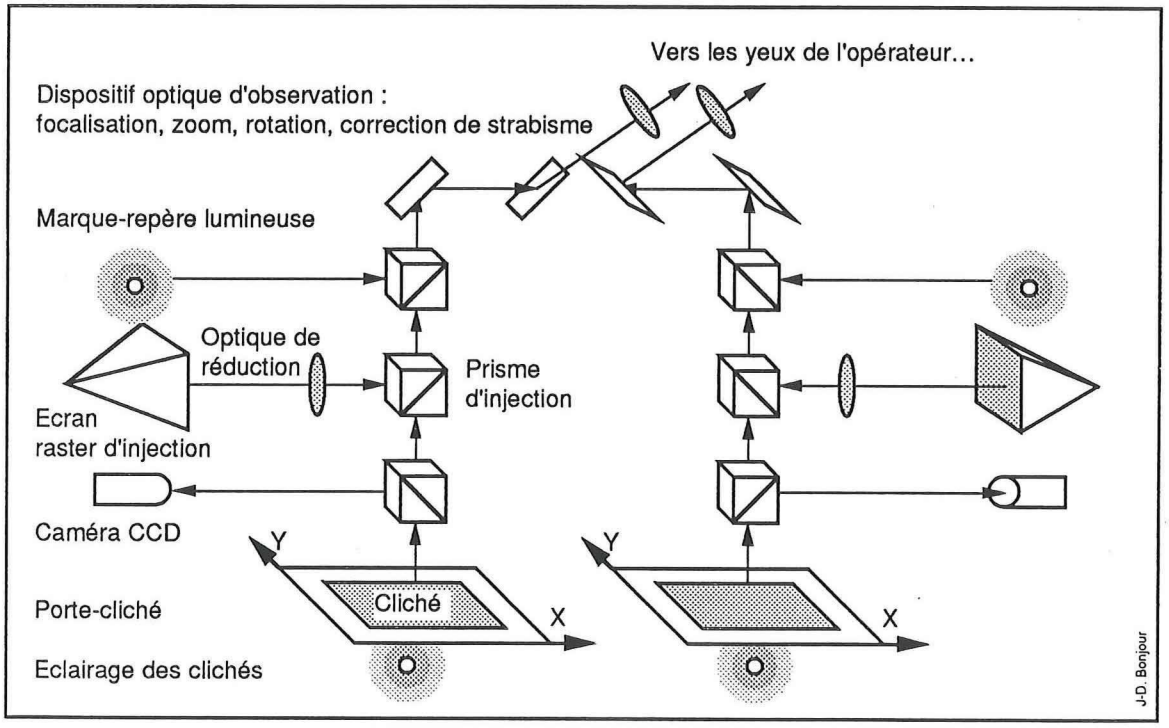

Fig. 8
Vue schématique du dispositif optique d'une station photogrammétrique comprenant un système d'injection d'image stéréoscopique et des caméras CCD.

