

(15)

SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DE **PHOTOGRAMMÉTRIE**

BULLETIN N° 54

BULLETIN N° 54 - AVRIL 1974

Sommaire

Etudes de l'I.T.C. sur les modèles numériques de terrain, <i>par F. Leberl et B. Makarovič</i>	5
Le Stéréocartographe Digital (D.S.) , un nouveau restituteur analytique, <i>par G. Inghilleri , S. Dequal , W. Ferri , A. Magi et D-P. Redi</i>	20
Un système d'acquisition numérique adapté à un groupe d'appareils de restitution , <i>par C. Vigneron</i>	53
<hr/>	
Bibliographie	55

Abonnement annuel (4 numéros) : 90 Francs

L'abonnement au Bulletin permet de bénéficier , au titre de membre adhérent
des différents services assurés par la Société Française de Photogrammétrie

Directeur de la publication : M. CARBONNELL

C.C.P. PARIS 12 533-94

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHOTOGRAMMÉTRIE , association formée sous le régime de la loi
Juillet 1901 . Siège Social : 2, avenue Pasteur, 94160 Saint-Mandé

ETUDES DE L'I.T.C. SUR LES MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN

Franz LEBERL
Branko MAKAROVIĆ
I. T. C. , Enschede, Pays-Bas*

1. - INTRODUCTION

L'Institut international de Levés aériens et Sciences de la Terre (ITC) à Enschede (Pays-Bas) a organisé, en tant que centre de recherche et d'enseignement de la photogrammétrie, un programme d'études relatives aux modèles numériques de terrain.

L'idée d'utiliser des modèles numériques de terrain existe depuis près de vingt ans. Jusqu'à peu, ils étaient seulement utilisés en génie civil, souvent sans recours à la photogrammétrie. Mais les possibilités de plus en plus grandes qu'offrent à présent l'automatisation de la saisie et le traitement numérique des données, laissent à penser que les modèles numériques de terrain seront bientôt utilisés non seulement pour les travaux de génie civil mais aussi pour les travaux traditionnels de topographie, de cartographie et de photogrammétrie. Ces constatations ont été une invite à dresser un programme de recherches consacrées aux modes d'acquisition des données numériques du terrain par voie photogrammétrique, à leur traitement et à leurs applications. Ce travail est actuellement en plein progrès : il a déjà fourni certains résultats, mais a mis en lumière de nombreuses questions nouvelles.

Le présent exposé se propose de souligner les aspects de la méthode, plus particulièrement ceux dirigés vers la construction et le génie civil. Il aborde ensuite les problèmes de l'échantillonnage, surtout celui de "l'échantillonnage progressif". Il s'agit d'une méthode actuellement étudiée à l'I.T.C. qui semble être bien appropriée à la saisie des données numériques par voie photogrammétrique. Puis on définit quelques problèmes relatifs au traitement des données par un ordinateur, surtout celui de la transformation d'une certaine représentation du terrain en une autre. On aborde ensuite les problèmes soulevés par l'interpolation.

Un certain nombre de résultats, bien qu'encore incomplets, est présenté pour ce qui concerne les relations qui existent entre la densité de l'échantillonnage, le type du terrain, les différences qui apparaissent entre la définition topographique et la définition mathématique de la surface.

Finalement on présente succinctement deux exemples d'utilisation photogrammétrique des modèles numériques de terrain : d'abord la production des orthophotographies, ensuite la production d'un plan à l'aide de la combinaison d'un modèle numérique de la région considérée avec un cliché unique de cette région.

2. - PRINCIPES GÉNÉRAUX

Un modèle numérique de terrain consiste en la réunion de deux ensembles d'éléments :

a) une série de points représentatifs de la surface du terrain, emmagasinée dans la mémoire d'un ordinateur (c'est la conversion du terrain sous forme numérique) ;

b) un jeu d'algorithmes permettant soit l'interpolation d'un point nouveau dont la position planimétrique est définie, soit l'estimation d'autres caractéristiques du terrain, comme le volume, les pentes, etc. [4] (c'est la reconstitution du terrain).

* Rédigé avec la participation de Jean Tariel pour présentation aux Journées de Photogrammétrie du Centre d'Actualisation scientifique et technique de l'INSA, Lyon, 24-26 avril 1974.

Les facteurs qui déterminent la précision des résultats et qui jouent sur le volume du travail sont : le type du terrain, le type et la densité de l'échantillonnage, la méthode de mesurage et la méthode de traitement des informations. Les relations qui existent entre ces différents facteurs sont représentées sur la figure 1. Dans les chapitres suivants sont traités les facteurs comme l'échantillonnage, le mesurage et le traitement des données.

La définition des "types de terrains" reste encore l'un des problèmes les plus difficiles à résoudre. Toute définition doit être suivie d'une classification. A l'I.T.C. nous avons considéré différents principes de classification quantitative comme l'analyse des covariances, l'analyse de Fourier et le nombre de lignes de rupture de pente [8]. Ce travail n'est pas encore terminé. C'est la raison pour laquelle nous utilisons toujours une classification subjective et qualitative, par un examen visuel des différents exemples de terrain.

L'un des trois principaux objectifs du programme de recherche de l'I.T.C. est l'établissement de modèles de précision et de modèles de volume de travail pour chacun des facteurs représentés sur la figure 1. Les autres buts principaux de ces travaux de recherche consistent à améliorer les méthodes existantes pour l'acquisition et le traitement des données, à en développer de nouvelles, et à étudier les utilisations photogrammétriques des modèles numériques. Il est donné plus loin un aperçu des résultats obtenus jusqu'à maintenant.

