

## EXTENSION DES APPLICATIONS DE LA PHOTOGRAMMETRIE A LA CONSERVATION DES MONUMENTS ET DES SITES

Le colloque organisé en 1968 par l'ICOMOS, à Saint-Mandé (France) avait dressé un tableau des méthodes photogrammétriques et des divers champs d'application de ces méthodes dans les relevés d'édifices et d'ensembles monumentaux anciens. Nous en avons donné, en 1969, une synthèse dans le volume IV de « Monumentum » [1]. Depuis lors, les matériels et les méthodes de la photogrammétrie architecturale ont beaucoup évolué, leurs domaines d'emploi se sont considérablement étendus [2] et nous voudrions aujourd'hui présenter les principaux aspects de cette évolution et de cette extension.

Il nous paraît utile auparavant de rappeler les principaux types de relevés photogrammétriques, considérés d'abord du seul point de vue de leur réalisation technique. Ils sont au nombre de trois (fig. 1):

1. *Les relevés stéréophotogrammétriques graphiques.* A partir d'un couple de photographies métriques, prises de deux points de vue différents et dont les axes principaux sont parallèles ou présentent une assez faible convergence, de façon à pouvoir être observées en stéréoscopie, on forme, à une échelle donnée, un *modèle spatial* du sujet à l'aide d'un appareil optico-mécanique, dit *appareil de restitution*, qui reconstitue d'une manière très précise le schéma géométrique de la prise de vues. L'image en relief observée est explorée à l'aide d'un index, lequel peut être pointé stéréoscopiquement sur tout point à mesurer ou déplacé de façon continue sur toute ligne à relever, tandis qu'un système traceur marque ce point ou dessine cette ligne sur l'épure, le modèle formé simultanément à l'exploration de l'image étant projeté sur l'un

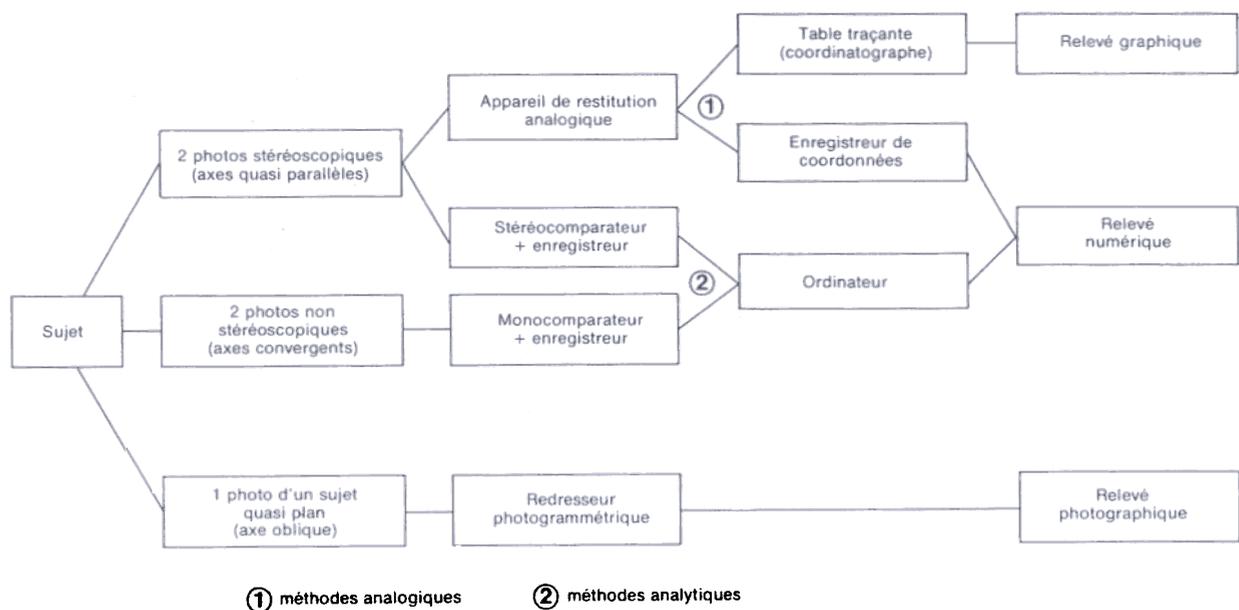


Fig. 1. - Les méthodes de relevés photogrammétriques.

des trois plans de référence du relevé (élévation, coupes horizontales ou verticales).

2. *Les relevés photogrammétriques numériques.* Ceux-ci sont de deux sortes :

2.1. On branche sur l'appareil de restitution stéréophotogrammétrique un *enregistreur de coordonnées* qui met automatiquement en mémoire les coordonnées de tout point du modèle observé, mesurées dans le système d'axes trirectangulaires de l'appareil. Cet enregistrement peut se faire par impression sur une bande de papier ou, si l'on veut pouvoir traiter directement les données par l'informatique, sur des cartes perforées, un ruban perforé ou une bande magnétique. Certains enregistreurs permettent également de « numériser » par points successifs, à une certaine cadence ou à un certain intervalle spatial, une ligne suivie de façon continue par l'opérateur. Les coordonnées instrumentales sont ensuite transformées, par un calcul simple, dans le système de référence du sujet. Ce processus numérique est encore un processus *analogique*, les conditions de la reconstitution spatiale de l'élément relevé étant les mêmes que dans le cas précédent : seul diffère le mode de saisie des données.

2.2. Il n'en est plus de même d'une autre méthode numérique dans laquelle est mis en œuvre un processus *analytique*. Les mesures sont faites ici directement sur les clichés, en coordonnées planes, à l'aide d'un *comparateur*. Si l'observation stéréoscopique est possible, on utilise un *stéréocomparateur* avec lequel on travaille simultanément sur les deux clichés par pointés stéréoscopiques. Dans le cas contraire, on utilise de préférence un *monocomparateur*, chaque photographie du couple étant traitée individuellement ; les deux axes de prise de vues peuvent alors ne présenter aucun parallélisme et même être fortement convergents, ce qui est par ailleurs une manière d'accroître la précision du relevé. Les coordonnées planes des deux images homologues de chaque point du sujet observé, mesurées sur chaque plaque et enregistrées automatiquement, sont les données de base d'un calcul dans lequel interviennent également les caractéristiques de la chambre métrique et des « données externes » (éléments de longueur ou d'orientation, points d'appui servant de canevas au relevé). Ce calcul détermine, généralement par une méthode d'intersection et dans un système de référence propre au sujet, les coordonnées spatiales de chaque point.

Les deux processus 2.1 et 2.2 aboutissent donc au même résultat, c'est-à-dire à des déterminations numériques *ponctuelles*, à partir desquelles on peut, soit extraire des valeurs métriques importantes, soit effectuer toutes sortes de calculs, soit passer à une expression graphique à l'aide, par exemple, de tables traçantes automatiques. On conçoit cependant que le nombre des points mesurés ne peut pas être infini et que le passage à une représentation graphique demande que l'on adopte certaines hypothèses sur la forme des li-

gnes qui doivent joindre les points restitués. En ce sens, les procédés numériques et surtout les procédés analytiques, s'ils sont plus précis, sont moins fidèles que les procédés analogiques graphiques qui procèdent par tracé *continu*. Mais, à vrai dire, les domaines d'application de ces deux premiers types de relevés ne sont pas les mêmes.

3. *Les relevés photographiques.* Ici encore, nous trouvons deux catégories :

3.1. *Le redressement photogrammétrique*, effectué par un *redresseur*, transforme une photographie prise selon un axe incliné par rapport au plan de référence du sujet en une autre photographie dans laquelle les déformations perspectives dues à l'inclinaison de l'axe sont corrigées. Par contre, les déformations perspectives causées par le relief du sujet ne le sont pas. De sorte que le redressement ne peut s'appliquer qu'à des *sujets plans* ou pouvant être considérés comme tels, avec une tolérance qu'il convient de définir en fonction de la précision recherchée et de la chambre métrique utilisée. Le redressement est donc un cas particulier parmi les techniques photogrammétriques ; il est cependant assez largement employé.

3.2. Les deux types de déformations simultanément corrigés par le processus dit *orthophotographique* qui, à partir d'un modèle spatial formé dans un appareil de restitution, effectuée, par tous petits éléments, un « redressement différentiel » d'un des clichés, le rapport d'échelle entre ce cliché et l'image redressée variant constamment en fonction du relief. Ce procédé, bien au point dans le domaine topographique, s'applique plus difficilement aux relevés d'architecture en raison des discontinuités du sujet. Cependant, dans certains cas favorables, d'intéressants résultats ont été obtenus au cours des dernières années. Après les essais des Officine Galileo sur la coupole de Santa Maria del Fiore à Florence [3], les travaux de M. Döhler à Karlsruhe, de J. Jachimski et Z. Sitek à Cracovie, de E. Seeger à Stuttgart ont montré les possibilités de l'orthophotographie dans le relevé de murs complexes présentant un appareil irrégulier et dans celui du décor, notamment des ornements en stuc baroques.

Dans cet article, il sera essentiellement question de relevés appartenant aux deux premiers types : relevés stéréophotogrammétriques graphiques et relevés photogrammétriques numériques. Ces relevés concernent deux grands domaines d'application : les monuments et les centres historiques.

## MONUMENTS

### *Formes et structures*

L'extension des domaines d'application de la photogrammétrie concerne d'abord les études de *structure des monuments*. Les méthodes numériques, qu'elles

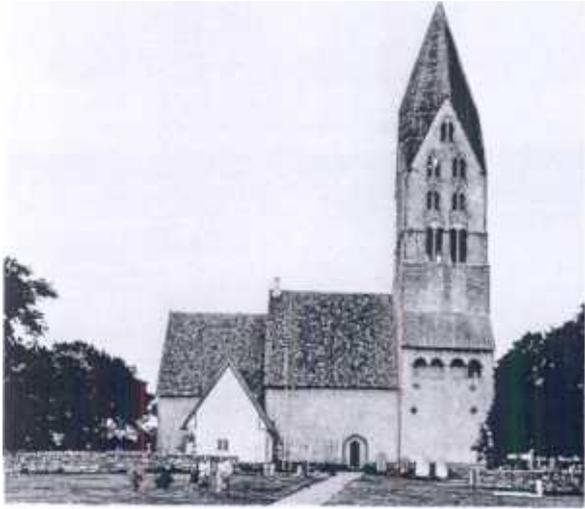


Fig. 2 - L'église de Tingstade (Suède), 13<sup>e</sup>-14<sup>e</sup> siècles.

soient analogiques ou analytiques, trouvent ici leur meilleur emploi. Elles permettent en particulier de définir le *schéma numérique* d'un édifice, caractérisé par un ensemble de points fondamentaux qui en constituent l'ossature et à partir desquels on pourra, par des calculs appropriés, étudier des proportions, définir des volumes, comparer différentes structures, etc.

Ces méthodes donnent la possibilité d'une analyse fine des principaux éléments constitutifs d'un édifice dans son état actuel, celui de la date de la prise de vues. Nous en prendrons pour exemple le relevé analytique de la tour de l'église de Tingstade (Suède) effectué en octobre 1971 par l'architecte Gunnar Redelius, du Service central des monuments historiques de Stockholm. Située dans la partie septentrionale de l'île de Götland, cette église (fig. 2) a été bâtie, dans ses parties les plus anciennes, au début du XIII<sup>e</sup> siècle. La moitié inférieure de la tour date du milieu du même siècle, tandis que la moitié supérieure a été construite au cours du XIV<sup>e</sup> siècle. Si cette partie haute est en bon état, il n'en est pas de même de toute la base de la tour dont les murs, renforcés en 1872 par de forts tirants de fer, sont inclinés et gauchis de manière inquiétante. Ces murs se sont-ils déformés après la surélévation du 14<sup>e</sup> siècle, les soubassements n'étant pas en mesure d'en supporter le poids considérable? Le monument continue-t-il à évoluer?

Le relevé photogrammétrique analytique a porté sur environ 120 points répartis sur la tour et même sur le toit, car il est prévu de remplacer la couverture, qui date de 1872 et dont il faut connaître la forme extérieure. Les résultats du relevé, représentés graphiquement par la figure 3, sont les suivants :

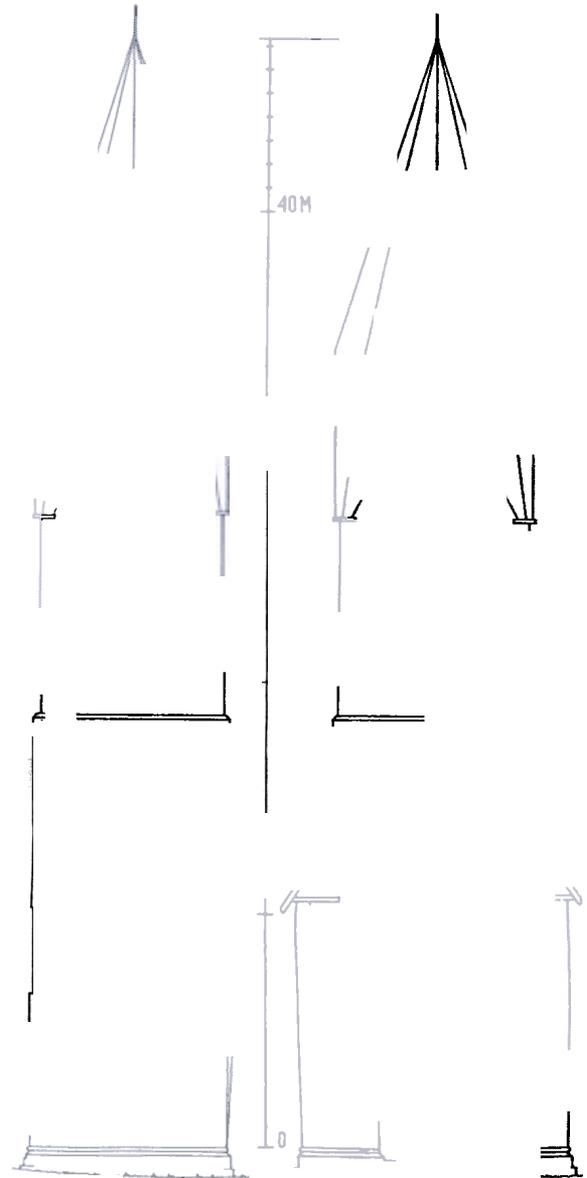


Fig. 3 - Expression graphique du relevé photogrammétrique analytique de la tour de l'église de Tingstade.

- Dans la partie inférieure de la tour, le soubassement est affaissé de 5 cm dans l'angle Sud-Ouest, de 8 cm dans l'angle Nord-Ouest. La chaîne de l'angle Sud-Ouest est légèrement inclinée de 8 cm vers l'Ouest; celle de l'angle Nord-Ouest est fortement inclinée vers le Nord-Ouest (29 cm); celle du Nord-Est penche vers l'Ouest de 22 cm. Immédiatement au-dessus du portail, on constate un renflement de 24 cm dans la maçonnerie.
- Les murs de la moitié supérieure de la tour sont, par contre, parfaitement verticaux et ne présentent aucune déformation.