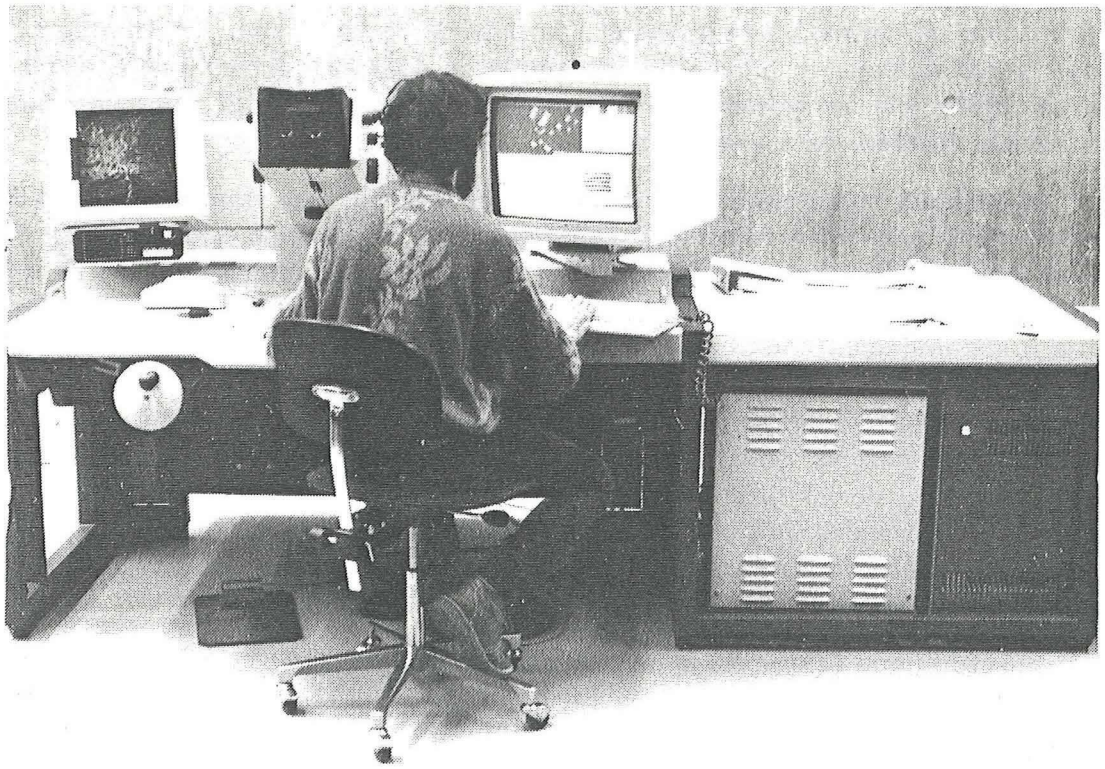

Fig. 9
Vue d'ensemble du restituteur analytique System9-AP de Prime Wild GIS dans lequel est incorporé un système d'injection d'image; l'appareil travaille en liaison directe avec un système d'information géographique.

Les exigences mentionnées ci-dessus sont essentiellement dictées par la qualité actuelle des photographies aériennes. La précision géométrique des restituteurs analytiques est généralement suffisamment élevée; lors d'une triangulation aérienne, on obtient des précisions de mesure d'environ ± 2 µm avec la plupart de ces restituteurs [3]. Cependant, on a l'impression que l'optique n'est pas toujours adaptée à la qualité des prises de vues actuelles, surtout si l'on travaille avec les négatifs originaux.

4. Le rôle des systèmes d'information en photogrammétrie

L'introduction des systèmes d'information et la gestion des données géométriques par des banques de données représentent une véritable révolution en cartographie. Il est important de réaliser que l'introduction des systèmes d'information n'a pas pour seul but de créer la cartographie numérique. Tout en permettant l'édition de documents graphiques, ces systèmes ont en fait une fonctionnalité beaucoup plus large. En règle générale, un système d'information comporte les fonctions suivantes :

- saisie des données
- gestion des données
- analyse des données
- présentation de l'information

La gestion de données géométriques exige une structuration appropriée de l'information par rapport aux objets et l'on peut de ce fait établir des relations de voisinage, généralement au moyen d'une banque de données relationnelles. Cette particularité différencie un système d'information géographique de la nouvelle génération d'un simple système cartographique.

Pour un profane, la nécessité de structurer les données par rapport aux objets peut paraître utile sans être forcément contraignante. Il ne faut pourtant pas oublier qu'une seule feuille d'une carte nationale représente une énorme masse de données numériques, destinées non seulement à être gérées mais aussi analysées. Pour une feuille à grande échelle, on obtient facilement jusqu'à 100'000 vecteurs, et pour des cartes à petites échelles ce chiffre augmente dans des proportions considérables. S'il s'agit simplement de déplacer une maison ou un tronçon de route, on est vite contraint de rechercher quelque mille points donnés par leurs coordonnées, de changer leur code ou de les éliminer. Si, par contre, l'objet peut être retrouvé en tant qu'entité, il en résulte une plus grande flexibilité, d'où la supériorité d'un véritable système d'information à référence spatiale par rapport à un simple système cartographique.

Un écran graphique et une table de digitalisation constituent la place de travail classique d'un système d'information géographique. Lors de l'introduction des données ou lors de leur mise à jour, l'opérateur en vérifie l'intégrité sur l'écran graphique. Lors de la saisie par photogrammétrie, le même contrôle peut être obtenu si l'image de l'écran du système d'information est injectée dans les oculaires du restituteur, comme c'est par exemple le cas pour le System9-AP. Il est cependant important que le rythme de travail de l'opérateur au restituteur ne soit pas affecté par la liaison avec le système d'information géographique. Cette condition est toutefois difficile à satisfaire vu la lourdeur actuelle des banques de données relationnelles.