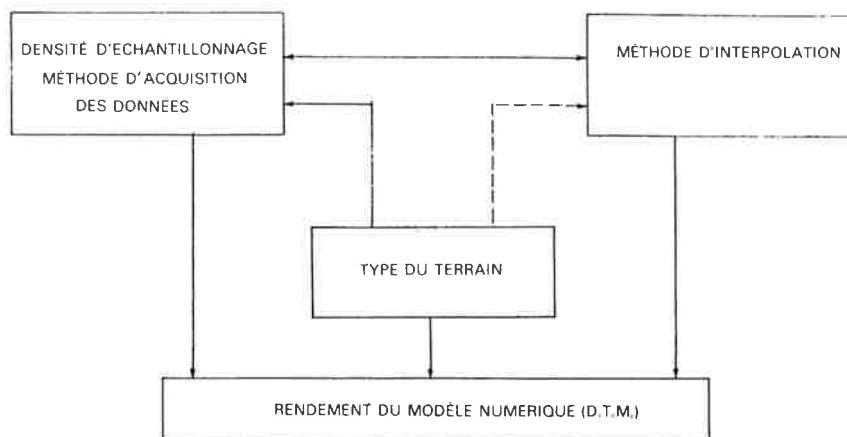


Figure 1 - Facteurs qui influencent le rendement d'un modèle numérique de terrain.

3. - LA SAISIE PHOTOGRAMMÉTRIQUE DES DONNÉES NUMÉRIQUES

3.1. - Généralités

La saisie des données numériques doit être considérée comme la phase fondamentale pour l'élaboration de tout modèle numérique de terrain. Elle peut être exécutée directement, par exemple par un levé sur le terrain, à l'aide d'un enregistreur aéroporté de profil (APR) ou d'un SONAR s'il s'agit du fond de la mer. Cette prise de données peut également être exécutée indirectement à partir de cartes déjà existantes ou de modèles photogrammétriques.

L'acquisition de ces données peut se faire en mode continu ou stationnaire. L'échantillonnage en mode continu consiste en une série de données relevées le long de lignes comme, par exemple, des courbes de niveau, des courbes de forme, des profils, des lignes caractéristiques de la morphologie, etc. L'échantillonnage stationnaire s'effectue point par point. Il peut être utilisé le long de lignes, mais aussi en des points singuliers.

La précision des mesurages destinés à un modèle numérique de terrain n'est pas un facteur critique, comparée à celle qu'exige une triangulation aérienne photogrammétrique. Cependant il est bien connu que l'opération faite en mode continu est affectée d'une erreur de mesurage double à celle faite en mode stationnaire. D'une manière générale, on peut supposer que la mesure d'une altitude, selon le mode stationnaire, est affectée d'une erreur dont la valeur est égale à 0,2‰

de la hauteur de vol, alors que la mesure d'une altitude selon le mode continu l'est de 0,4‰. C'est la raison pour laquelle l'acquisition des données par mesurage selon le mode stationnaire est préférable pour la saisie photogrammétrique des données numériques des terrains.

En ce qui concerne les instruments photogrammétriques utilisés pour saisir ces données, leur précision est généralement suffisante. Mais pour être utile à ce genre de travail, l'instrument doit être pourvu de manivelles et non d'un disque-pédale pour le pointé des altitudes. La manivelle permet en effet un pointé plus rapide des altitudes que le disque-pédale. Les informations obtenues doivent aussi pouvoir être mises sous forme numérique.

Une récente amélioration dans le domaine de la photogrammétrie permet le couplage en direct d'un instrument stéréoscopique avec un mini-ordinateur. Il semble que ces ordinateurs doivent remplacer de plus en plus les unités spéciales de contrôle des systèmes d'enregistrement de coordonnées. Une telle combinaison d'un instrument analogique photogrammétrique et d'un ordinateur offre de nombreuses possibilités surtout pour ce qui concerne les modèles numériques de terrain. Le mesurage peut être manuel : l'opérateur observe un point, lit les coordonnées et reporte les valeurs sur un imprimé spécial. Le mesurage peut aussi être automatique : l'opérateur est alors remplacé par un corrélateur qui se charge d'observer les altitudes le long de profils, ou selon un quadrillage régulier. Les coordonnées sont automatiquement enregistrées sur bande magnétique ou ruban perforé. Le mesurage peut aussi être semi-automatique : l'opérateur mesure les altitudes mais l'enregistrement se fait automatiquement, par exemple sur ruban perforé. En méthode semi-automatique il est possible de faire déplacer automatiquement la marque flottante en planimétrie (X-Y) ; l'opérateur n'a plus qu'à observer les altitudes.

3. 2. - Les échantillonnages

Trois différentes sortes d'échantillonnage peuvent être considérées :

- les méthodes sélectives telles que les échantillonnages cohérents, irréguliers ou mixtes ;
- les méthodes utilisant une compression des données ;
- les méthodes d'échantillonnage progressif.

Les méthodes sélectives permettent le mesurage des points soit selon une distribution déterminée à l'avance, soit selon une sélection effectuée par interpolation pendant les mesurages. L'échantillonnage peut être exécuté lors d'une opération unique, sans itération. Tous les points observés font alors partie du modèle numérique de terrain. La décision concernant l'emploi de l'échantillonnage sélectif est plus ou moins arbitraire. Des exemples d'échantillonnage cohérent se trouvent dans l'emploi de carroyages ou d'intervalles réguliers (profils). Comme exemples d'échantillonnage irrégulier, on peut citer les points choisis en fonction de la morphologie du terrain. L'échantillonnage mixte est une combinaison des deux précédents.

Les méthodes qui utilisent une compression des données peuvent être utilisées dans le cas de points en surnombre. Un tel échantillonnage peut être exécuté à l'aide de profils continus, de la conversion, sous forme numérique, des courbes de niveau et de l'observation de points par corrélation automatique (sans opérateur) soit le long de lignes, soit à l'intérieur de taches. Les données originales sont ensuite réduites selon certains critères de façon à en extraire les informations utiles. Le désavantage de cette méthode réside dans le fait que les données originales sont acquises lors de l'exécution d'une opération rapide en mode continu et, par conséquent, elles sont relativement imprécises ; aussi la densité de l'échantillonnage est-elle très différente dans une direction et une autre (profils, courbes de niveau) : elle peut être forte dans l'une et faible dans l'autre. Ce type d'échantillonnage peut être réalisé lors d'une opération simple, sans répétition.