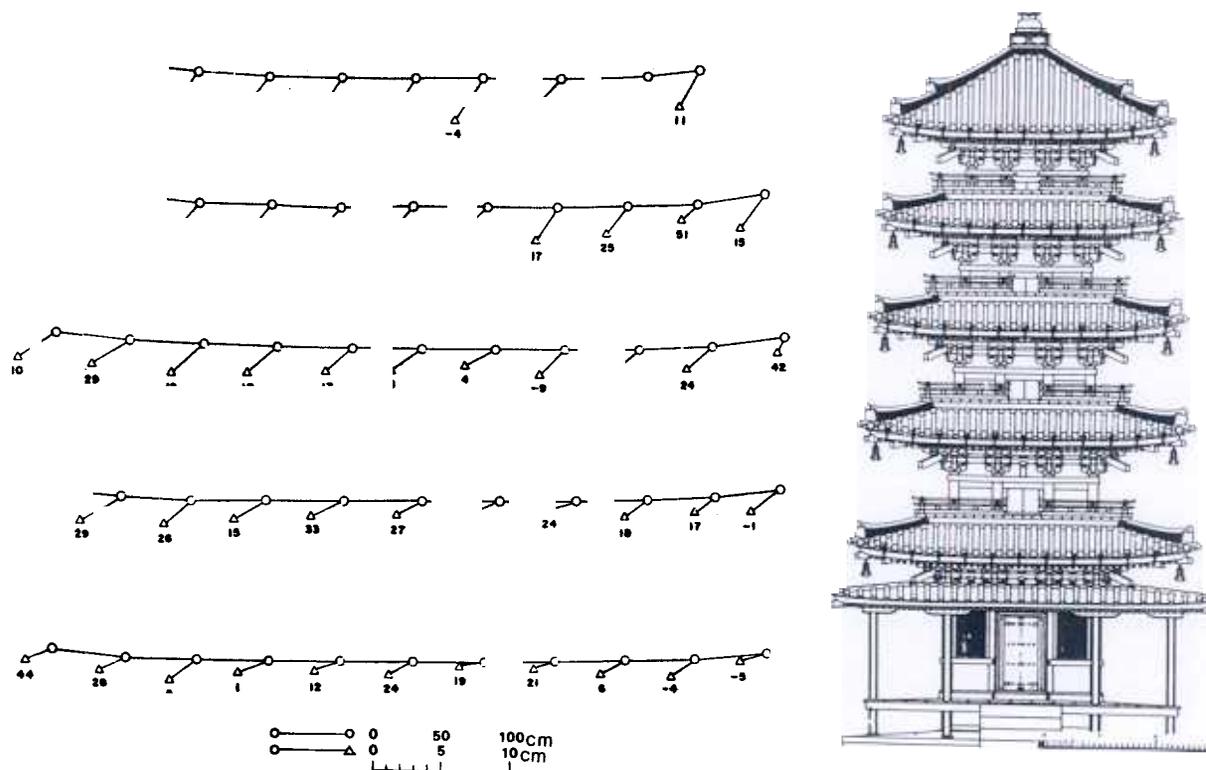


Fig. 4 - Mesures, par stéréophotogrammétrie analogique numérique, des déformations de la pagode de Kaijusanji (Japon) d'octobre 1963 à octobre 1968.

On peut donc conclure que la partie basse, faite en maçonnerie grossière, a été dès l'origine mal bâtie, mais qu'elle n'a subi aucune déformation ultérieure, en particulier lors de la construction de la partie haute de la tour, ce que confirme le fait qu'elle ne soit pas fissurée. Des mesures ultérieures, ramenées au même système de référence, pourront indiquer s'il se produit des déplacements dans la maçonnerie et, à cette fin, certains points déterminés ont été matérialisés par des goujons d'acier introduits dans la muraille; pour ces points bien définis, la précision de la mesure est de quelques millimètres.

Pour les mesures successives destinées à suivre l'évolution d'un édifice et à en mesurer les déformations entre deux séries d'observations, c'est encore à la photogrammétrie numérique qu'il faut faire appel. C'est ainsi qu'au Japon, le Nara National Research Institute of Cultural Properties a relevé et comparé, par stéréorestitution analogique numérique, deux états successifs de la pagode de Kaijusanji, à cinq années d'intervalle (octobre 1963 - octobre 1968) [4]. La figure 4 donne une expression graphique de cette mesure pour la face Nord, mesure dont la précision est estimée à quelques millimètres. On constate que la déformation des bords des toits augmente d'étage en étage,

la moyenne croissant de 7 mm au premier étage, à 11, 15, 22 et 28 mm pour les second, troisième, quatrième et cinquième étages, c'est-à-dire que le tassement moyen pour chaque étage est de l'ordre de 4 à 7 mm. On voit également que ce tassement n'est pas uniforme mais présente des ondulations qui se cumulent d'étage en étage. Enfin on observe que l'affaissement de chaque bordure de toit s'accompagne d'un mouvement horizontal dont l'amplitude absolue pour les cinq étages est respectivement de 18, 20, 19, 19 et 20 mm; d'où l'on conclut aisément que ce dévers s'est produit au premier étage et a entraîné les parties supérieures. Les mesures étant tridimensionnelles, les composantes des déplacements dans la direction orthogonale sont également déterminées: elles montrent un mouvement vers le Sud, particulièrement accentué au second étage et décroissant ensuite.

La combinaison des méthodes géodésiques et des méthodes photogrammétriques peut apporter une heureuse solution au contrôle de la stabilité d'un monument. Si les mesures doivent porter sur un nombre élevé de points, la photogrammétrie analytique dont la précision, moyennant certaines précautions, peut être égale à celle des déterminations géodésiques, permet une plus grande rapidité des opérations sur place, la

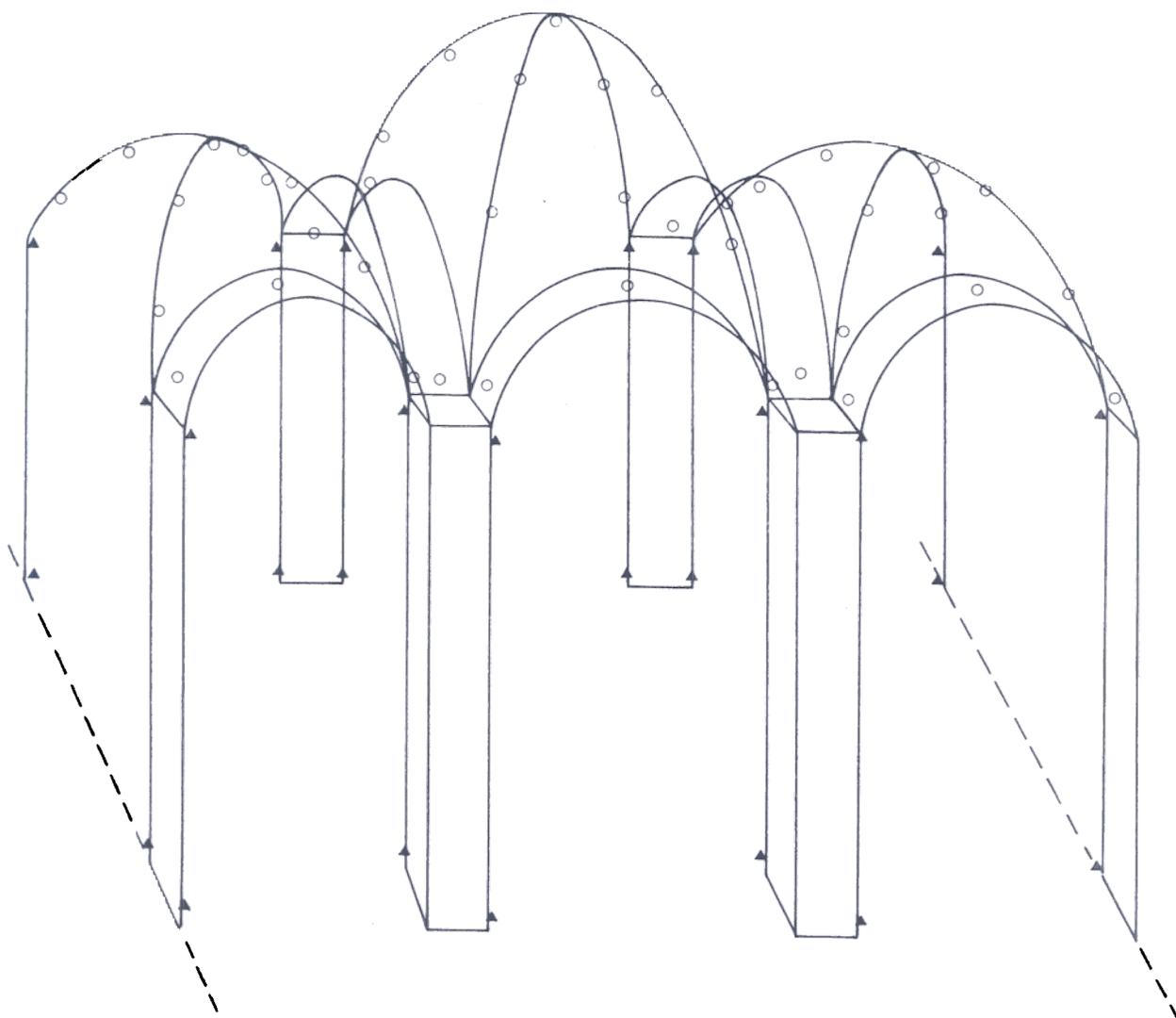


Fig. 5 - Basilique de Saint-Denis (France). Contrôle de stabilité par photogrammétrie analytique. Narthex: points de contrôle sur les piliers (triangles noirs) et sur les voûtes (cercles blancs).

saisie instantanée de l'état de l'édifice et l'archivage de cet état, pour lequel on pourra toujours reprendre les mesures à partir des photographies si des déformations constatées lors d'un contrôle ultérieur rendent nécessaires un complément de données métriques. Les mesures géodésiques, réduites au strict minimum, donnent l'ossature, le canevas principal du relevé sur lequel la restitution photogrammétrique analytique s'appuie pour la détermination d'un aussi grand nombre de points qu'il est nécessaire. Un travail de ce type a été effectué par le Service de Photogrammétrie de l'Institut Géographique National français (I.G.N.) pour la surveillance de la façade et du narthex de la Basilique de Saint-Denis, près de Paris, en raison de travaux de prolongement d'une ligne souterraine du

«Métro» (fig. 5). Trois campagnes de mesures ont montré que ces travaux n'avaient pas eu d'incidence sur la stabilité du monument.

La stéréorestitution graphique ne permet jamais d'atteindre une précision égale à celle des méthodes numériques. Elle a l'avantage, par contre, de pouvoir donner une meilleure représentation d'ensemble du monument et, si les déformations de celui-ci sont importantes, elle peut les mettre immédiatement en évidence et suffire à leur mesure. Un exemple d'emploi de la photogrammétrie graphique, dans le double but de constituer une documentation précise d'un édifice et d'étudier son évolution, est donné par le relevé du pont métallique en fonte de Coalbrookdale (Shropshire, Grande-Bretagne) sur la rivière Severn [5]. Ce

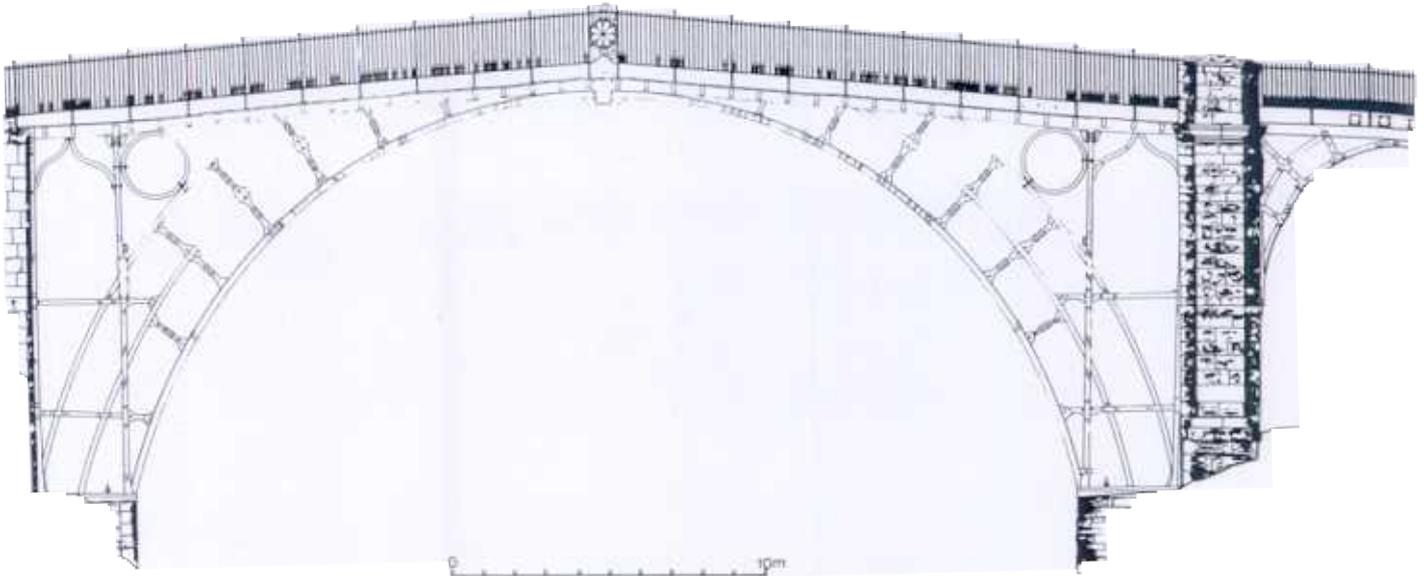


Fig. 6 - Relevé photogrammétrique du pont « Iron Bridge » à Coalbrookdale (Grande-Bretagne) (1779). Remarquer les déformations de l'arche dans sa partie supérieure.

Fig. 7 - Pont d'Epsom (Grande-Bretagne) (vers 1860). Les profils indiqués par des marques blanches ont été relevés photogrammétriquement en vue de travaux de consolidation.



Le pont (fig. 6) est probablement le plus ancien ouvrage de ce type puisqu'il a été achevé par Abraham Darby en 1779; on pense que la conception en est due à l'architecte Thomas Pritchard. L'intérêt du relevé pour l'histoire de la technique architecturale ne fait pas de doute. Mais il se trouve également qu'un affaissement de la berge Sud a provoqué une déformation du sommet de l'arche: appuyé sur un canevas de points d'appui déterminé par micro-géodésie, le relevé servira également à la surveillance de l'ouvrage et à l'étude de sa conservation et de son éventuelle consolidation. Exécuté, à l'échelle de 1:50, par Hunting Survey Ltd pour le Département de l'Environnement, il sera répété afin de mesurer les nouvelles déformations qui pourraient se produire.

C'est également la consolidation d'un autre pont ancien, celui d'Epsom (Surrey, Grande-Bretagne) qui a conduit au relevé photogrammétrique de la forme de son arche. Construit en briques peu avant 1860, ce pont de chemin de fer (fig. 7) présente d'importantes fissures qui se sont rapidement étendues depuis 1966. Exécuté par Fairey Surveys Ltd pour les Chemins de Fer britanniques, le relevé à 1:12 de huit profils (indiqués par des marques blanches sur la voûte) a permis d'étudier la forme optimale des plaques d'acier nécessaires à la consolidation de l'ouvrage.