5. Traitement numérique d'image et restitution photogrammétrique

Jusqu'ici, toutes les considérations sur les prises de vues et leur restitution se référaient à l'image photographique en tant que document analogique. Cela peut surprendre si l'on songe aux progrès réalisés en télédétection et aux travaux relatifs aux images SPOT. Cependant, l'effort pour mémoriser une image numérique est actuellement considérable et dépasse de beaucoup celui qui est nécessaire au stockage d'une simple image photographique. On recourt néanmoins de plus en plus à des procédés numériques comme étape intermédiaire, par exemple pour l'amélioration d'une image ou pour sa transformation géométrique, mais aussi pour l'élaboration d'un modèle numérique du terrain.

5.1 Reproduction d'images et orthophotos

Pour des travaux de haute qualité, l'imprimerie fait de plus en plus appel à des procédés numériques afin d'obtenir une meilleure adaptation du contraste ou une meilleure harmonisation des couleurs, mais aussi pour des assemblages d'images ou des montages. En photogrammétrie, un tel procédé est particulièrement intéressant pour la réalisation et la reproduction d'orthophotos. Actuellement, l'entreprise belge Eurosense Technologies réalise couramment des orthophotos par procédés numé-

riques. La firme Kern a également équipé son restituteur analytique DSR15 de caméras numériques et offre un système de programmes pour la production d'orthophotos numériques.

Le problème de la numérisation des documents photographiques est aujourd'hui résolu; on peut notamment utiliser un restituteur analytique équipé de caméras numériques. Il faut signaler toutefois que les scanneurs usuels ne sont pas appropriés pour cette tâche, car ils ne sont pas prévus pour la haute résolution d'une image photographique. Si l'on veut s'assurer que la totalité des informations contenues sur une photographie aérienne soit numérisée, il faut travailler avec des pixels d'environ 5 microns. Le nouvel appareil de numérisation présenté en septembre dernier par Carl Zeiss Oberkochen et développé en collaboration avec Intergraph semble répondre à cette exigence.

L'imprimerie dispose également, pour la reproduction d'images, d'instruments efficaces basés sur des procédés photographiques. De tels procédés ne sont financièrement intéressants que si l'on prévoit des reproductions en grande série. Pour des tirages limités ou des exemplaires uniques, ces solutions sont relativement onéreuses. Jusqu'à maintenant, on a souvent utilisé l'héliographie pour la reproduction d'orthophotos tramées. Pour ce travail, des traceurs électrostatiques de haute qualité ou des imprimantes laser de grand format devraient apparaître prochainement sur le marché. Dans ce contexte, il est intéressant de constater que l'Ordnance Survey a équipé son bureau de vente de Birmingham d'un traceur électrostatique afin d'imprimer sur demande des cartes à grande échelle en couleurs.

5.2 Mesure automatique des altitudes et élaboration d'un modèle numérique du terrain

Si la reproduction d'image peut être considérée comme un procédé passif, les mesures automatiques de terrain sont par contre des procédés beaucoup plus complexes. Le premier système opérationnel pour les mesures automatiques du terrain et l'établissement d'orthophotos a été élaboré par Hobrough dans les années 70. Divers corrélateurs avaient déjà été présentés auparavant, mais ils n'avaient trouvé qu'une utilisation limitée. La plupart des processeurs utilisés alors étaient basés sur des techniques analogiques et leurs performances étaient par conséquent trop limitées.

Les procédés numériques semblent plus favorables, et une bonne partie de la recherche en photogrammétrie se concentre actuellement sur ce sujet. Il semble que des procédés opérationnels soient déjà disponibles pour des applications industrielles [4]; des procédés intéressants sont aussi disponibles pour la cartographie à petite échelle et pour la mesure automatique des altitudes à partir d'images satellitaires, alors que la cartographie à grande échelle se heurte encore à des problèmes difficiles à résoudre.