Une méthode d'échantillonnage progressif est une méthode répétitive qui utilise un échantillonnage en principe régulier. On débute par un maillage espacé. Après un premier passage, les points mesurés sont analysés ; les positions planimétriques correspondant à de nouveaux points nécessaires sont alors indiquées pour le mesurage dans un passage suivant. Cette opération est répétée jusqu'à ce que la densité de l'échantillonnage s'adapte aux caractéristiques du terrain. De cette façon la densité est tout à fait objective. L'analyse des points mesurés, destinée à indiquer de nouvelles positions planimétriques, doit être faite à l'aide d'un ordinateur utilisé en direct ou en différé. Il semble que la méthode ne puisse être fructueuse que si un mini-ordinateur est couplé à l'instrument photogrammétrique et s'il opère en direct.

La figure 2 donne une liste des différents échantillonnages pour modèles numériques de terrain. Cette liste s'explique par elle-même. Deux groupes d'échantillonnage sont définis : séries de points le long de lignes et mailles.

- | |
|---|
| <p>(a) <u>Séries de points (données linéaires)</u></p> <p>Courbes de forme
Courbes de niveau
Profils non rectilignes et quasi parallèles
Profils parallèles
Lignes morphologiques</p> <p>(b) <u>Combinaison de données selon les lignes et selon des réseaux</u></p> <p>Lignes morphologiques et points caractéristiques
Réseaux hétérogènes et lignes morphologiques
Réseaux homogènes et lignes morphologiques</p> <p>(c) <u>Réseaux</u></p> <p>Réseau irrégulier morphologique
Réseau hétérogène et points morphologiques
Réseau homogène et points morphologiques
Réseau hétérogène
Réseau homogène</p> |
|---|

Figure 2 - Classification des échantillonnages pour modèles numériques de terrain.

Les "lignes de forme" peuvent être produites à l'aide d'un modèle photogrammétrique qui n'est pas basculé. Un tel modèle ne permet pas le mesurage des courbes de niveau, mais seulement celui de lignes de forme qui ressemblent à des courbes de niveau. Les profils parallèles mesurés à l'aide d'un stéréocomparateur ou dans un modèle stéréoscopique non basculé ne seront ni parallèles, ni rectilignes dans le modèle définitif. Un maillage hétérogène est, en principe, régulier mais de densité variable, avec un certain nombre de points qui peuvent être sautés. Un maillage homogène est obtenu à partir d'un échantillonnage tout à fait régulier.

L'échantillonnage le long de courbes de niveau est une méthode de saisie des données fréquemment recommandée dans les textes. Néanmoins ce type d'échantillonnage n'est avantageux que si les courbes de niveau elles-mêmes doivent figurer sur le document final. Si ces courbes ne sont pas nécessaires, il est préférable d'utiliser une méthode d'échantillonnage par mailles régulières, ce qui permet un traitement plus simple des données et offre la possibilité d'automatiser les mesurages avec une précision accrue. Un maillage régulier et hétérogène peut être obtenu par échantillonnage progressif. Une telle méthode progressive est maintenant examinée.

3.3. - L'échantillonnage progressif

3.3.1- Principe de la méthode - Il peut être montré que la densité de l'échantillonnage doit être adaptée au modèle du terrain pour que le modèle numérique obtenu soit le meilleur [6]. En conséquence les terrains doivent faire l'objet d'une classification et chaque classe doit se voir attribuer une certaine densité convenable avec l'échantillonnage qu'elle nécessite. Cette classification du terrain peut être faite à l'aide d'une interprétation subjective. Elle peut aussi être faite lors de la préparation des mesurages à l'aide d'un échantillonnage préliminaire, suivi d'une analyse objective.

L'échantillonnage progressif est une méthode qui permet, selon un processus répétitif de combiner les opérations de mesurage avec les opérations nécessaires à la classification du

terrain. A l'aide d'observations éparées, un premier échantillonnage régulier est obtenu. Les données sont analysées et la position planimétrique des nouveaux points à observer est indiquée. Ces derniers fournissent de nouvelles données et une nouvelle analyse permet de préparer le passage suivant. De cette façon l'échantillonnage est adapté localement au modèle du terrain.

Pour des raisons d'organisation et d'économie de place dans la mémoire de l'ordinateur, le modèle photogrammétrique du terrain peut être découpé en zones rectangulaires. Chaque zone est alors traitée comme une entité indépendante. En général l'échantillonnage progressif n'est pas sensible au nombre et à la surface de ces subdivisions. Mais le nombre des passages peut alors être réduit. Ce nombre dépend de la surface couverte par la tache, du modèle du terrain et de l'erreur tolérée. Des expériences préliminaires ont montré que trois passages suffisent dans la plupart des cas. La figure 3 montre les opérations nécessaires à l'échantillonnage progressif d'un modèle stéréoscopique et la figure 4 les résultats obtenus pour trois taches indépendantes. Le résultat de l'échantillonnage progressif peut être considéré comme un maillage serré de points réguliers dont un grand nombre a néanmoins été omis.