Il s'agit donc ici de mesurer la forme effective actuelle d'un élément architectural. C'est, en fait, l'objet même de tout relevé photogrammétrique, mais il paraît intéressant de souligner l'un des avantages de la méthode: la possibilité de sélectionner, lors de la restitution, les éléments nécessaires à une étude de structure, alors que la totalité des surfaces et des volumes bâtis a été enregistrée sur les stéréogrammes. La figure 8 donne un exemple d'un travail de ce type exécuté par le Centre de Photogrammétrie Architecturale et Archéologi-

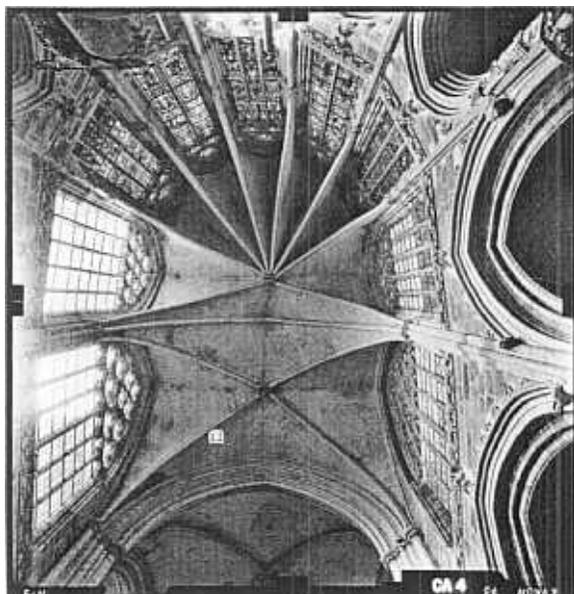
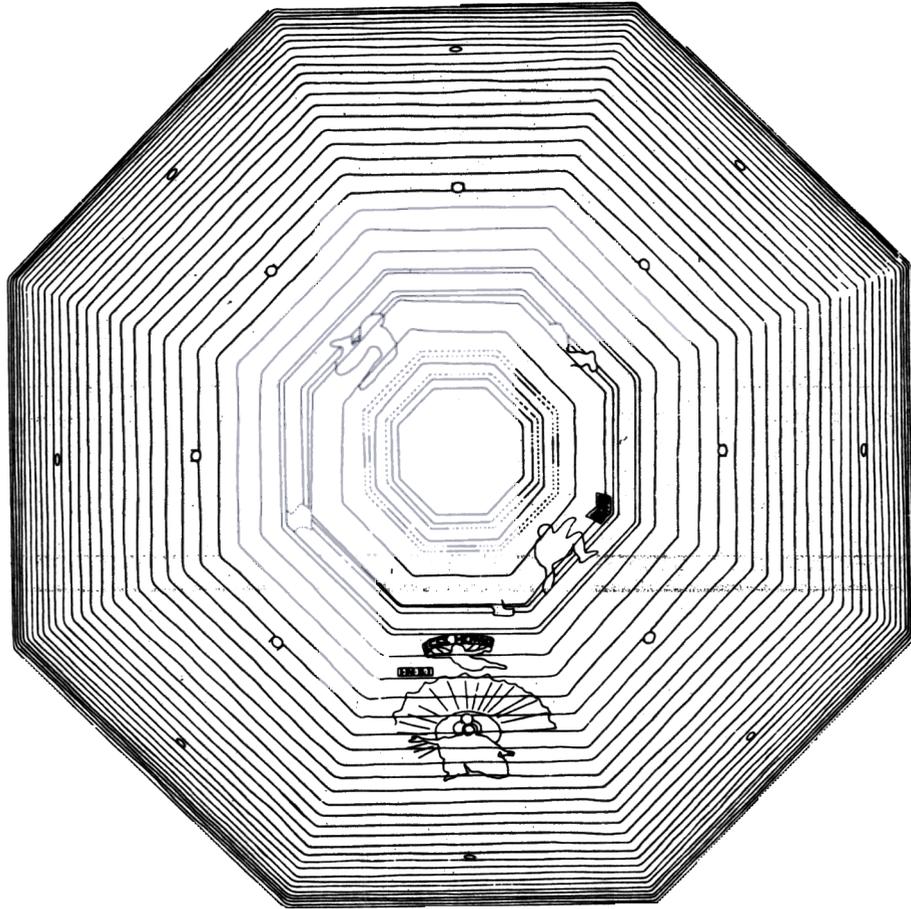


Fig. 8 - Evron (France), basilique Notre-Dame de l'Épine. Relevé photogrammétrique des voûtes du chœur. Les profils des arcs ont été relevés, à partir de couples de photographies à axe vertical (a), par une restitution stéréophotogrammétrique numérique suivie d'un dessin à la table traçante automatique (b).

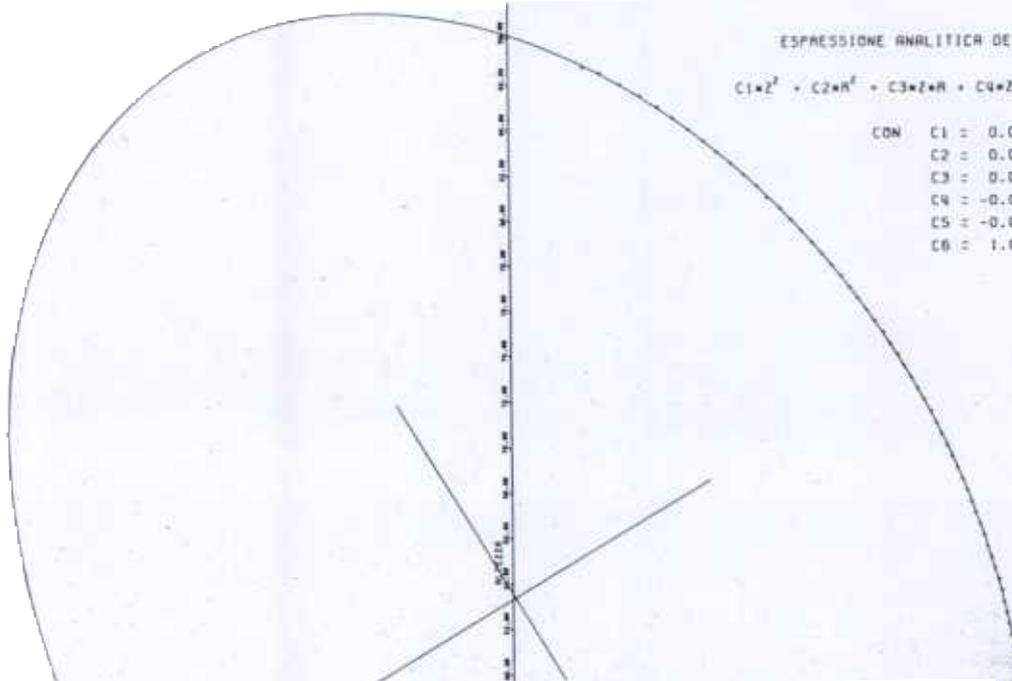
que (C.P.A.A.) de l'I.G.N. pour le Centre de Recherches sur les Monuments Historiques (C.R.M.H.): dans la basilique Notre-Dame à Evron (Mayenne, France), les éléments structurels du chœur ont été relevés sous forme d'un plan des voûtes, avec courbes de niveau, et de profils des arêtes des arcs et des piliers. Pour les profils, une difficulté résulte de leur disposition rayonnante ou croisée; pour pouvoir les obtenir directement par stéréorestitution graphique, il eut fallu multiplier les bases de prise de vues afin de mettre chacune d'elles dans un plan approximativement parallèle ou perpendiculaire au plan d'un profil. La photogrammétrie numérique permet de résoudre cette difficulté: les profils ont été relevés par enregistrement des coordonnées tridimensionnelles d'un grand nombre de points dans le système d'axes de l'appareil de restitution, suivi d'un calcul de transformation de coordonnées à l'ordinateur, puis d'un dessin à la table traçante automatique.

Mais la photogrammétrie numérique permet d'aller plus loin que le simple relevé d'une forme actuelle en fournissant toutes les données nécessaires à la *recherche des formes géométriques* selon lesquelles ont été conçus et réalisés certains éléments architecturaux. Cette recherche a été effectuée, en différents endroits, pour des grandes coupôles. Il y a plus de dix ans, l'Institut de Photogrammétrie de Karlsruhe (R.F.A.) avait effectué un relevé numérique du dôme de Saint-Pierre de Rome qui avait montré que les nervures extérieures de ce dôme sont toutes des arcs de cercle de 33 mètres de rayon, les écarts à la forme circulaire théorique n'excédant pas 7 centimètres. Mais nous voulons attirer plus particulièrement l'attention sur les relevés photogrammétriques des coupôles florentines de la Renaissance effectués depuis quelques années par les Officine Galileo, la Faculté de Génie Civil de l'Université de Florence et le Centre de calcul électronique de l'Université de Pise.

Le premier travail a porté sur la célèbre coupole de Brunelleschi qui domine la cathédrale Santa Maria del Fiore: relevé extérieur à l'aide de photographies prises du campanile de Giotto et relevé intérieur à partir de clichés à axes verticaux pris sous le dôme. Outre des tracés graphiques et une représentation en courbes de niveau de la surface intérieure, une restitution analogique numérique des nervures (extérieur) et des arêtes (intérieur) a été effectuée, donnant pour chacune d'elles les coordonnées tridimensionnelles de soixante points. On a ensuite recherché, par le calcul sur ordinateur, la courbe géométrique simple qui passe au mieux par l'ensemble de ces points selon la théorie dite « des moindres carrés », la courbe optimale étant celle pour laquelle la somme des carrés des distances de chaque point restitué à la courbe est minimale. Ce calcul a conduit à une conique, plus exactement une ellipse, que la figure 9 représente pour une des arêtes intérieures et dont elle donne les coefficients de son expression analytique. Ces coefficients et, par conséquent, l'excentricité de l'ellipse ont été trouvés



1



ESPRESSIONE ANALITICA DEL PROFILO

$$C1 \cdot Z^2 + C2 \cdot R^2 + C3 \cdot Z \cdot R + C4 \cdot Z + C5 \cdot R + C6 = 0$$

CON C1 = 0.000293  
 C2 = 0.000396  
 C3 = 0.000194  
 C4 = -0.037200  
 C5 = -0.012354  
 C6 = 1.000000

2

légèrement différents pour chaque nervure en raison, expliquent les auteurs, de la forme irrégulière de l'octogone de base et du décentrement de la lanterne qui couronne la coupole (ce décentrement a été montré, pour la première fois, par le relevé photogrammétrique [3-6-7-8]). Les écarts à la courbe théorique restent toujours très faibles (quelques centimètres en moyenne), mais présentent toutefois certaines discontinuités.

Nous devons à la vérité de dire que, sans que soient remises en cause les données de la stéréorestitution numérique, les résultats du calcul sont contestés par d'autres chercheurs qui aboutissent à une forme circulaire, plus conforme d'ailleurs, selon eux, à toutes les connaissances acquises sur l'œuvre de Brunelleschi [9-10]. Ce désaccord porte essentiellement sur le traitement mathématique du modèle numérique des nervures obtenu par photogrammétrie et non pas sur la précision de ce modèle.

A vrai dire, l'examen des paramètres qui les définissent montre que, dans la partie correspondant à la nervure, les deux courbes, l'ellipse et le cercle, sont extrêmement voisines.

Plus importante est l'analyse statistique des résultats numériques du relevé à laquelle les auteurs ont ensuite procédé [8]. Cette analyse a montré l'existence de faibles discontinuités de caractère périodique dans les profils de la construction, discontinuités qui semblent apparaître régulièrement à des intervalles de hauteur de 7,50 mètres.

L'étude photogrammétrique des coupoles de Florence s'est poursuivie par le relevé de celle qui surmonte le chœur de la basilique de SS. Annunziata. Il est projeté également de relever les coupoles du baptistère San Giovanni, de la sacristie de San Lorenzo et de la chapelle des Pazzi dans le cloître de Santa Croce. Il s'agit donc d'une très intéressante contribution de la photogrammétrie à une étude historique d'architecture et, tout particulièrement, de l'architecture de Brunelleschi.

Enfin, dans ces études photogrammétriques de formes et de structures, nous voudrions mentionner simplement la recherche entreprise par le C.P.A.A. de l'I.G.N. à la demande du Centre de Recherches sur les Monuments Historiques, en vue d'élaborer une méthode basée sur la photogrammétrie et l'informatique pour l'analyse statique des structures architecturales voûtées. Il s'agit, à partir d'un modèle numérique de la surface ou du volume concerné, modèle formé d'un « semis de points » dont la densité et la disposition seront adaptées à chaque type de structure, de calculer les divers éléments (poids, sections, etc.) qui déterminent les canaux de passage des funiculaires de charge

et les forces exercées sur les supports et les contre-forts. On peut espérer que cette méthode permettra de parvenir à une connaissance plus précise des conditions d'équilibre et facilitera les travaux de consolidation et de restauration.

#### *Conception des relevés photogrammétriques des monuments. Evolution des idées*

Le développement de la photogrammétrie architecturale depuis quelques années est tel qu'il n'est sans doute pas mauvais de faire une pause et de réfléchir sur le rôle de la photogrammétrie dans la conservation et l'étude historique des monuments et, par conséquent, sur l'adaptation de la technique de relevé aux véritables besoins des spécialistes de cette conservation et de cette étude. Réciproquement d'ailleurs, l'expression de ces besoins peut sans doute se trouver influencée par les nouvelles possibilités offertes par la technique. Ces préoccupations se développent actuellement et sont le signe d'une certaine « maturité » de la photogrammétrie architecturale. Elles ont été, en particulier, l'un des thèmes principaux du symposium international qui s'est tenu à Lucques (Lucca, Italie) du 23 au 26 septembre 1973.

Les dominantes de cette réflexion concernent :

- la difficile communication entre celui qui exécute le relevé photogrammétrique et celui pour qui il est exécuté;
- l'objectivité du relevé, qui est réelle pour la valeur géométrique des éléments restitués, mais qui peut ne pas l'être pour le choix et pour l'expression de ces éléments, avec les conséquences qui en résultent sur les problèmes de représentation, de tracé, de « facture »;
- la conception même du relevé photogrammétrique : *investigation totale* du monument, ou *investigation sélective*, ou mieux encore *investigation thématique* [11].

Cette dernière idée a été développée par le regretté Professeur R. de Vita, de l'Université de Bari. Dans le cadre d'une recherche sur les caractères architecturaux et la typologie des châteaux médiévaux des Pouilles, il s'est interrogé sur la *finalité* des relevés photogrammétriques qui, par rapport aux relevés traditionnels, fournissent sans nul doute un document plus scientifique, mais aussi plus « ascétique » et marquent peut-être une certaine « perte d'âme » [12]. On peut pallier ces inconvénients en finalisant le relevé par l'intervention de l'architecte lors de l'interprétation de l'image spatiale observée sur le stéréogramme, par la multiplicité des points de vue (c'est-à-dire des plans de référence) donnant une image plus « dynamique » de l'œuvre étudiée, par des restitutions thématiques portant sur les caractères architecturaux, sur les matériaux, sur les types de construction, sur la mise en valeur des principaux éléments ou groupes d'éléments, le tout en relation avec les valeurs technologiques,

Fig. 9 - Relevé photogrammétrique de la coupole de Santa Maria del Fiore à Florence. 1. Restitution de la coupole, intérieur (équidistance des courbes 1 m). 2. Profil d'une nervure calculé à partir d'une restitution photogrammétrique numérique.