Depuis quelques années, le Laboratoire de photogrammétrie de l'EPF-Lausanne a entrepris une recherche sur ce problème en collaboration avec Kern. Tous les tests indiquent que l'on s'achemine vers une solution satisfaisante. Pour la dérivation d'un modèle numérique de terrain, la grande difficulté réside dans le développement d'algorithmes suffisamment robustes pour être aptes non seulement à corréler les images, mais aussi à déterminer si les points mesurés se trouvent effectivement sur le terrain proprement dit et non pas sur des maisons ou des arbres par exemple. Une autre difficulté réside dans la mise à disposition de procédés permettant un contrôle complet des résultats des mesures avec possibilité d'introduire des corrections. Le sys-

tème de corrélation d'images développé au Laboratoire de photogrammétrie travaille avec le 'Multi-Templet Matching', un algorithme de calcul dérivé de la programmation dynamique. Le procédé est basé sur le calcul des parallaxes altimétriques de sections d'images de dimensions variables. Ces parallaxes sont introduites dans un processus de compensation permettant une approximation du terrain par éléments finis. Les sections de photographies aériennes sont ensuite géométriquement déformées pour être adaptées l'une à l'autre et la corrélation d'images est alors réalisée itérativement (fig. 10). Afin d'accélérer ces opérations, les calculs sont exécutés sur un réseau de Transputers. Les éléments indésirables du terrain sont finalement éliminés par filtrage et les données sont injectées dans un restituteur analytique pour contrôle et édition.