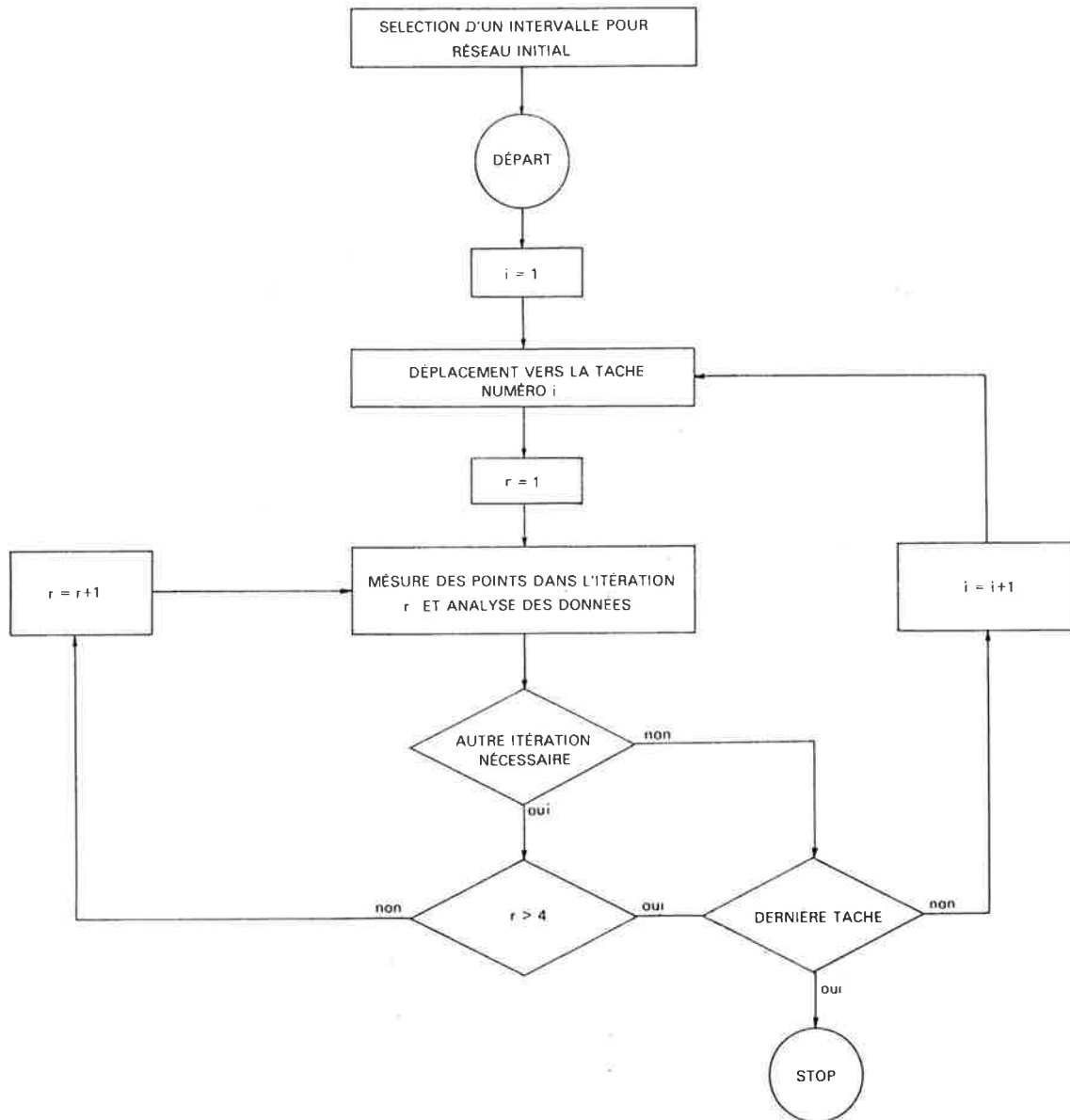


Figure 3 - Organigramme des opérations pour l'échantillonnage progressif d'un modèle photogrammétrique.

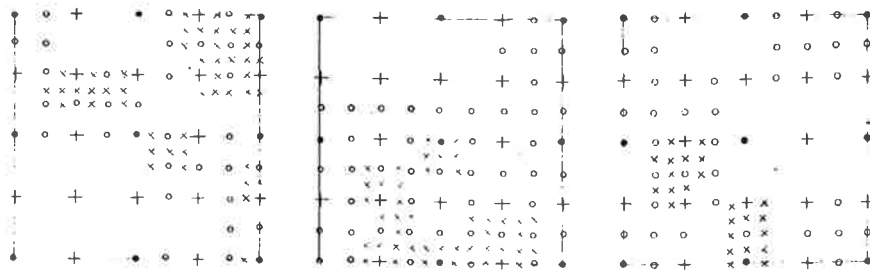


Figure 4 - Echantillonnages progressifs pour 3 taches indépendantes
 . mesures initiales ; + 1er passage ; o 2ème passage ; x 3ème passage.

La description détaillée de la méthode est hors du cadre de cet exposé. Pour plus de détails il faut consulter la référence [6], par exemple pour ce qui concerne la relation qui existe entre les différentes taches, leurs superficies, et les problèmes soulevés par leurs juxtapositions.

Un dernier point intéressant est le critère utilisé pour mesurer les points nouveaux insérés entre les points connus. La figure 5 illustre ce critère. Les points $\mu - 2$, μ , $\mu + 2$ étant connus, il faut décider s'il est nécessaire de mesurer de nouveaux points dans les positions $\mu - 1$ et $\mu + 1$. Pour pouvoir prendre la décision on calcule :

$$\delta \bar{h}_{\mu} = \Delta h_{\mu-2} - \frac{1}{2} (\Delta h_{\mu-2} + \Delta h_{\mu+2}) = \frac{1}{2} (\Delta h_{\mu-2} - \Delta h_{\mu+2}) = \frac{1}{2} \delta h_{\mu}$$

En supposant que le terrain puisse être représenté par une parabole, on obtient de ce fait :

$$\delta h_{\mu-1}^* \approx \delta h_{\mu+1}^* \approx \frac{1}{4} \cdot \delta \bar{h}_{\mu} = \frac{1}{8} \delta h_{\mu}$$

$$\delta h_{\mu} \approx 8 \cdot \delta h_{\mu-1}^* \approx 8 \cdot \delta h_{\mu+1}^*$$