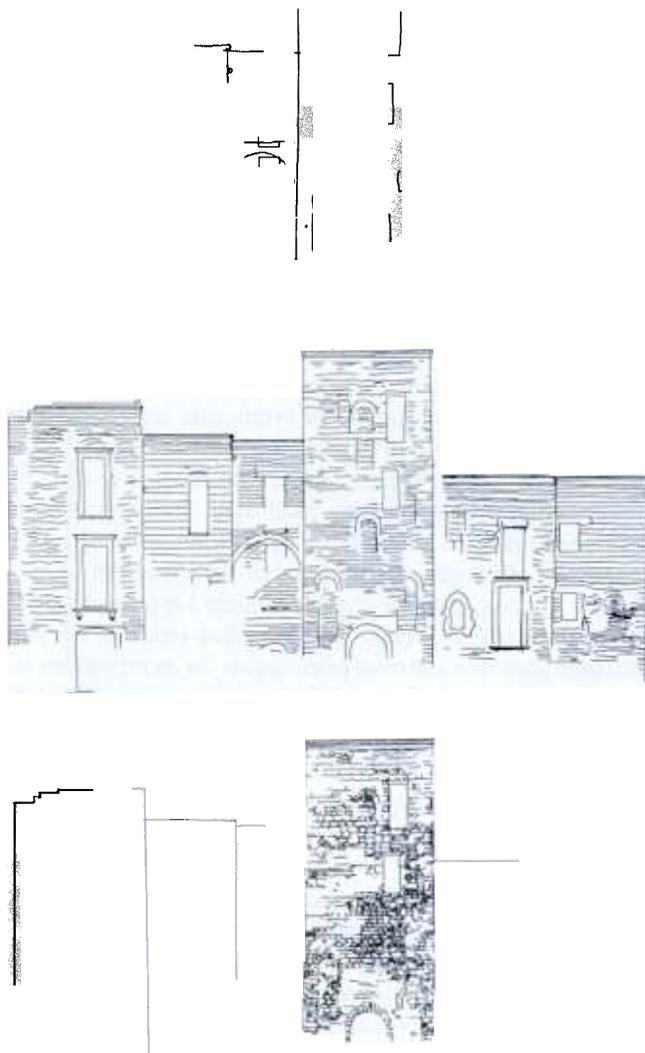


Fig. 10. - Centre historique de Bari (Italie), îlot 49, façade nord. Essai de restitution « finalisée » à partir d'un même couple de photographies. De haut en bas: - contour des volumes et rapport des surfaces vides aux surfaces pleines, - caractéristiques générales de l'appareil de construction (stratification), - relevé détaillé de l'appareil de la tour.

historiques et esthétiques de l'œuvre, sans oublier le cadre dans lequel elle s'inscrit.

Il est exact que l'un des apports les plus intéressants de la photogrammétrie est de permettre cette finalisation à partir d'une image spatiale quasi complète enregistrée lors de la prise de vues, c'est-à-dire lors de la constitution des « archives photogrammétriques » du monument. C'est pourquoi d'ailleurs il convient, selon une judicieuse remarque du Professeur G. Gullini, de l'Université de Turin, de parler d'une « restitution finalisée » plutôt que d'un « relevé finalisé ». La figure 10 présente un essai d'une telle restitution, effectué

par la Section stéréophotogrammétrique de l'Institut d'Architecture de l'Université de Bari. L'examen des trois tracés de cet essai conduit, par ailleurs, à une autre considération concernant la précision du relevé, les exigences relatives à cette précision pouvant ne pas être les mêmes selon qu'il s'agit, par exemple, des grandes masses de l'édifice ou de certains éléments caractéristiques de l'appareil, ou encore, pour d'autres monuments, du décor sculpté, des moulures, des corniches, etc. L'objectivité du relevé ne peut pas toujours se contenter de la précision homogène offerte par la photogrammétrie pour l'ensemble du monument: l'homogénéité restant, bien entendu, l'un des atouts majeurs de cette technique, il reste que, dans certains types d'architecture, une précision accrue dans la mesure de détails particuliers est capitale pour l'étude du monument et de sa conception architecturale. Le photogrammètre doit être informé de ces exigences et en tenir compte dans son schéma de relevé; la nécessité de son étroite collaboration avec l'architecte apparaît ici très clairement.

Cette collaboration serait peut-être encore plus évidente et plus indispensable si une autre conception du relevé photogrammétrique devait se développer. Nous voulons parler de l'extension des possibilités offertes à l'étude et à la conservation des monuments par la photogrammétrie numérique, l'informatique et l'automatisation, telle que la conçoivent le Dr. E. Cleur, le Prof. M. Fondelli et le Dr. F. Greco [13-14]. A partir des travaux réalisés sur la coupole de la cathédrale Santa Maria del Fiore à Florence, cette équipe, groupant photogrammètres et informaticiens, propose la constitution de *banques de données* des monuments et, en particulier, de *modèles numériques* à partir desquels on peut, automatiquement, obtenir une *description géométrique synthétique* d'un édifice, procéder à l'analyse de ses profils et de ses volumes, en suivre l'évolution dans le temps et les déformations sous l'effet des actions thermiques, des infiltrations d'eau, etc. De nombreux programmes d'utilisation d'une telle banque de données peuvent être écrits. Quelques-uns d'entre eux ont déjà conduit à d'intéressants résultats sur l'étude de la coupole de Florence, résultats qu'il est possible d'exprimer immédiatement sur une console de visualisation comportant un écran de télévision. Ainsi peuvent apparaître des profils, des courbes de niveau, des perspectives à partir de différents points de vue, des courbes exprimant le résultat d'analyses statistiques des valeurs numériques propres à certains éléments architecturaux, etc. (fig. 11). Cet outil de travail, proposé par des spécialistes de la mesure et du calcul, convient-il à l'architecte, au conservateur, à l'historien? La réponse à cette question ne peut sans doute être donnée qu'après une expérimentation plus développée de ces procédés, une accoutumance assez longue à leur emploi et une réflexion approfondie sur leur intérêt spécifique. Les prochaines années nous l'apporteront peut-être.

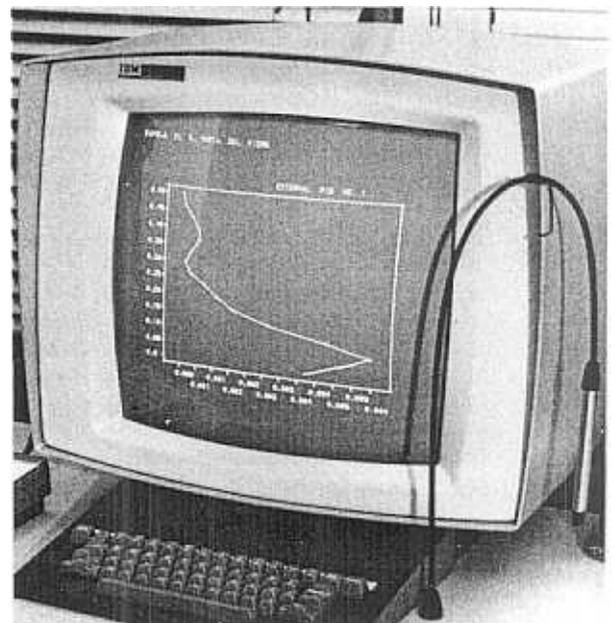
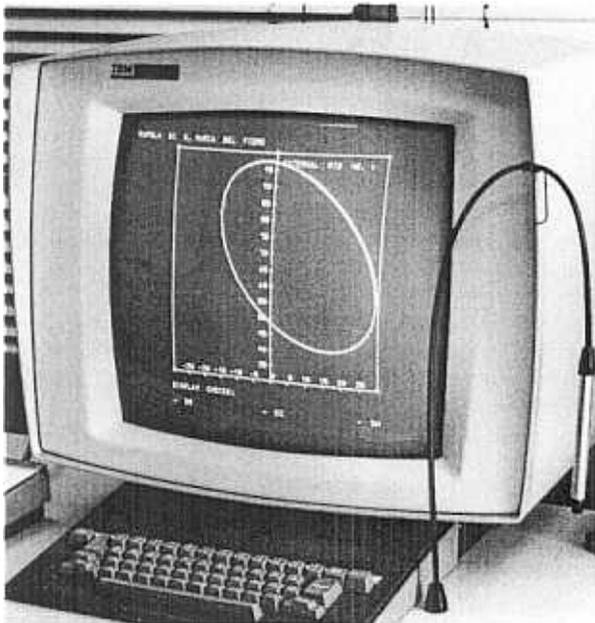
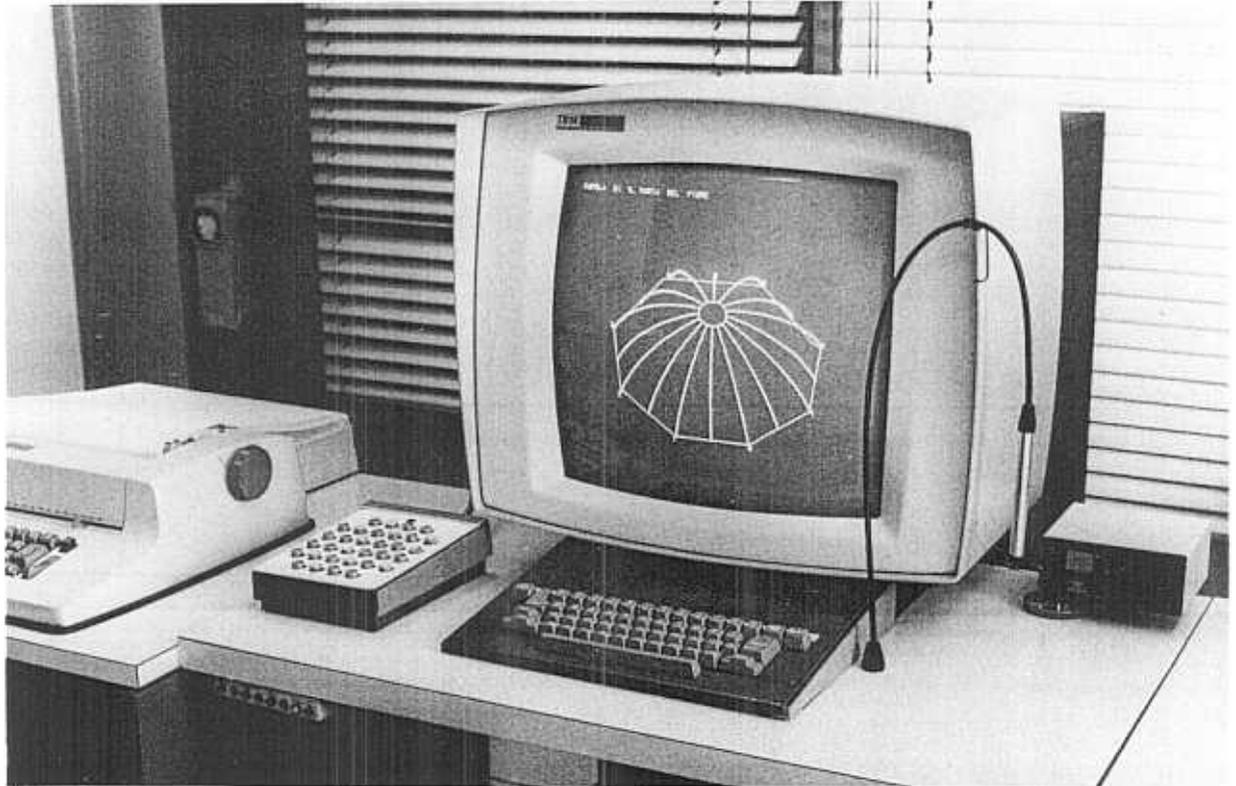


Fig. 11 - Traitement par l'informatique des données d'un relevé photogrammétrique numérique. Le modèle numérique d'un élément architectural étant mis en mémoire dans l'ordinateur ainsi que les différents programmes de traitement de ce modèle, on peut faire apparaître quasi instantanément sur un écran les résultats de différents

calculs. On voit ici, pour la cathédrale Santa Maria del Fiore à Florence, une perspective des profils internes de la coupole (voir figure 9), la courbe géométrique passant au mieux par les points relevés d'une nervure et le graphe de l'analyse statistique des écarts entre cette courbe et ces points.

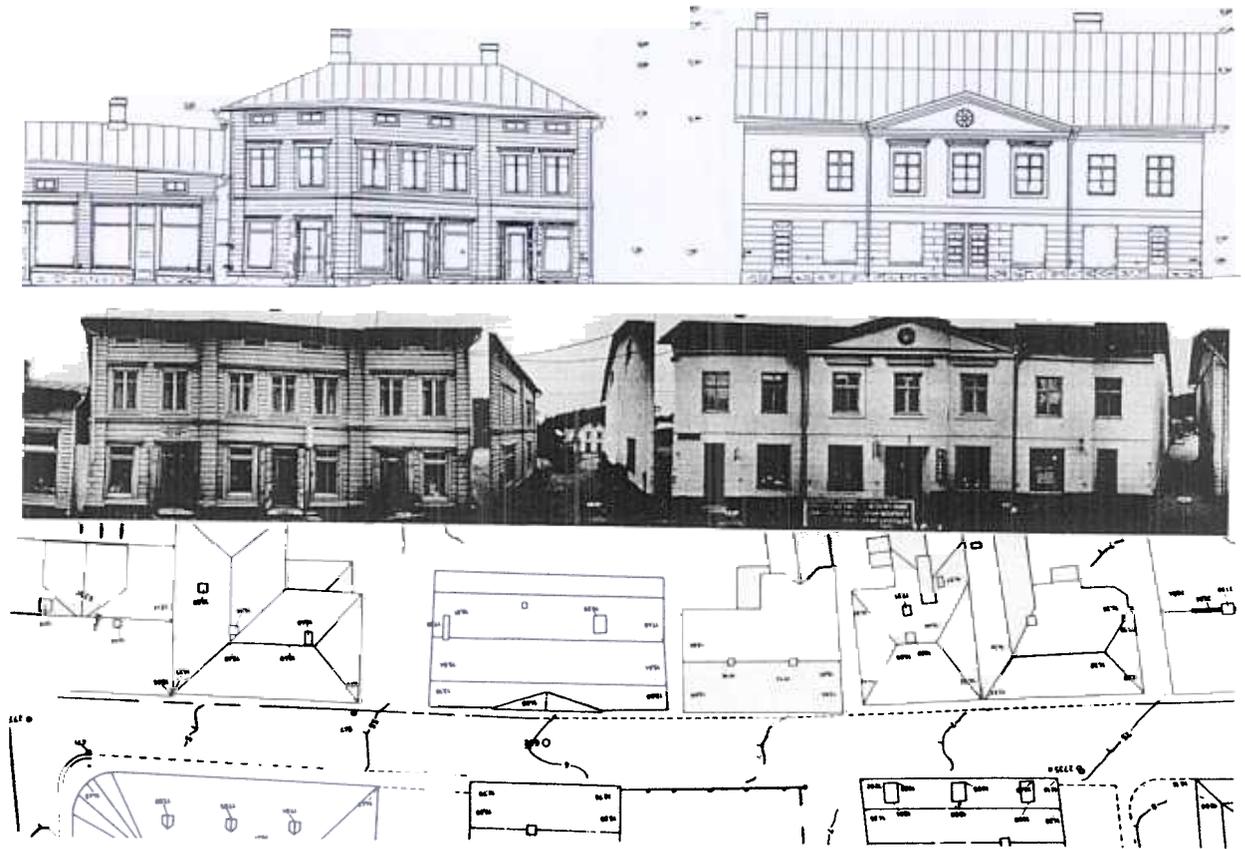
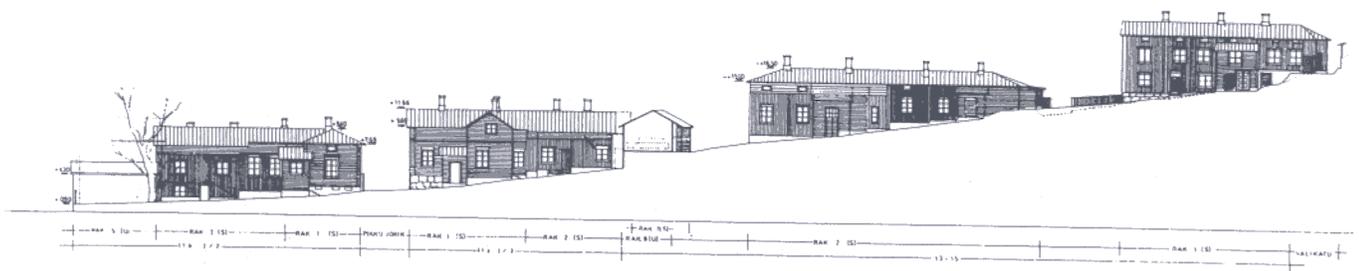


Fig. 12 - Relevé photogrammétrique d'un développement de façades à Porvoo (Finlande). Ce relevé (en haut) est obtenu par dessin à partir d'un assemblage de photographies redressées (au milieu) pour les façades elles-mêmes, et à partir d'un plan coté photo-aérien (en bas) pour les toits.