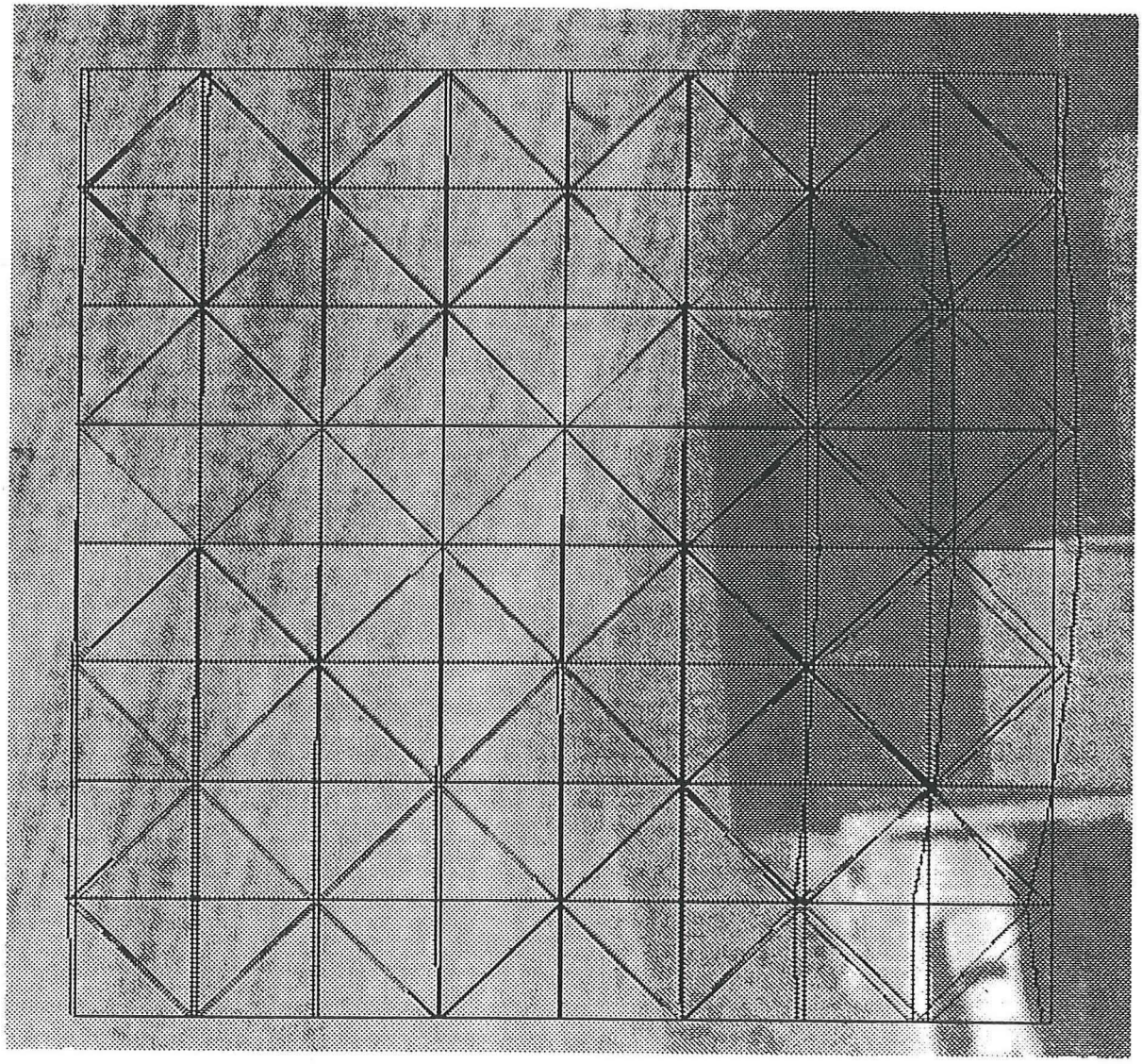

Fig. 10
Résultat d'une corrélation automatique lors de laquelle le terrain a été modelé au moyen d'éléments finis, représentés ici par la grille régulière (triangles) qui sert de référence pour l'appréciation des parallaxes. Les lignes déplacées montrent l'importance des parallaxes, assez considérables au niveau de la maison sur la droite alors que la partie gauche est plus ou moins horizontale.

Selon les tests actuels, il semble possible de traiter complètement automatiquement un modèle de 50 ha à une échelle-image de 1:5'000 en 2 à 10 heures, en fonction du nombre de Transputers utilisés. La précision obtenue est de l'ordre de 0,1‰ de l'altitude de vol lorsque 70% au moins de la superficie totale sont représentés par du terrain découvert. Ce procédé devrait permettre d'élaborer à moindre frais des documents destinés à des travaux de planification et ouvrirait la voie vers une photogrammétrie numérique complètement automatisée.

5.3 Restituteur numérique

Les progrès en traitement numérique d'image laissent entrevoir la possibilité de réaliser des instruments purement numériques pour la restitution des photographies aériennes. Il suffirait, en principe, d'un moniteur de haute résolution et d'une mémoire-image suffisamment grande. L'observation stéréoscopique des images, affichées sur un écran divisé en 2 parties, pourrait être réalisée soit par un système d'observation optique soit au moyen d'un écran de polarisation. La marque-repère serait composée d'un ou plusieurs pixels plus clairs dirigés par un curseur. On peut, de la même manière, afficher sur l'écran des lignes ou des symboles engendrés lors de la restitution en les superposant aux photographies aériennes.

Lors du dernier Congrès de Photogrammétrie à Kyoto, Kern, Matra et Toko ont présenté de tels systèmes. Leur qualité d'image et leurs performances n'atteignent pas encore celles des restituteurs analytiques. On peut toutefois espérer que le coût de tels appareils devienne beaucoup plus accessible dans un proche avenir.

5.4 Photographies aériennes comme fond de carte pour un système d'information géographique

La combinaison d'un restituteur numérique avec un système d'information géographique est une solution intéressante qui a été déjà brièvement abordée. A l'avenir, les systèmes d'information géographique seront utilisés pour les travaux de planification les plus divers. Une partie importante du travail s'effectuera à l'écran graphique, sur lequel sera affiché le contenu des divers plans ainsi que d'autres informations. L'information fournie par une carte de signatures est abstraite et peut facilement mener à de fausses conclusions, surtout si le contenu de la carte est incomplet ou n'a pas été suffisamment bien mis à jour. Dans ce contexte, l'incorporation de photographies aériennes ou même terrestres pourra représenter une aide précieuse; ces photos devraient également être affichées sur l'écran graphique en même temps que la carte de signatures. Des systèmes d'information aptes à combiner photographies aériennes et plans graphiques ont été développés entre autres par Intergraph et par Siemens (système SICAD). Dans ce cas, la photo aérienne est affichée à l'écran; en utilisant des orthophotos, on obtient une référence géométrique précise qui pourrait même être utilisée pour la mise à jour des données du système d'information. Il est évident que cette combinaison d'images exige une numérisation des documents photographiques.

5.5 Systèmes de restitution numérique complexes

Ces diverses considérations laissent supposer que le traitement numérique d'image influencera de façon décisive la restitution des photographies aériennes. Mais, de même que le restituteur analytique n'a pas simplement repris les fonctions d'un restituteur analogique en les adaptant, il faut aussi s'attendre à ce que la restitution numérique ouvre un large éventail de nouvelles perspectives. Il n'y aura certainement pas d'instrument standard, mais un certain nombre d'appareils qui pourront être regroupés dans un système.