Dans un modèle numérique de terrain, l'erreur d'échantillonnage devrait être de la même importance que l'erreur photogrammétrique. L'erreur moyenne quadratique photogrammétrique est :

$$\sigma \approx 0.2 - 0.5 \% Z \quad (\text{avec } Z = \text{hauteur de vol})$$

et l'erreur "maximale" :

$$2\sigma \approx 0.4 - 1.0 \% Z$$

L'erreur d'échantillonnage $\delta h_{\mu-1}^*$ et $\delta h_{\mu+1}^*$ dans le modèle numérique du terrain doit être équivalente à cette valeur de 0.4 à 1.0% Z. C'est pour cette raison qu'il faut mesurer de nouveaux points aux positions $\mu - 1$ et $\mu + 1$ dans le cas où :

$$\delta h_{\mu} > 2\sigma$$

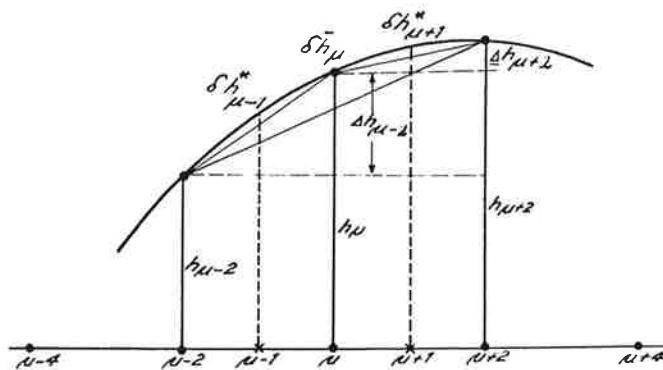


Figure 5 - Définitions pour le critère de mesure des points nouveaux dans une itération additionnelle.

Il est évident que ce critère pourrait être remplacé par plusieurs autres. Il n'est pas possible de garantir que toutes les irrégularités du relief seront bien représentées dans le modèle numérique. Une certaine marge d'oublis doit être acceptée. Mais la méthode de l'échantillonnage progressif est comparable, sinon supérieure, aux autres méthodes d'échantillonnage en ce qui concerne la précision et l'efficacité.

4. - LE TRAITEMENT DES DONNEES

4.1. - Les transformations

A partir des mesures obtenues à l'aide d'un échantillonnage quelconque, le modèle numérique du terrain peut être utilisé pour obtenir les résultats donnés sur la figure 6. La transformation des informations de la figure 2 en résultats de la figure 6 peut être exécutée suivant un grand nombre d'alternatives. Une description ou une discussion au sujet de ces traitements tombe certainement en dehors de cet exposé. Mais on peut toutefois mentionner quelques problèmes principaux.

- | |
|---|
| (a) <u>Données linéaires</u>
Courbes de niveau
Profils parallèles
Profils longitudinaux et transversaux
Données pour le drainage
Données pour la production d'orthophotographies |
| (b) <u>Données selon des superficies</u>
Données pour la production d'orthophotographies
Estompage
Pentes du terrain
Réseau hétérogène ou homogène |
| (c) <u>Données volumétriques</u>
Le long d'une bande d'intérêt (route par exemple)
Pour un projet de surface (aéroport par exemple) |
| (d) <u>Autres données</u>
Données pour l'étude de routes
Données administratives
Données pour des études diverses |

Figure 6 - Classification des informations générées à partir de modèles numériques de terrain.

Les échantillonnages obtenus par voie photogrammétrique se trouvent dans des systèmes de coordonnées différents pour chaque modèle stéréoscopique. Les modèles peuvent présenter un certain recouvrement. Mais non seulement le système de coordonnées est différent, mais également la densité et même la méthode d'échantillonnage. Dans un même modèle photogrammétrique la densité de l'échantillonnage peut être variable, selon la méthode utilisée : irrégulière ou progressive. Il existe donc deux alternatives principales de traitement des données : soit la transformation directe des données en résultats (par exemple courbes de niveau en profils) pour chaque unité originale telle que le modèle photogrammétrique, puis l'unification des résultats obtenus pour chaque partie ; soit l'unification de toutes les parties dans un système commun, puis la transformation du modèle numérique lui-même dans le système voulu.

La seconde alternative est la plus avantageuse si le même modèle numérique du terrain est utilisé dans des buts différents et lors d'occasions différentes. La première alternative est la meilleure si le modèle numérique est utilisé une seule fois dans un but bien défini.

4. 2. - Les interpolations

Un élément important et d'un intérêt considérable pour les géomètres est le problème soulevé par l'interpolation d'un point nouveau à partir des points mesurés. Un grand nombre d'études a déjà été publié dans le passé, à telle enseigne qu'un des participants du dernier congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie, qui eut lieu en 1972 à Ottawa, a suggéré qu'il n'est plus nécessaire d'étudier ce problème puisqu'il a été suffisamment bien établi que l'interpolation linéaire est la meilleure. Néanmoins il n'existe pas beaucoup d'études publiées qui ont véritablement prouvé qu'il ne faut pas utiliser des méthodes d'interpolation plus avancées ou plus complexes que l'interpolation linéaire. Une telle étude a été faite à l'I.T.C. mais elle ne concerne que l'échantillonnage homogène et régulier [3].

On a comparé un certain nombre de méthodes d'interpolation avec celle de l'interpolation linéaire. Six modèles photogrammétriques de terrains différents ont été étudiés à l'aide de 8 densités différentes d'échantillonnage, variant de 100 points à l'ha à 1 point par 16 ha. Le tableau 1 donne un aperçu des résultats fournis par ailleurs en détail dans une étude précédente [3]. Ce tableau compare chacune des méthodes considérées avec celle de l'interpolation linéaire, en donnant les rapports qui existent entre les écarts-types obtenus par la méthode étudiée et les écarts-types obtenus après interpolation linéaire. Il est clairement démontré à l'aide du tableau 1 qu'il existe des différences significatives entre les méthodes différentes d'interpolation. Ces différences sont en moyenne d'un ordre de grandeur situé entre 10 et 25 %.

Outre les comparaisons concernant les précisions des méthodes différentes, on a étudié les exigences de ces méthodes en ce qui concerne les calculs. Le tableau 2 donne un aperçu de cette comparaison. Il apparaît qu'il existe des différences considérables entre les méthodes quant au temps de calcul nécessaire à l'ordinateur.

Méthode d'interpolation		Linéaire	Polynomiale bilinéaire	Moyenne arithmétique	Moyenne flottante	Polynomiale à maille	Prédiction linéaire
Poids				d^{-4}	$\exp(-4d^2)$	d^{-4}	$(1+d^2/4)^{-1}$
Nombre de points mesures utilisés pour chaque interpolation	4	1,00	0,89	0,92			0,88
	16			0,97	0,76	0,76	0,76
	36			1,03	0,77		0,76

Tableau 1 - Comparaison du rendement des différentes méthodes d'interpolation. On montre le rapport entre les écarts-types des méthodes étudiées et ceux de l'interpolation linéaire. Les chiffres du tableau sont les moyennes de ce rapport, calculées à partir de 6 modèles de terrain et de 9 densités d'échantillonnage.

d est la distance entre le point interpolé et le point mesuré.