Fig. 13. Porvoo (Finlande). Développement de façade.



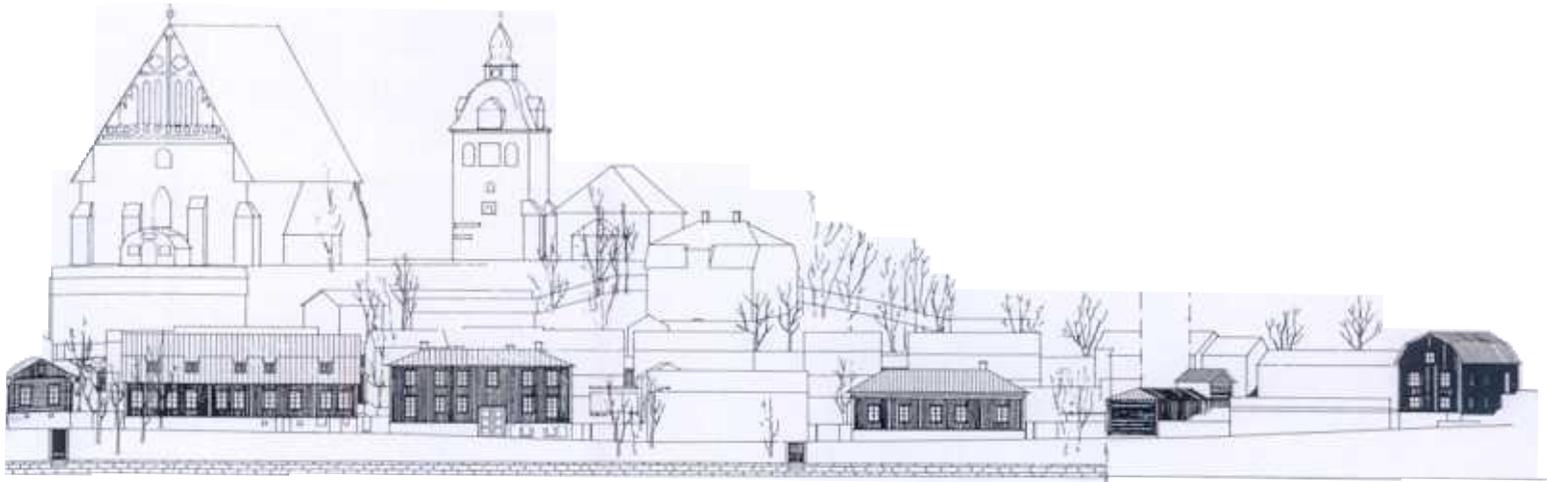


Fig. 14. - Porvoo (Finlande). Géométral d'un îlot voisin de la rivière.

## II CENTRES HISTORIQUES

### *Différents types de relevés photogrammétriques des centres historiques*

Dans notre article de 1969 [1], nous avons mentionné les principales méthodes photogrammétriques de relevé des *développements de façades* : stéréorestitution analogique, assemblage de photographies redressées, dessin sur photographies redressées en corrigeant les déformations perspectives des éléments en relief. Il convient d'ajouter ici la méthode analytique dont l'emploi, plus souple et sans doute plus rapide, peut être intéressant s'il s'agit d'un relevé à petite échelle d'édifices assez simples. Cette méthode est, en tout cas, employée systématiquement en Suède par le Service central des monuments historiques. L'une des applications les plus importantes concerne la ville de Trosa qui a fait l'objet, en 1970, d'un relevé complet et systématique à 1:100 de toutes les façades des rues et places [15].

Un relevé systématique de même nature a été effectué également pour le centre historique de la ville de Porvoo, en Finlande [16-17]. La technique, toutefois, est différente. Toutes les façades ont fait l'objet d'une prise de vues stéréophotogrammétriques. Après étude des photographies sous stéréoscope, le choix des ensembles de façades à relever, s'étendant sur une longueur totale de 4.350 mètres, a été fait et ces façades ont été traitées par redressement photogrammétrique et assemblage photographique à l'échelle de 1:50. Un dessin sur ces photoplans, réduit à 1:200, a donné le tracé des élévations. Pour les toits, on a utilisé les données d'un plan coté à la même échelle, établi par

stéréophotogrammétrie aérienne. La figure 12 montre le processus suivi, tandis que la figure 13 donne un exemple des relevés exécutés. De plus, le long de la rivière, le plan photo-aérien à 1:200 a servi à compléter le relevé des façades bordant le quai par un géométral d'ensemble de l'îlot (fig. 14).

Ces travaux sont l'œuvre de l'Institut de photogrammétrie de l'Ecole technique supérieure d'Helsinki. Ils ne sont qu'un des aspects de la documentation photogrammétrique destinée à l'étude du centre historique de Porvoo. Ce centre est un quartier en bois du 18<sup>e</sup> siècle, caractérisé par l'unité et l'harmonie des maisons et du matériau avec lequel elles ont été construites. Il doit être protégé, aménagé, remodelé, relié de façon judicieuse aux quartiers modernes qui l'entourent. Un plan directeur, approuvé en 1967, en préserve le caractère en conservant le réseau médiéval des rues et les maisons anciennes ayant un intérêt culturel ou historique, ou simplement en raison de leur intégration dans le tissu urbain ancien. C'est pourquoi un relevé stéréophotogrammétrique aérien (fig. 15 et 16) a été réalisé pour obtenir un plan topographique général. Ce plan a servi de base aux plans thématiques exprimant la valeur artistique et historique de chaque édifice, leur état de conservation (fig. 16), l'intérêt des itinéraires et des perspectives, etc; l'interprétation stéréoscopique des photographies aériennes a été largement utilisée pour établir ces plans thématiques.

Un autre type de document photogrammétrique peut apporter une importante contribution à l'analyse des centres historiques. Il s'agit des *élévations d'ensem-*

ble, ou géométraux, qui sont une projection horizontale de tout le volume bâti et de son site sur un plan vertical de direction choisie. « La beauté d'un paysage urbain comprend tout autant les vues *sur la ville* que celles de ses places, de ses rues, de ses quartiers » a rappelé une résolution du Symposium sur la régénération des sites historiques urbains, tenu à Prague en juin 1966 sous l'égide de l'ICOMOS. Cela est particulièrement vrai si le centre a une individualité propre : forteresse ou ville fortifiée, ensemble monastique (voir en [1], fig. 33), village-piton, etc. Il est alors parfois possible d'obtenir ce panorama « orthogonal », avec une parfaite rigueur géométrique, par photogrammétrie terrestre, un couple ou une série de couples stéréoscopiques à axes plus ou moins horizontaux étant pris à l'extérieur du centre. D'intéressants travaux de ce type ont été exécutés par la section photogrammétrique de la Faculté d'Architecture de Bari : front de mer de la ville de Bari, géométral du bourg d'Ostuni, dans la province de Brindisi (fig. 17).

Les prises de vues terrestres ne sont cependant qu'exceptionnellement réalisables, les conditions topographiques nécessaires étant rarement satisfaites. Ces prises de vues, d'autre part, évitent difficilement de nombreux « angles morts », les constructions se masquant les unes les autres. Enfin la précision du document établi ne sera pas homogène si le centre présente une grande profondeur.

La stéréophotogrammétrie aérienne offre une solution beaucoup plus universelle. Le modèle formé dans un appareil de restitution analogique peut, en effet, être exploré dans ses trois dimensions X Y Z et le géométral que l'on veut obtenir n'est autre que la projection de ce modèle sur un plan vertical. Si l'opérateur suit, avec son index de pointé stéréoscopique, le contour vertical de tous les éléments formant le volume bâti, la table traçante de l'appareil dessine l'élévation, pourvu que l'un des deux plans verticaux du système d'axes instrumental ait été rendu parallèle à la direction du plan de référence choisi pour cette élévation et que l'on puisse transmettre à la table traçante les mouvements X et Z ou Y et Z et non pas seulement X et Y comme il est d'usage pour la restitution des plans topographiques. Mais de nombreux appareils peuvent recevoir les modifications nécessaires à cette permutation des trois mouvements directeurs.

On conçoit qu'il est également possible, par ce processus, d'établir une *coupe générale* du centre historique, l'index stéréoscopique suivant alors le contour des constructions et des rues dans un plan vertical donné. Ces coupes peuvent également suivre un mouvement de terrain ou un itinéraire défini par des rues, etc. Elles permettent de préciser les *profils* du centre.

Comme, d'autre part, la restitution des photographies prises d'avion est utilisée habituellement pour obtenir des plans, on voit que la stéréophotogrammétrie aérienne permet d'exprimer le volume d'un centre historique par une représentation en plans-coupes-



Fig. 15. Porvoo (Finlande). Vue aérienne du centre historique.

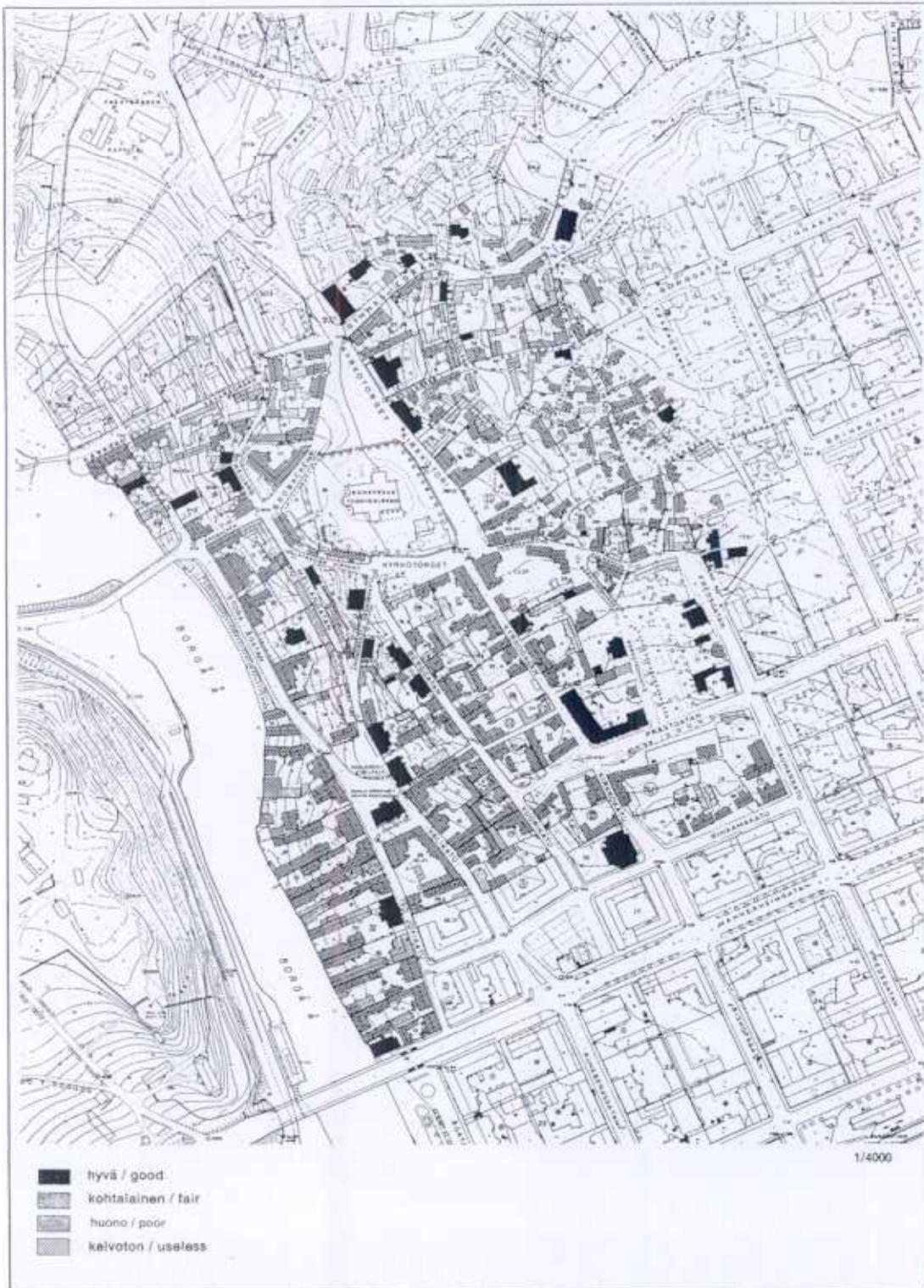


Fig. 10. (Finlande) morphologie urbaine et altimétrie surcharge, état des lieux

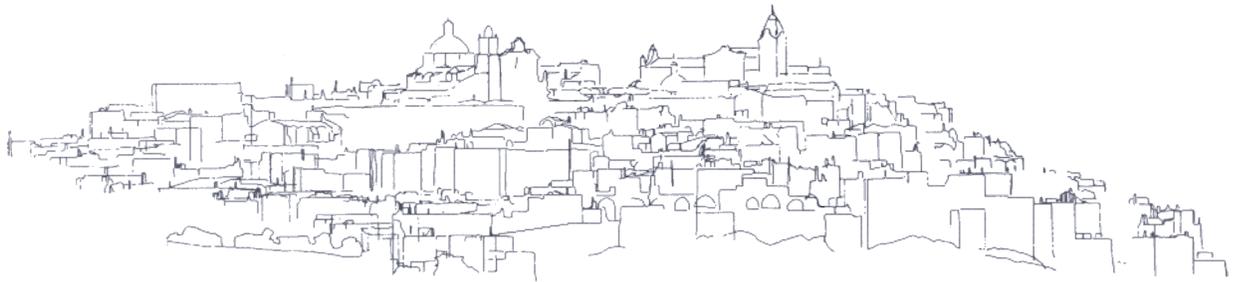
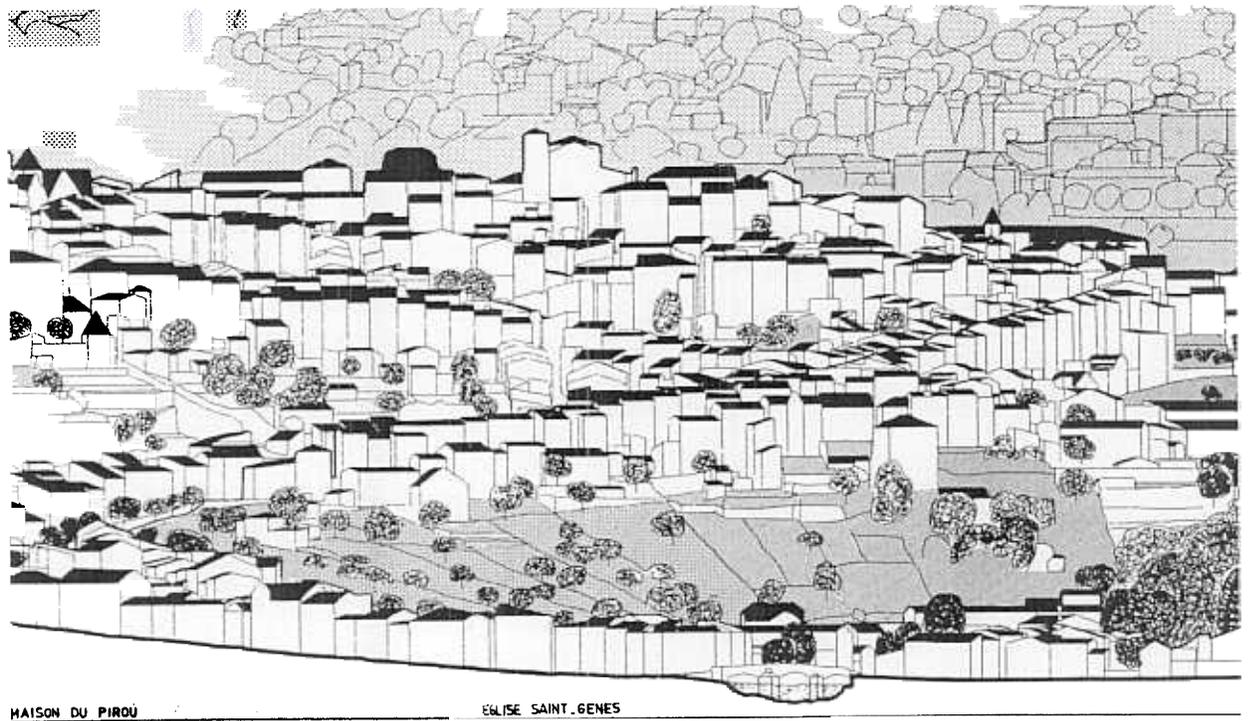


Fig. 17. - Ostuni (province de Brindisi, Italie). Géométral d'ensemble établi par stéréophotogrammétrie terrestre.