Les éléments suivants feront probablement partie d'un tel système :

- **scanneur** pour la transformation d'images analogiques en images numériques
- **mémoire d'image** de quelques gigabytes pour le stockage de l'information d'image, probablement en liaison avec des disques optiques
- **compositeur d'image**, processeur d'image avec écran graphique pour la correction des tons de gris et l'assemblage des images, ainsi que pour le montage et l'incorporation de l'écriture
- **processeur parallèle** pour l'établissement automatique de modèles numériques du terrain, la production d'orthophotos ou de modèles de paysages, ainsi que pour des triangulations aériennes automatisées
- **système d'information géographique** utilisant comme fond de carte des photographies aériennes (monoplotter)
- **stéréorestituteur avec injection d'image** (numérique ou analogique) pour le contrôle des résultats de la restitution automatique et pour la restitution visuelle
- **traceur électronique** pour la production de documents pictoriels et de cartes de signatures
- **"recorder" d'images photographiques**, pour la production de documents de haute qualité destinés à l'impression

Cette liste n'est certainement pas exhaustive, mais elle montre que le stéréorestituteur n'aura plus le rôle central qu'il a joué jusqu'à maintenant. De nombreux procédés, comme la corrélation d'images, devraient être complètement automatisés. Ces opérations demanderont des processeurs performants, probablement des processeurs parallèles comme les réseaux de Transputers développés actuellement, notamment au Laboratoire de photogrammétrie de l'EPFL. De tels processeurs seront probablement aussi intéressants pour d'autres opérations nécessitant d'importants calculs, comme par exemple l'exploitation d'une banque de données pour un système d'information géographique.

6. Conclusions

Le panorama présenté illustre l'essor actuel des produits de la photogrammétrie et de ses possibilités techniques. Lors de l'élaboration des spécifications de précision, il faut être conscient que les moyens photogrammétriques s'adaptent très facilement aux exigences spécifiques de chaque cas; les frais entraînés par un projet sont cependant toujours en rapport direct avec la précision exigée.

Les techniques de prise de vues sont déjà bien adaptées aux exigences techniques et aux spécifications de précision. Les prises de vues aux échelles 1:3'000 à 1:8'000 ont fait leurs preuves pour des restitutions à grandes échelles. Des clichés aux échelles 1:20'000 à 1:50'000 s'appliquent en règle générale à la cartographie topographique et on essaie même de recourir à des vues prises depuis des satellites. Les frais de prises de vues représentent rarement plus de 10% du coût total d'un projet de cartographie; c'est pourquoi des clichés d'échelles trop petites peuvent augmenter très vite les frais totaux, en particulier en ce qui concerne les mesures complémentaires sur le terrain.

En photogrammétrie, la triangulation aérienne par la méthode des faisceaux permet d'obtenir une précision de ± 2-5 cm pour des prises de vues à grandes échelles; dans ce cas, il suffit en général de disposer de points d'ajustage à la périphérie de la zone à cartographier. L'incorporation de mesures GPS faites à partir de l'avion devrait permettre de réduire encore considérablement le nombre de points d'appui nécessaires.

Les exigences de précision sont souvent trop élevées, ou plutôt pas assez nuancées. Pour des projets de constructions ou des études de tracés, on exige en règle générale pour les plans une précision planimétrique et altimétrique de ±20-50 cm et la restitution d'un vaste secteur, dont une petite partie seulement sera utilisée. Pour l'étude d'un avant-projet, il suffirait très souvent de travailler sur de simples agrandissements photographiques et une série de profils en long et en travers; ce n'est que pour l'élaboration du projet de détail et l'exécution des travaux que des plans précis sont nécessaires. Selon ce principe, un avant-projet pour la réalisation d'un système de transport de haute capacité a été élaboré à Lausanne, entre le centre ville et la banlieue ouest (fig. 11) ; ce projet est actuellement en cours d'exécution.