Méthode d'interpolation		Linéaire	Polynomiale bilinéaire	Moyenne arithmétique	Moyenne flottante	Polynomiale à maille	Prédiction linéaire
Nombre de points mesures utilisés pour chaque interpolation	4	0,04	0,04	0,04			0,04
	16			0,05	0,21	0,25	0,12
	36			0,08	0,43		0,23

Tableau 2 - Temps de calcul pour quelques méthodes d'interpolation, dans un quadrillage, sur l'ordinateur PDP 11/45 de l'ITC.

5. - LE RENDEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

Deux facteurs déterminent le rendement d'un modèle numérique de terrain : d'une part le volume nécessaire de travail pour l'échantillonnage et le traitement des données, d'autre part la précision recherchée pour le modèle, fonction des erreurs d'observation et d'échantillonnage.

Le volume nécessaire de travail pour l'échantillonnage dépend de la densité, c'est-à-dire du nombre de points à observer, de l'instrument utilisé et de son fonctionnement. Le volume nécessaire de travail pour le traitement des données dépend des sous-programmes de recherche fournis à l'ordinateur et de la méthode d'interpolation utilisée.

La précision du modèle numérique (σ^2 totale) dépend de l'erreur moyenne quadratique de l'observation (σ_o^2) et de la perte d'information due à l'échantillonnage (σ_e^2 : il s'agit de la différence quadratique moyenne entre le point interpolé et le même point sur le terrain) :

$$\sigma_{\text{totale}}^2 = \sigma_o^2 + \sigma_e^2$$

Jusqu'à présent, il existe bien peu d'informations disponibles relatives à σ_e^2 . C'est la raison pour laquelle quelques études ont été faites à l'I.T.C. pour définir la relation qui existe entre σ_e^2 et l'échantillonnage. Deux méthodes ont été utilisées : l'étude expérimentale et l'étude analytique.

5.1. - L'étude expérimentale

Jusqu'à présent, seule est terminée l'étude expérimentale du rendement d'un modèle de terrain pour un échantillonnage régulier et homogène. Les six modèles de terrain utilisés sont figurés sur le schéma 7 ; trois d'entre eux étaient à l'échelle du 1:4.000 et les trois autres à l'échelle du 1:30.000. Dans chacun de ces modèles ont été observés les sommets d'un maillage de 35 x 35 points (figure 8). Les points marqués + ont été utilisés pour l'interpolation des points marqués . . Ces derniers ont été aussi observés afin de pouvoir comparer la surface topographique et la surface mathématique.

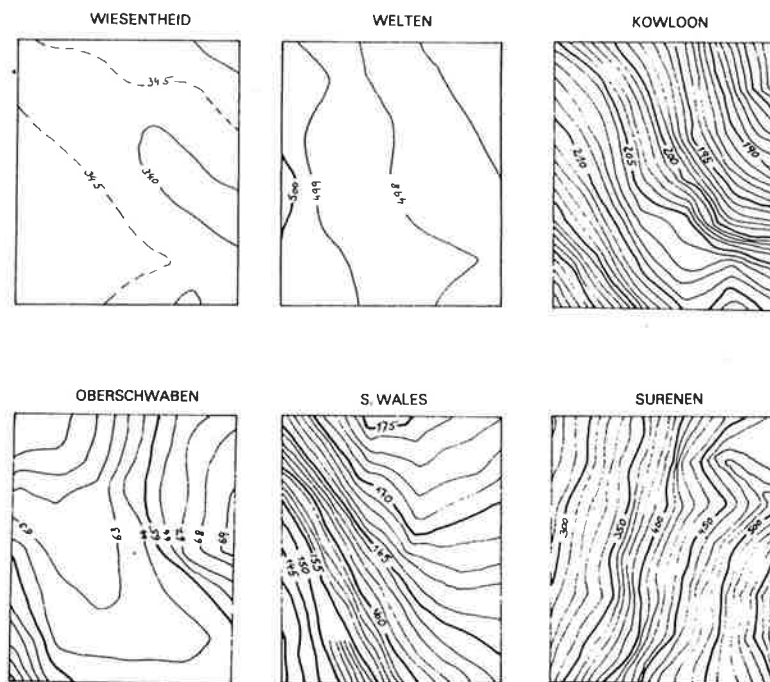


Figure 7 - Exemples de courbes de niveau des six modèles photogrammétriques utilisés pour l'expérience numérique. Les 3 croquis supérieurs couvrent une superficie de 50 x 60 m², les 3 croquis inférieurs une superficie de 200 x 240 m². Ces exemples ne sont qu'une partie des modèles utilisés.

La publication [3] donne le détail des résultats de cette expérience où les méthodes d'interpolation ont aussi été comparées (voir paragraphe 4.2). La figure 9 du présent exposé résume le résultat principal trouvé entre la densité de l'échantillonnage et la précision du modèle numérique. Cette figure a été préparée en utilisant une méthode d'interpolation qui utilise seulement les quatre points observés les plus proches du point nouveau. Elle conduit à la conclusion que la relation qui existe entre la densité des mesurages et la précision numérique est linéaire pour les densités et les terrains considérés.

Dans l'étude [3] le type de terrain a été choisi selon la méthode de Silar [8]. Il a été trouvé que les modèles "Wiesentheid" et "Oberschwaben" appartiennent à la catégorie I, les modèles "Welten" et "South Wales" à la catégorie II et les modèles "Kowloon" et "Surenen" à la catégorie III.

Une autre classification, selon les types de terrain, a été faite avec l'aide de la "variance" du relief. Un polynôme de second degré a été calculé à l'aide des 20 x 20 points indiqués par . (figure 8).