Fig. 18. Thiers (France). Fragment du géométral Ouest, interprété par l'architecte.



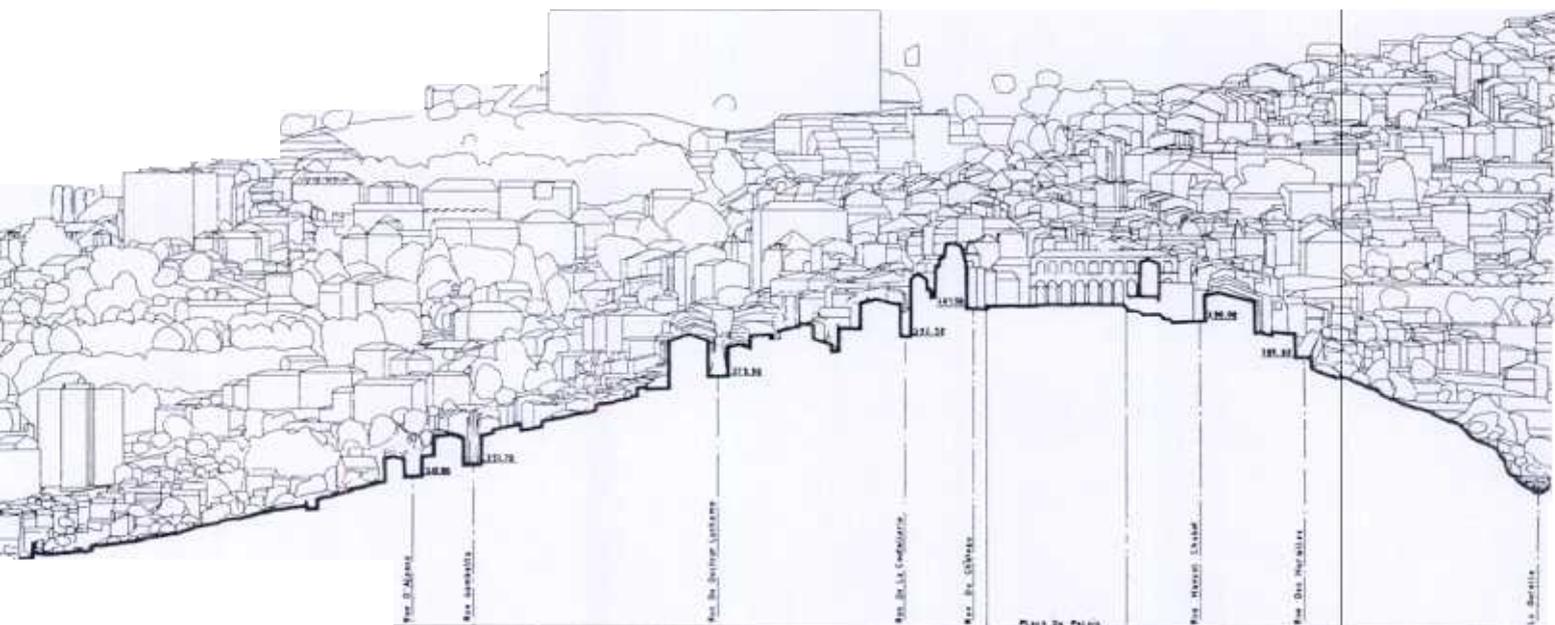


Fig. 19. - Thiers (France). Combinaison d'une coupe Est-Ouest et du géométral Sud (le grand rectangle au centre du géométral est un bâtiment moderne).

*élevations* identique à celle qui est traditionnellement adoptée pour l'étude des monuments et, par conséquent, d'ajouter au plan, avec la même précision, la troisième dimension. On peut ainsi saisir objectivement, géométriquement, les positions relatives des volumes urbains, leurs silhouettes, leurs dominantes. Cette conception, due à M. Bertrand de Tourtier, architecte urbaniste, a déjà conduit à d'intéressants résultats [18]. Plus encore, la combinaison de deux des sorties de l'appareil de restitution, X et Z ou Y et Z, à l'aide d'un différentiel qui commande le déplacement du traceur du coordinatographe dans l'une de ses directions, tandis que l'autre direction reste liée sans intermédiaire au mouvement Y ou X, permet de restituer directement une *vue axonométrique* lorsque l'opérateur suit avec son index stéréoscopique n'importe quelle ligne des constructions, des chaussées et même de la végétation. Ainsi se trouve réalisée, selon une idée de M. Bernard Fonquernie, architecte en chef des monuments historiques, une autre extension à un centre historique d'un mode de représentation couramment employé pour les monuments.

Toutes ces idées ont été réalisées techniquement par le C.P.A.A. de l'I.G.N. [19, 20]. Nous présentons ici quelques exemples de ces réalisations qui concernent :

- La ville de Thiers; pour laquelle on peut voir un

fragment de géométral «interprété» (fig. 18) et la combinaison d'une coupe et d'un géométral (fig. 19);

- La ville de Moulins; dans cette ville de faible relief, pour laquelle les «vues sur la ville» n'auraient pas grande signification, la solution retenue a consisté, selon M. de Tourtier, «à représenter les écrans successifs constitués par les masses bâties, examinées depuis l'intérieur de la ville», les premiers plans étant formés par les façades bordant des rues orientées sensiblement selon trois axes dont les directions recoupent tous les éléments architecturaux principaux (fig. 20), et à établir «plusieurs projections géométrales montrant à la fois les alignements des principaux tracés et l'élevation de tous les arrières-plans»; ces géométraux (fig. 21) ont permis de définir des règles architecturales à respecter dans le centre de Moulins et, en particulier, un plan d'épannelage des hauteurs de constructions admissibles dans le centre et ses abords (fig. 22).

- L'Acropole d'Athènes, dans le cadre d'un relevé général du site et des monuments confié à l'I.G.N. par l'UNESCO à la demande du gouvernement grec; on voit ici la gamme des documents: fragment d'une photographie aérienne (fig. 23), fragment correspondant du plan (fig. 24), coupe Nord-Sud (fig. 25) et fragment du géométral Sud (fig. 26).

- La ville d'Auxerre, pour laquelle fut établie une vue

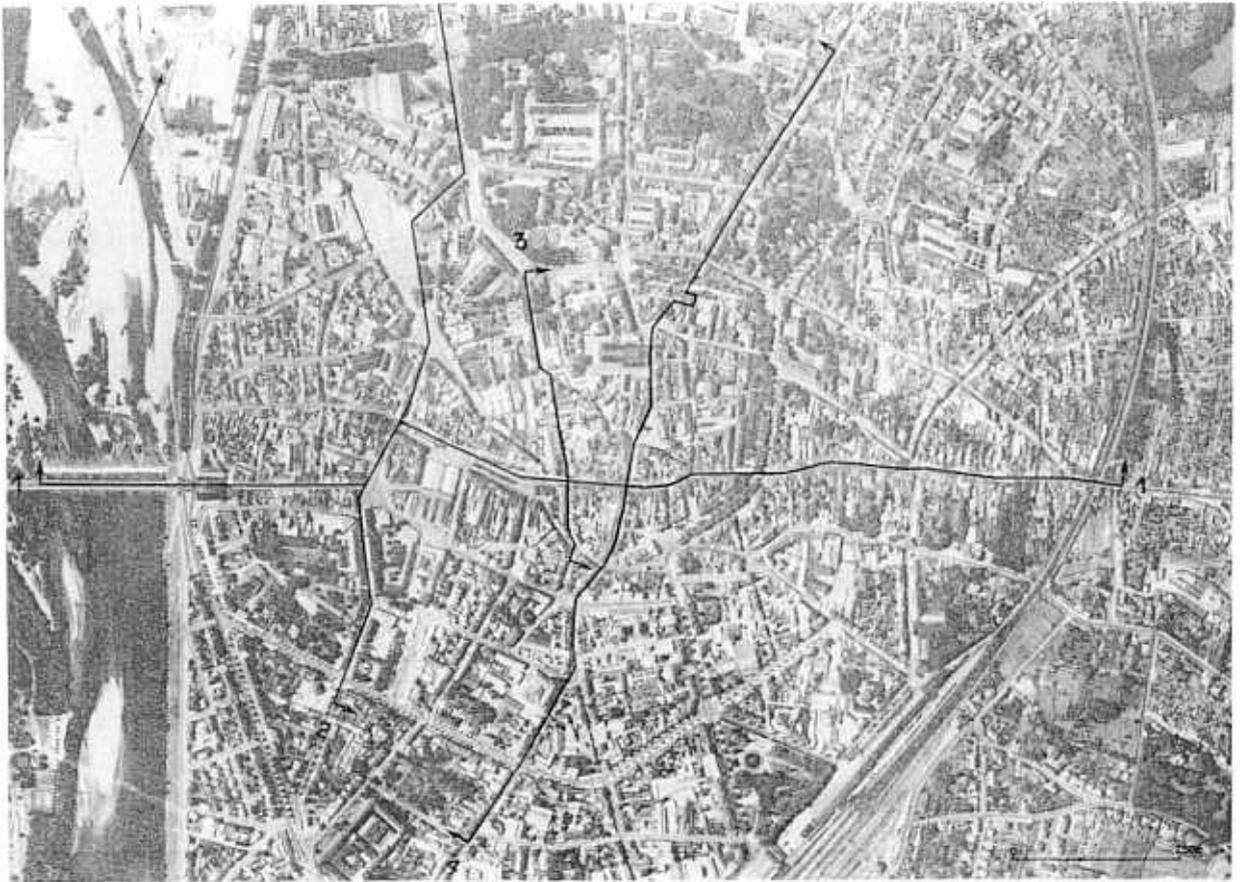


Fig. 20. - Moulins (France). Photographie aérienne du centre de la ville portant, en surcharge, les lignes de premier plan des géométraux.

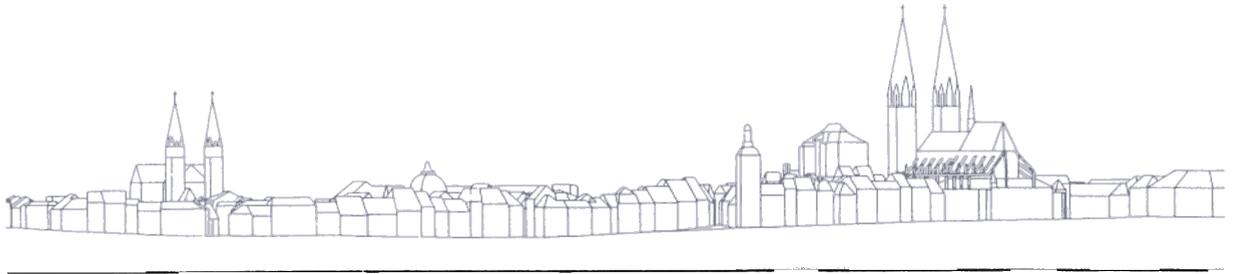


Fig. 21. Moulins (France). Partie centrale du géométral n° 4. La direction du plan de projection est la direction moyenne de la ligne du premier plan.

Fig. 22. - Moulins (France). Analyse volumétrique du centre ancien sur un géométral, définition des hauteurs constructibles et du vélum général (B. de Tourtier, architecte).

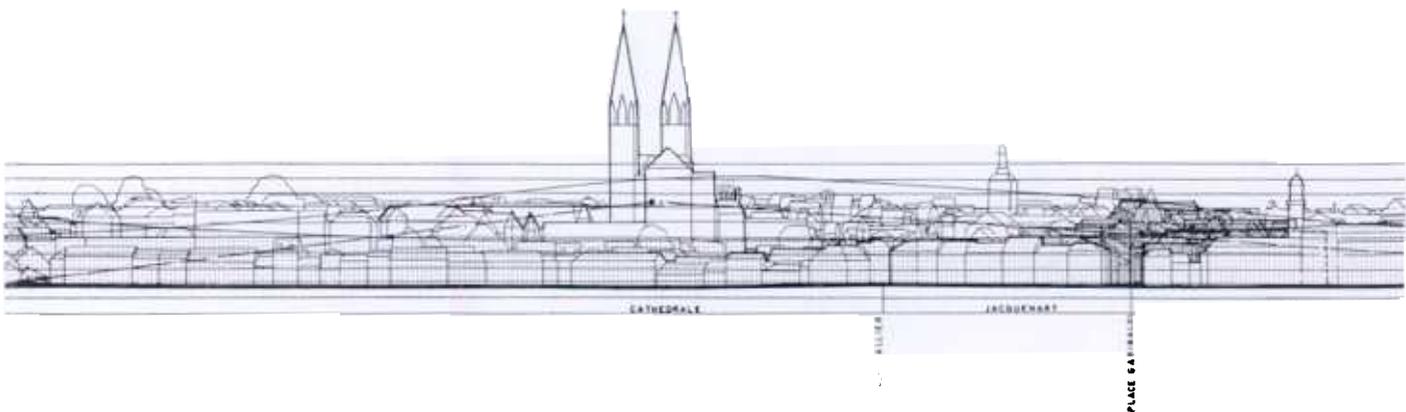




Fig. 23. Acropole d'Athènes (Grèce). Fragment d'une vue aérienne.