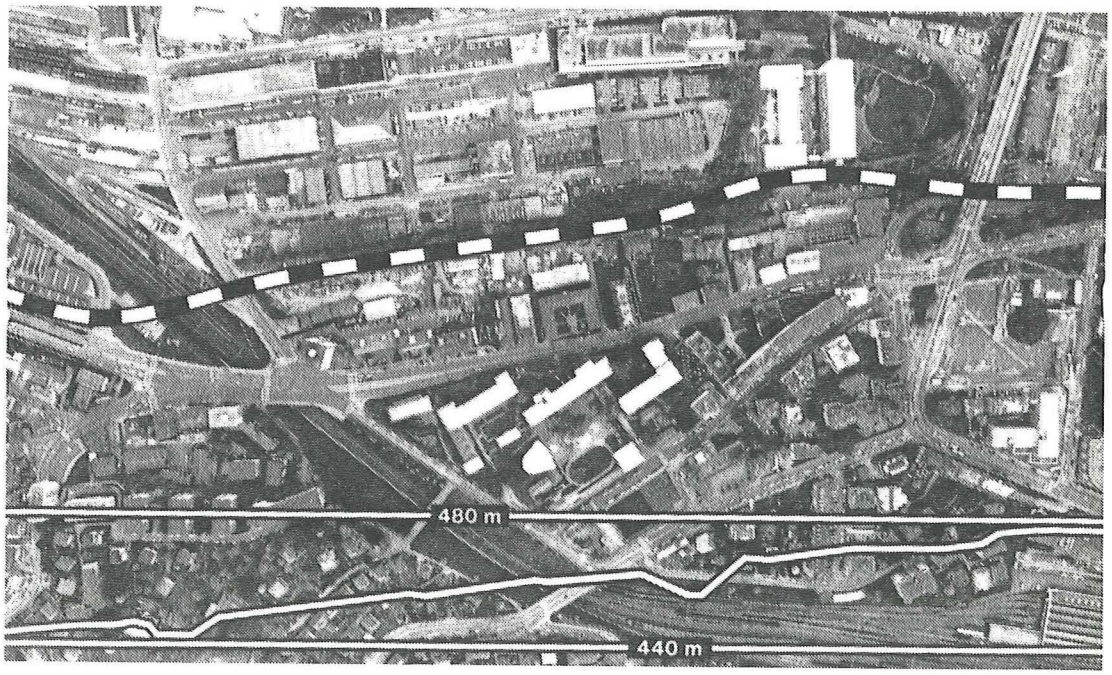

Fig. 11
Elaboration d'un avant-projet pour un transport public de haute capacité à l'aide d'agrandissements photographiques et de profils en long et en travers. Le document montre une section du tracé général du futur TSOL à Lausanne ainsi que, schématisé, le profil en long correspondant.

L'avant-projet consistait à fixer le tracé optimal d'une longueur d'env. 6 km sur une surface totale à analyser de 20 km² et à choisir entre 4 différents systèmes de transport (métro léger, bus, monorail ou système suspendu). La zone touchée ayant subi de grandes modifications au cours des dernières années, les cartes à grande échelle n'étaient plus à jour. D'autre part, la région est relativement accidentée avec des différences altimétriques atteignant 200 m. Dans une première phase, un certain nombre de tracés ont été déterminés sur des agrandissements de photographies aériennes à l'échelle 1:1000 environ, et des profils en long et en travers ont été mesurés. Sur la base de ces travaux, le tracé définitif a été choisi et ensuite seulement les documents cartographiques pour la réalisation finale ont été élaborés. De cette manière il a été possible d'obtenir les documents nécessaires à la planification à relativement court terme et à moindre frais.

Dans un proche avenir, les procédés numériques devraient permettre d'élaborer presque aussi avantageusement des orthophotos avec une présentation altimétrique et d'intégrer ces données dans un système d'information. Ainsi les méthodes photogrammétriques devraient trouver une plus large utilisation car elles ne seront plus guère liées à des instruments très spécifiques. Néanmoins, les restituteurs analytiques hautement spécialisés resteront réservés pour des travaux de précision et de haut rendement. Ils seront ainsi revalorisés et un plus grand nombre d'entreprises s'engageront aussi dans ce type d'activités.

Bibliographie

[1] O. Kölbl, J. Hawawini : 'Analyse comparative de clichés pris avec différentes chambres de prise de vues aériennes', Bul. S.F.P.T. n° 102 (1986-2), pp. 37-51.

[2] H. Zügge : 'RMK TOP - The New Aerial Survey Camera System from Carl Zeiss Oberkochen', Proceedings of the 42nd Photogrammetric Week, Stuttgart 1989, pp. 79-86.

[3] M. Jaakkola, W. Brindöpke, O. Kölbl, P. Noukka : 'Optimal Emulsions for Large-Scale Mapping (Test of Steinwedel)', publ. off. no 15 de l'OEEPE, 1985, 102 pp.

[4] W. Förstner : 'Image Analysis Techniques for Digital Photogrammetry, Proceedings of the 42nd Photogrammetric Week, Stuttgart 1989, pp. 205-221.