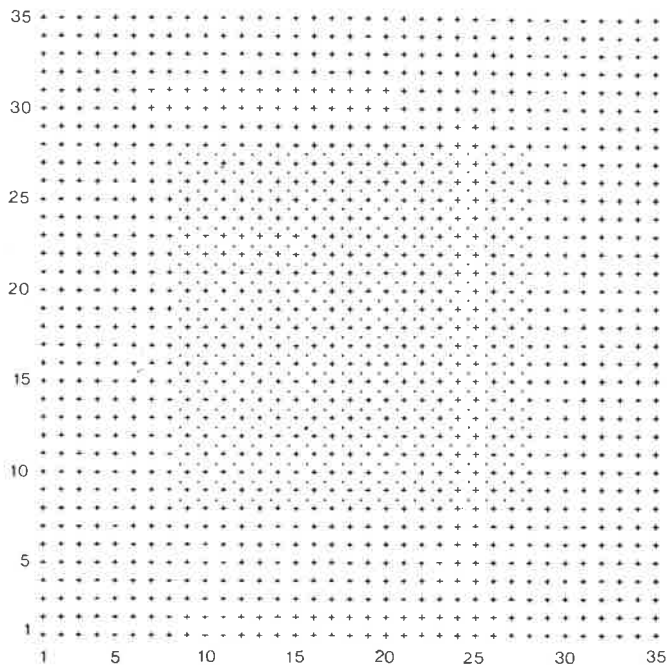


Figure 8 - Les mesures faites pour l'expérience numérique.

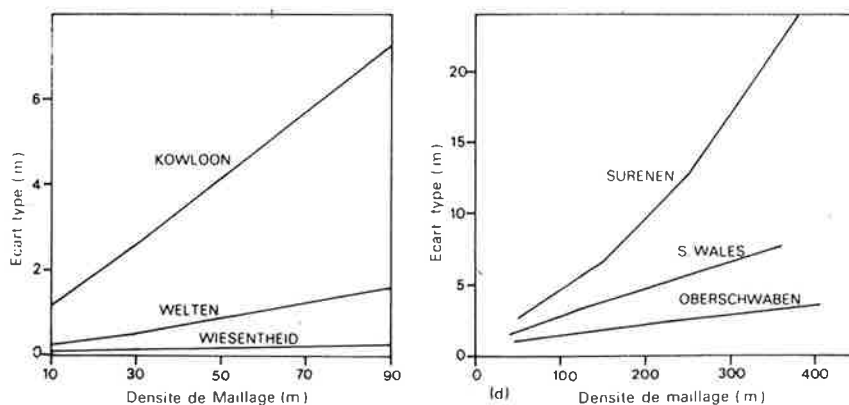


Figure 9 - Relation entre la densité d'échantillonnage, la précision du modèle numérique du terrain et le caractère de ce terrain.

Une "variance" a ensuite été calculée à l'aide des différences trouvées entre le polynôme et les valeurs mesurées. En portant les valeurs de cette "variance" suivant les abscisses on obtient, sur la figure 10, la relation entre le terrain, la densité de l'échantillonnage et la précision du modèle numérique. Encore une fois on obtient une relation linéaire (on a utilisé une échelle logarithmique).

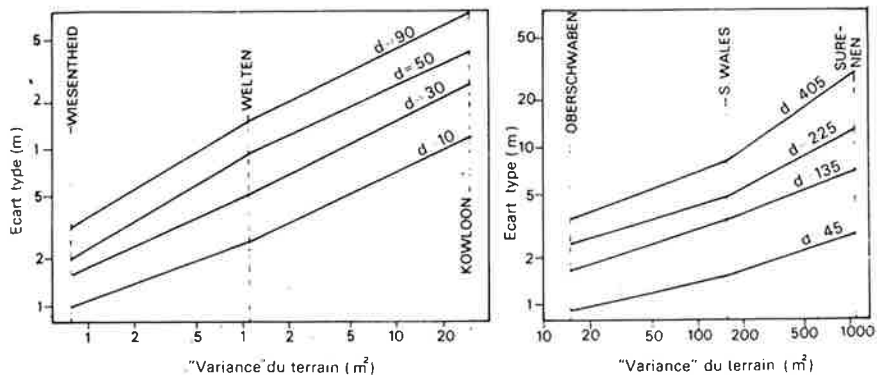


Figure 10 - Relation entre la "variance" du terrain et la précision du modèle numérique du terrain, en fonction des densités différentes pour l'échantillonnage.

5. 2. - L'étude analytique

Une étude analytique visant la précision a été proposée [5] et formulée à nouveau en termes mathématiques [1] pour la prédiction de la précision et la déduction de la densité d'échantillonnage d'un modèle numérique de terrain. Cette méthode utilise le rapport de transfert de l'information d'une sinusoïde échantillonnée avec une densité régulière, puis reconstruite à l'aide d'une interpolation linéaire.

Le rapport de transfert conduit au concept de la fidélité. La reconstitution du terrain à partir d'un échantillonnage n'est possible qu'avec une certaine fidélité exprimée selon un pourcentage. Pour exemple, voir la figure 11 dans laquelle une sinusoïde a été échantillonnée avec deux densités différentes. L'erreur moyenne quadratique de la reconstitution est définie comme :

$$m = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n r_i^2}{n} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

avec

$$r_i = \left\{ \frac{\int_{x_i}^{x_{i+1}} (y - a \cdot \sin(\omega x + \varphi))^2 dx}{(x_{i+1} - x_i)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

et

$$y = y_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} (x - x_i)$$

et

$$y_i = a \cdot \sin(\omega \cdot x_i + \varphi)$$

Le rapport de transfert est défini comme :

$$t = \frac{a - \sqrt{2} \cdot m}{a}$$

et donne une mesure de fidélité de la reconstitution de la sinusoïde à partir des points observés. Il peut être vérifié que, dans le cas de la figure 11a, cette fidélité est égale à 0,78 % tandis que, dans celui de la figure 11b, elle est nulle.

un modèle numérique du terrain pour l'obtention des informations relatives au relief et une photographie unique pour la planimétrie. Les détails planimétriques doivent être relevés sur cette photographie unique ; l'information ainsi obtenue doit être convertie numériquement puis transformée selon le système de la carte à l'aide des données relatives à l'inclinaison du cliché et au relief du terrain. Cette transformation peut être exécutée dans un ordinateur soit en direct soit plus simplement en différé, soit selon une combinaison des deux modes.