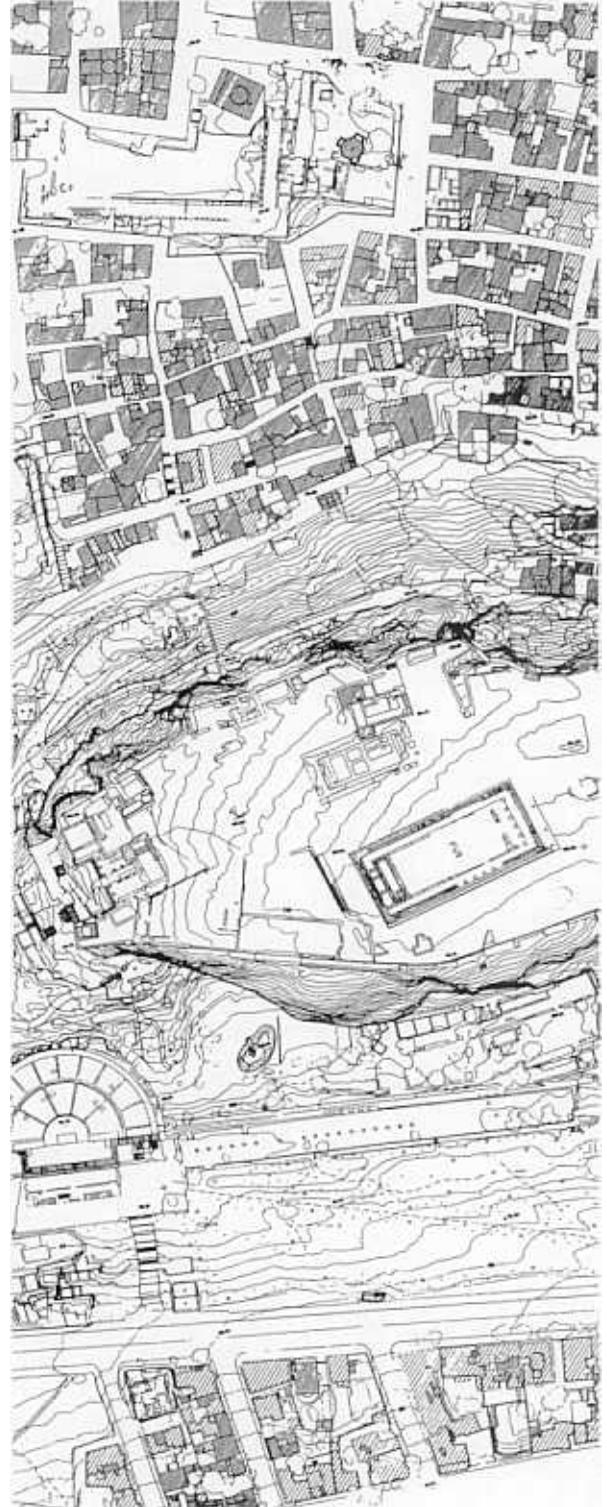


Fig. 24. - Acropole d'Athènes (Grèce). Fragment du plan photogrammétrique.

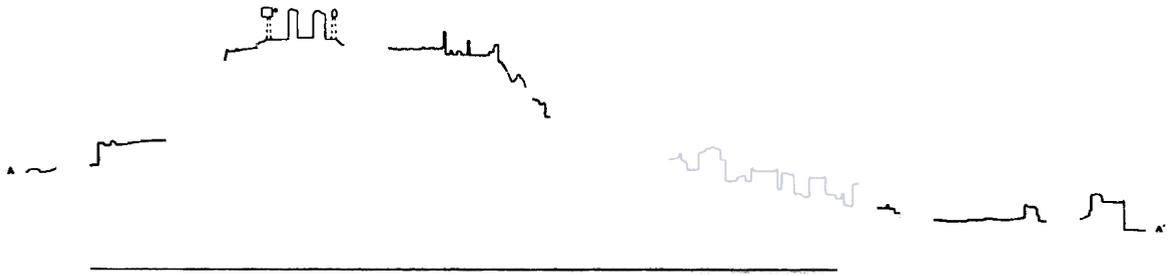


Fig. 25. Acropole d'Athènes (Grèce). Coupe Nord-Sud.

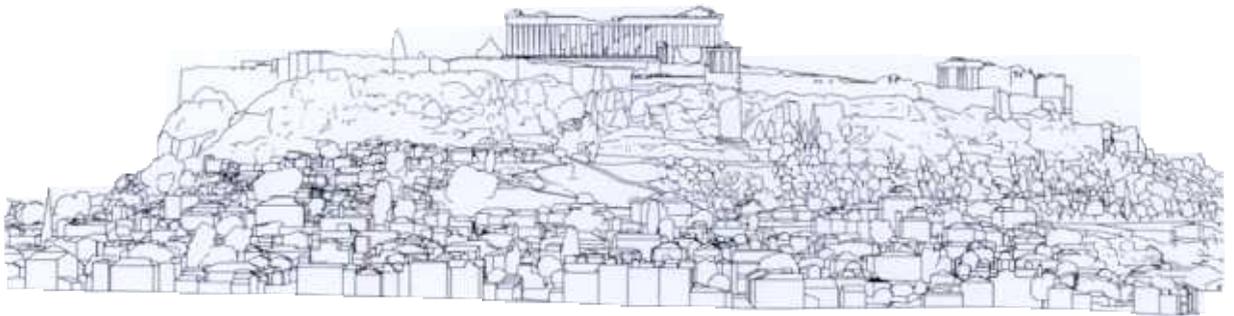


Fig. 26. Acropole d'Athènes (Grèce). Fragment du géométral Sud. En premier plan, le quartier de Plaka

axonométrique dont nous reproduisons une partie (fig. 27).

Des travaux comparables ont été réalisés par le C.P.A.A. pour la ville de Saint-Denis, près de Paris, et pour les villes de Strasbourg, Rocamadour (fig. 28), Cahors, Auch.

A Rocamadour, le relevé était demandé en vue de la protection du centre historique contre les menaces que font peser sur lui des projets de voies de communication nouvelles. Les documents établis ayant, en effet, un caractère géométrique rigoureux, il est très aisé d'y reporter toute construction projetée et d'en étudier les effets sur la conservation du site. Pour Thiers également, les plans, coupes et géométraux, interprétés par M. de Tourtier, ont servi de base à l'étude des modifications souhaitables et des opérations de détail prévues, en particulier d'une nouvelle voie en corniche; pour cette dernière, l'ensemble des documents photographométriques a permis d'établir un profil en long et

de définir les possibilités de rénovation entraînées par cette opération (fig. 29).

Dans l'étude d'ensemble des centres historiques, la stéréophotogrammétrie aérienne a donc, comme les exemples qui précèdent l'ont montré, un rôle primordial. A partir d'une même couverture photographique aérienne, de qualité et d'échelle appropriées, des documents de différente nature peuvent être établis. Nous en verrons d'ailleurs ultérieurement d'autres types. Mais auparavant il nous paraît intéressant de mentionner un travail expérimental effectué en Turquie sous la direction du Professeur Gönül Tankut, directeur du département d'urbanisme et de planification régionale de l'Université Technique du Moyen-Orient

Fig. 27. - Auxerre (France). Fragment d'une vue axonométrique établie par restitution stéréophotogramétrique analogique.

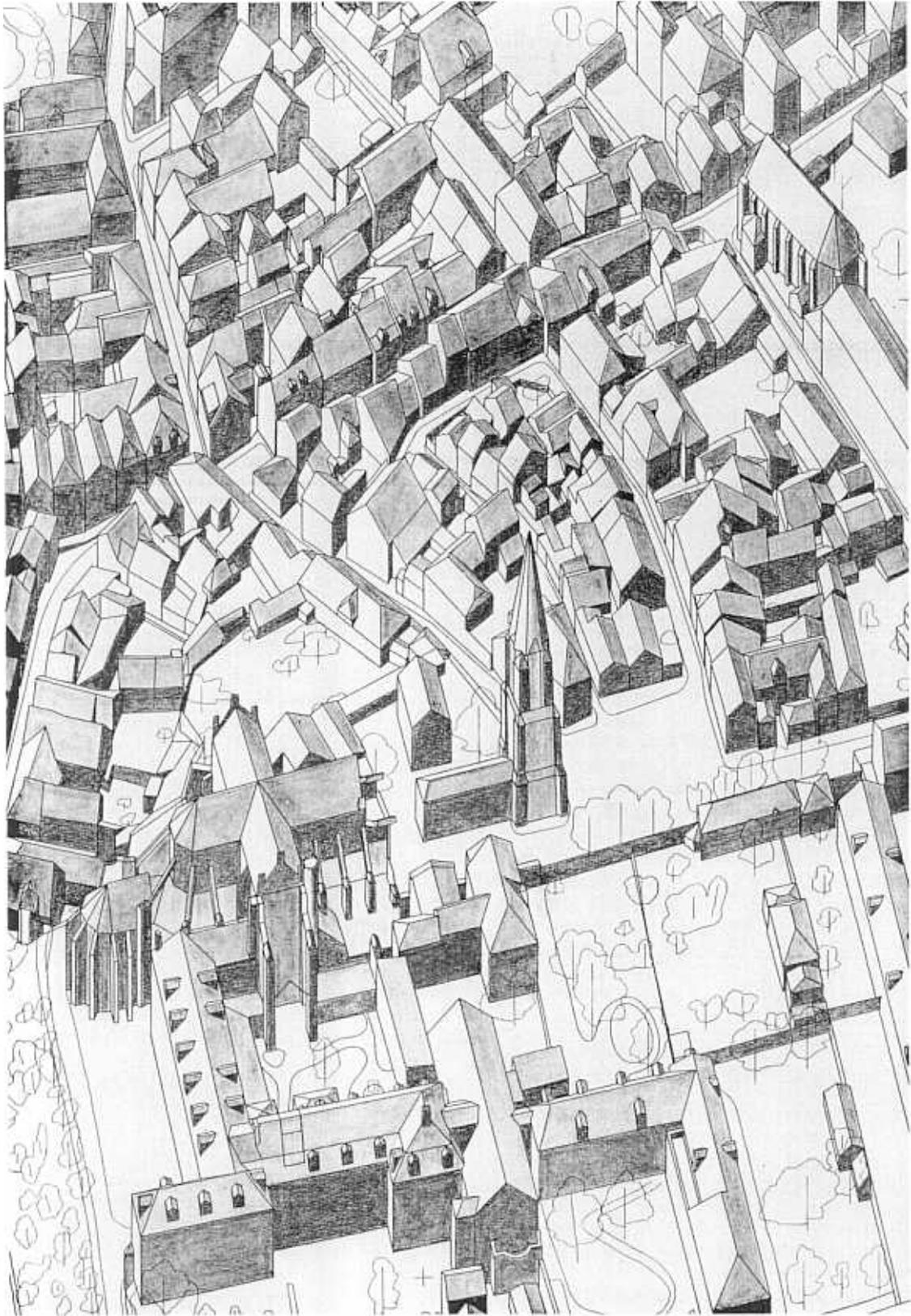
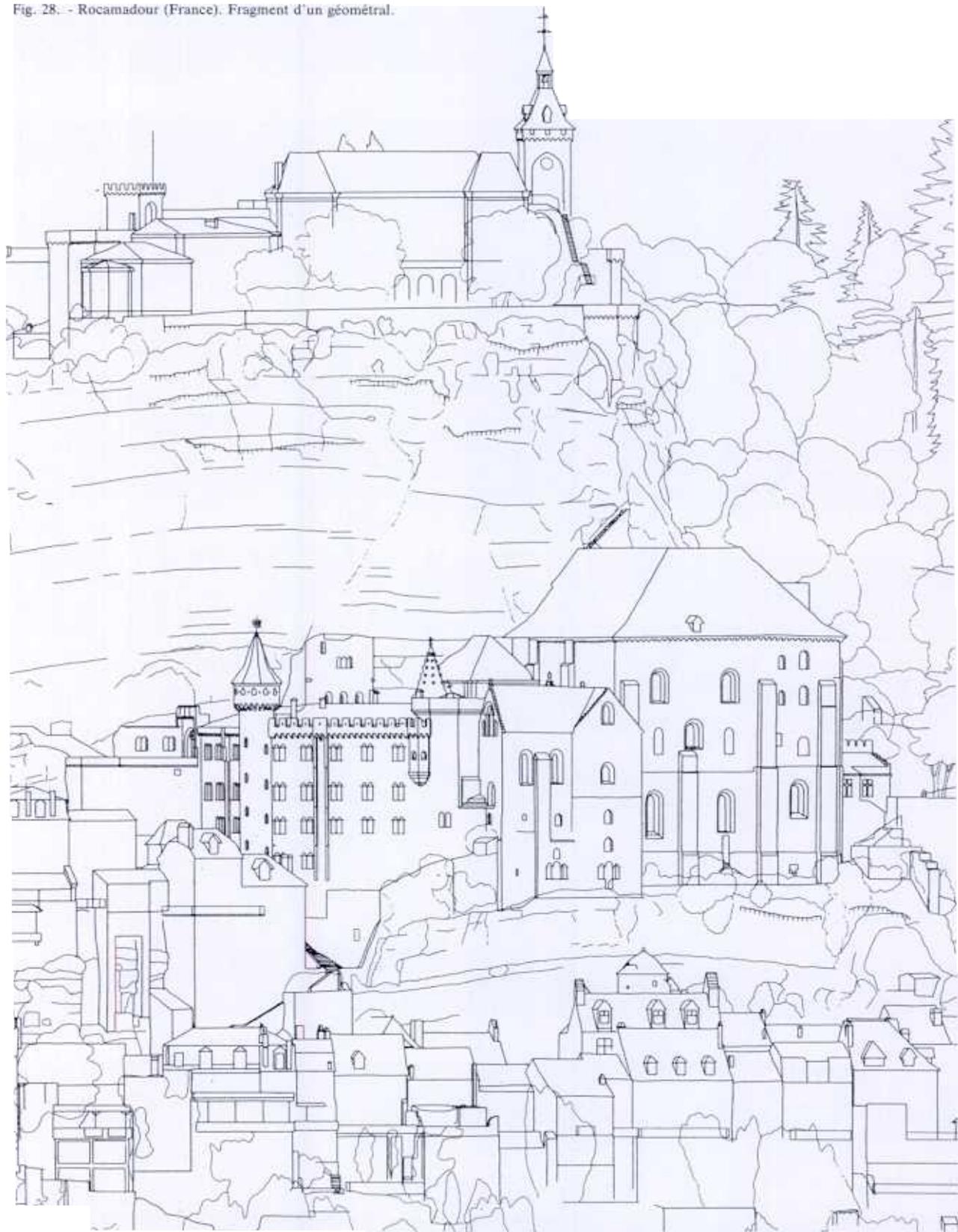


Fig. 28. - Rocamadour (France). Fragment d'un géométral.