Les avantages d'un tel procédé sont évidents : l'instrument pour les mesures est extrêmement simple et consiste simplement en un capteur numérique conçu pour la cartographie. En plus d'un tel capteur, nécessaire pour suivre et pour chiffrer les détails planimétriques, il suffit d'avoir recours à un ordinateur et à un coordinatographe cartographique pour dessiner les cartes aux échelles désirées. La figure 14 montre la configuration d'un tel système pour la restitution numérique à partir d'une photographie unique.

Un autre avantage est la simplicité dans la manipulation du système. Il n'est nécessaire d'effectuer ni orientation relative, ni orientation absolue. Il suffit de tracer les détails planimétriques sur la photographie. Ceci peut être un avantage de nature à intéresser les ingénieurs du génie civil et des sciences de la terre qui travaillent sur des photographies aériennes mais qui ne sont pas familiers avec les instruments et les procédés photogrammétriques. Cependant un tel procédé n'est encore qu'au stade de la proposition et non à celui de l'exploitation, comme l'est l'orthophotographie par modèles numériques du terrain. Mais les possibilités qu'offre la restitution numérique par photographie isolée pourraient stimuler la création de banques de données relatives au relief du terrain car il faut évidemment qu'une telle banque existe avant de pouvoir utiliser largement cette idée.

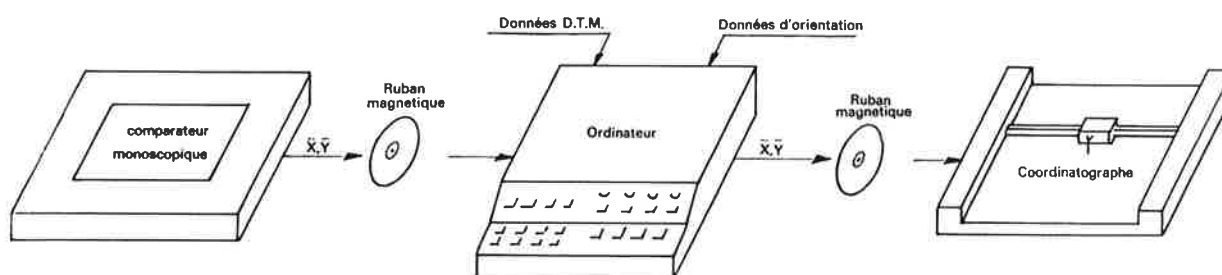


Figure 14 - Configuration d'un système pour la restitution numérique à l'aide d'une photographie unique.

7. - CONCLUSIONS

Le programme de recherche sur les modèles numériques de terrain établi par l'I.T.C. vise trois buts principaux :

- a) établir des modèles permettant l'étude du volume de travail nécessaire et celle de la précision, en fonction de la densité de l'échantillonnage, du type de terrain, du traitement des données, etc. ;
- b) améliorer les procédés existants et mettre au point des procédés nouveaux pour l'acquisition des données par voie photogrammétrique et pour leur traitement en vue de la création de modèles numériques de terrain ;
- c) étudier leurs utilisations photogrammétriques.

Les résultats communiqués dans le présent exposé concernent ces trois buts. Naturellement ils ne sont pas encore définitifs puisque le travail est en cours de progression. Son résultat principal sera un système pratique pour la description numérique du relief du terrain, pour créer des banques de données, ainsi que pour développer des procédés pour leurs applications photogrammétriques.

Après avoir classé et discuté des méthodes d'acquisition photogrammétrique des données

sur le relief du terrain, on discute de la méthode de l'échantillonnage progressif pour la préparation d'une banque de données adaptée au modèle du relief. L'utilisation de cette méthode nécessite cependant un restituteur photogrammétrique couplé à un ordinateur fonctionnant en temps réel.

Le traitement des données a été étudié par rapport aux méthodes d'interpolation. La conclusion est qu'il existe des différences dans la précision des différentes méthodes, avec un ordre de grandeur allant de 10 à 25 %.

Le rendement d'un modèle numérique a été traité analytiquement et expérimentalement. Deux méthodes ont été présentées pour planifier un modèle numérique de terrain. Cependant les résultats ne sont valables que pour les échantillonnages réguliers.

Les deux exemples relatifs à l'utilisation photogrammétrique des modèles numériques de terrain sont d'actualité différente : la production des orthophotographies contrôlées numériquement est maintenant réalisée ; la restitution numérique par photographie unique n'est qu'une idée pour l'instant. Mais dès à présent, toutes les applications des modèles numériques de terrain sont sur le point de devenir importantes sur le plan pratique.

Références bibliographiques

- [1] Blaschke W. - "Application of Orthophotomaps in Highway Work". Invited Paper, Comm. IV, 12ème Congrès Int. de S. I. P., Ottawa, Canada, 1972.
- [2] Laan R. C. - "Information transfer in the reconstruction of data from sampled points of a sine wave", ITC-Journal 1973/2, pp. 379-396.
- [3] Leberl F. - "Interpolation in square grid DTM's", ITC-Journal 1973/5, pp. 756-807.
- [4] Linkwitz K. - "Digital Terrain Models", Bildmessung und Luftbildwesen, 1970/1.
- [5] Makarovič B. - "Information Transfer in Reconstruction of Data from Sampled Points", Photogrammetria, 28(4), pp. 111-130, 1972.
- [6] Makarovič B. - "Progressive sampling for digital terrain models", ITC-Journal 1973/3, pp. 397-416.
- [7] Makarovic B. - "Digital mono-plotters", ITC-Journal, 1973/4, pp. 583-600.
- [8] Silar F. - "Das digitale Geländemodell - Theorie und Praxis", Vermessungstechnik, 1972/9.