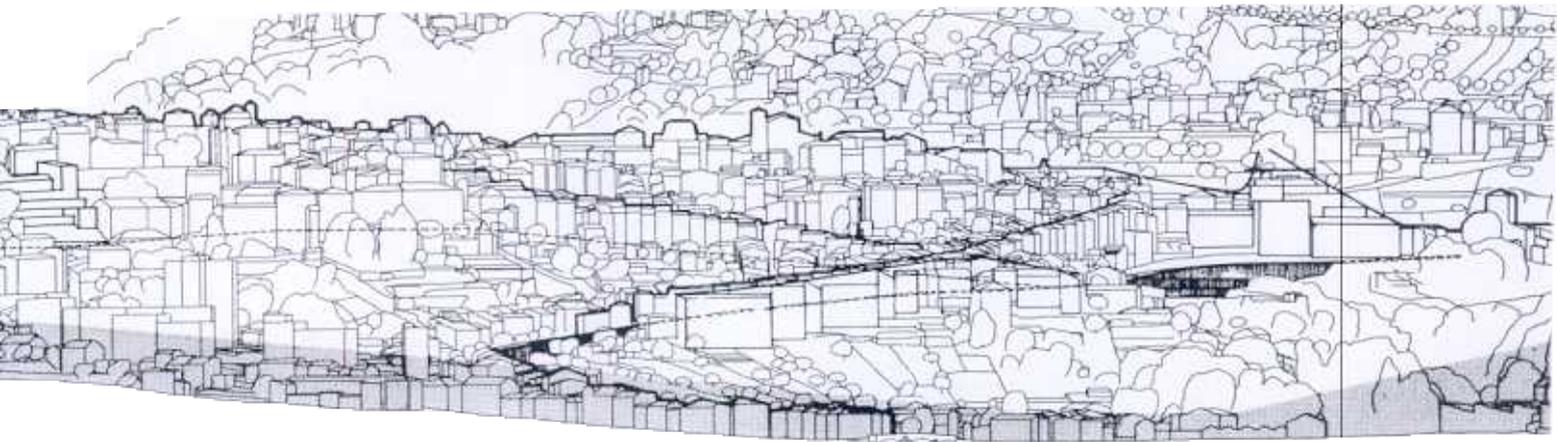


Fig. 29. Thiers (France). Tracé sur un géométral d'un profil de voirie et des volumes qui l'accompagneraient (B. de Tourtier).

à Ankara, réalisé techniquement par la Direction Générale de la Cartographie de l'Armée et qui concerne un ensemble architectural ayant une individualité propre au sein d'une ville. Il s'agit de l'ensemble ottoman de Soliman le Magnifique à Istanbul (xvi<sup>e</sup> siècle) dont le relevé photogrammétrique photo-aérien a été effectué dans le cadre d'une étude concernant à la fois le contexte historique dans lequel il se plaçait à l'époque de sa construction, son évolution, son déclin, ainsi que sa relation avec son environnement. A partir des photographies aériennes ont été restitués un plan (fig. 30), une coupe (fig. 31) et une élévation (fig. 32). Appréciant la précision, l'efficacité, la qualité de la technique photogrammétrique, ainsi que son objectivité due à son caractère géométrique rigoureux, Mlle Tankut, dans une note qu'elle nous a adressée, établit une analogie entre les méthodes d'«analyse-système» selon lesquelles est conduite l'étude historique, sociologique et architecturale («Systems Analysis» des auteurs anglais et américains [21-22]) et la méthode photogrammétrique :

1. «L'analyse-système produit un modèle symbolique et la méthode photogrammétrique un modèle graphique. Le premier modèle est construit à l'aide du langage mathématique et il représente un système défini par l'interdépendance de ses éléments individuels; le second montre l'état physique actuel de ce même système. Les deux modèles impliquent une sorte d'idéalisation réalisée, pour l'un par un certain degré d'abstraction des hypothèses, pour l'autre par une élimination des détails qui met en évidence les masses architecturales.

2. « Tandis que les différentes parties fonctionnelles du complexe monumental forment un ensemble intégral et complet, les éléments individuels ont divers attributs et divers modes d'action; c'est leur interdépendance sociale, culturelle, administrative, religieuse, économique et physique qui forme la structure intégrale du système. Le relevé photogrammétrique, surtout le géométral, exprime fortement la hiérarchie de l'articulation des espaces et de l'expression architecturale, sans faire perdre la conscience de la composition totale dérivée d'un système clos et bien défini. » Cette réflexion sur les possibilités de la photogrammétrie appliquée aux centres historiques rejoint l'approfondissement de la conception des relevés photogrammétriques monumentaux dont nous avons souligné précédemment le développement actuel.

#### *Protection des centres historiques*

L'aide apportée par la photogrammétrie dans les études d'aménagement et de protection des centres historiques a déjà été soulignée plusieurs fois dans les pages qui précèdent: tous les documents présentés précédemment offrent en effet au spécialiste, en raison de leur valeur géométrique, un moyen remarquable d'analyse des conditions d'intégration d'éléments nouveaux dans un paysage urbain.

Mais il est non moins utile d'établir d'autres documents qui permettent d'avoir une vision plus directe et plus habituelle et qui peuvent être compris et interprétés plus aisément par des personnes qui, bien que n'étant pas des techniciens, peuvent avoir un pouvoir de décision, ou même par le public. Ces documents

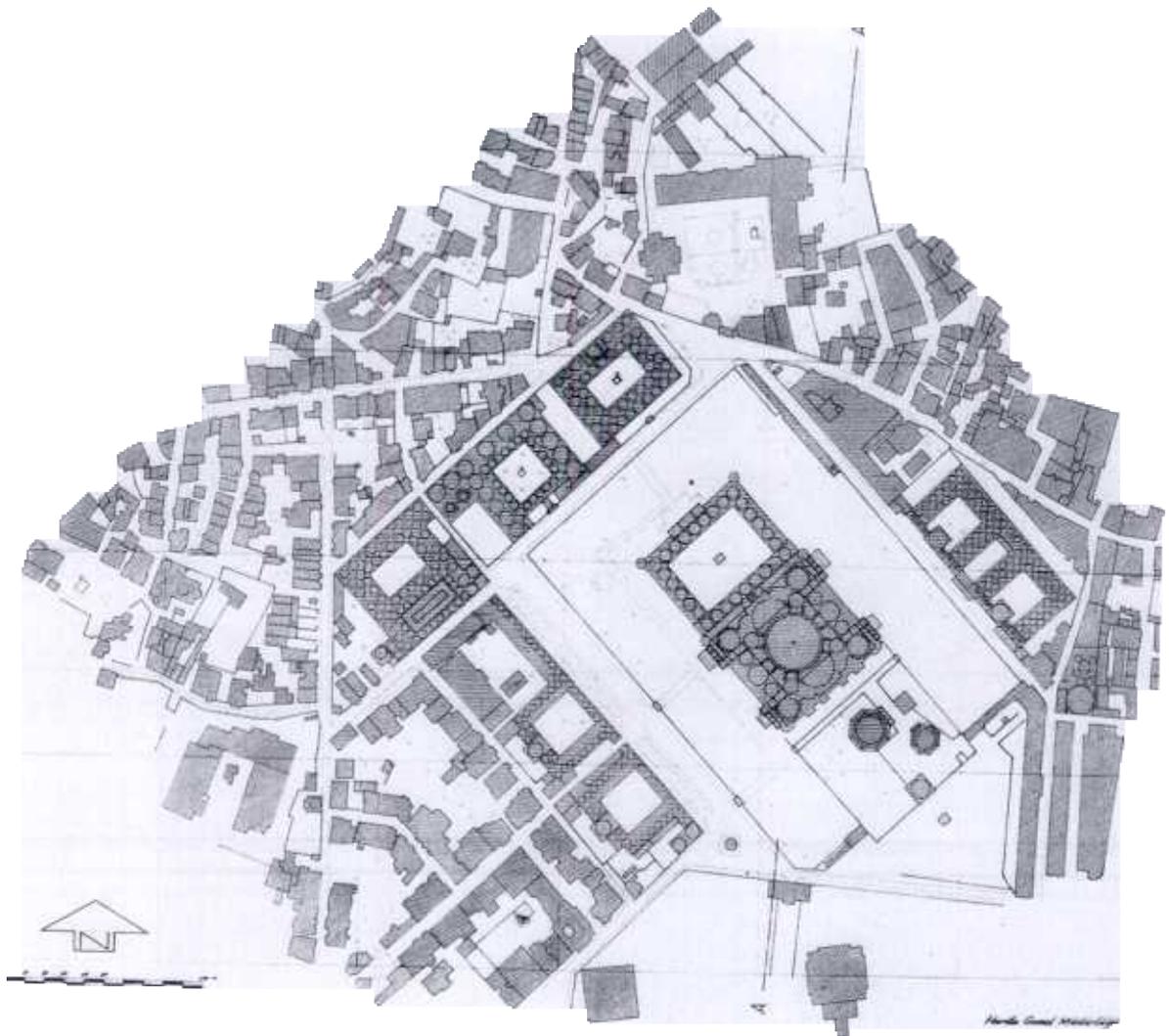


Fig. 30. Istanbul (Turquie). Ensemble ottoman de Soliman le Magnifique. Relevé photogrammétrique en plan.

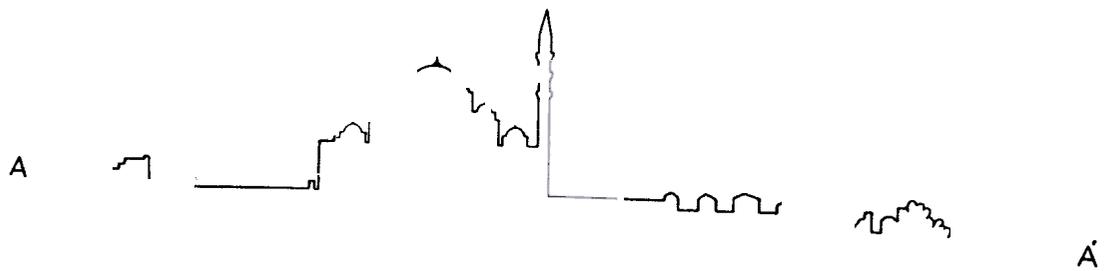


Fig. 31 Istanbul (Turquie). Ensemble ottoman de Soliman le Magnifique. Relevé aérophotogrammétrique en coupe.

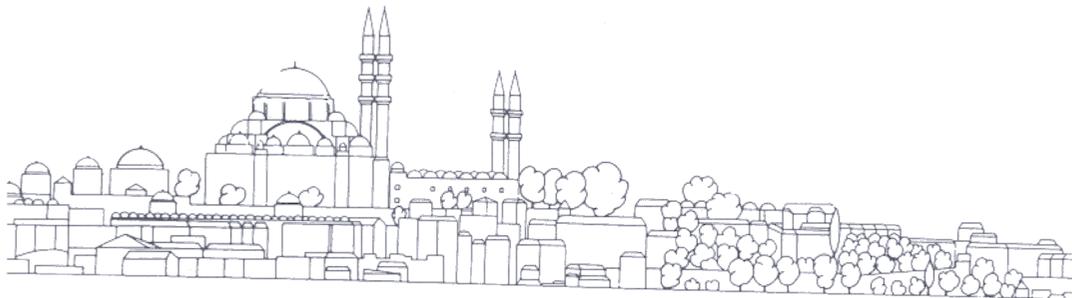


Fig. 32 Istanbul (Turquie). Ensemble ottoman de Soliman le Magnifique. Géométral établi par stéréophotogrammétrie aérienne.

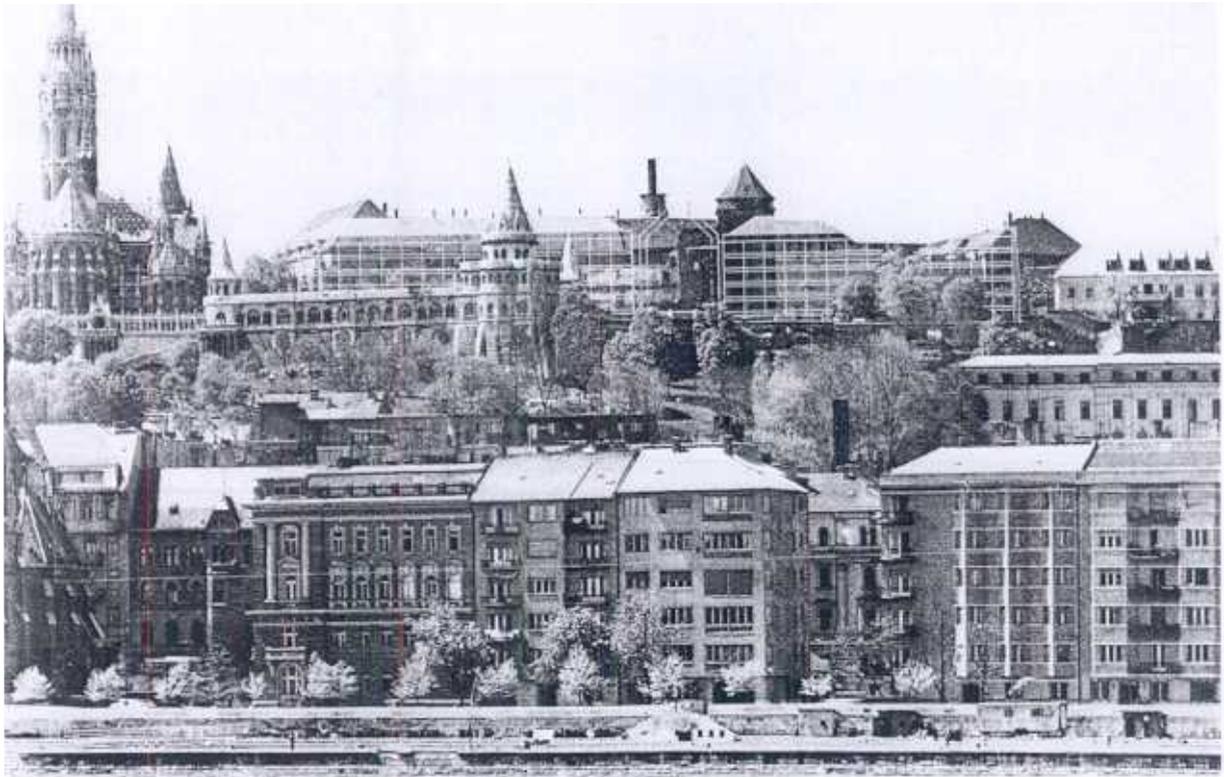


Fig. 33. Budapest (Hongrie). Etude de la réalisation d'un hôtel par « photogrammétrie inverse »

sont des *perspectives* établies en des points de vue privilégiés.

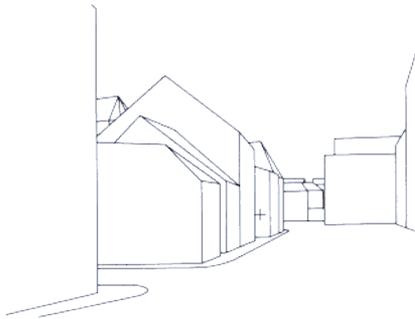
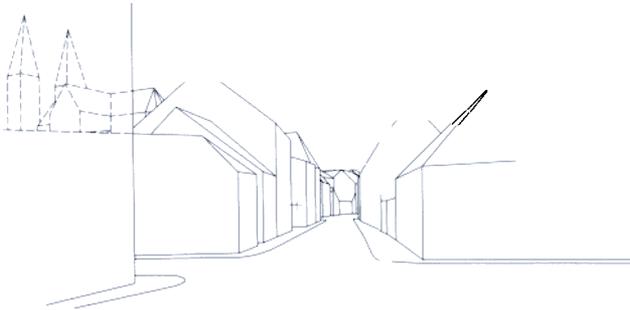
Il peut s'agir de *perspectives photographiques* sur lesquelles on reportera les modifications projetées. Tel est l'objet des photomontages. Le plus souvent, cependant, ces photomontages sont peu précis parce qu'ils résultent de constructions approximatives. La photogrammétrie offre le moyen de résoudre le problème de façon très exacte. Connaissant en effet les coordonnées X Y Z du point de vue, la direction de l'axe et la distance principale d'une photographie métrique prise en ce point de vue, enfin les coordonnées X Y Z des points caractéristiques des constructions projetées, on peut calculer les coordonnées planes x y de ces points caractéristiques sur la photographie et les reporter sur un tirage ou un agrandissement. Les bâtiments futurs se trouvent ainsi dessinés sur une perspective photographique du centre historique prise du point de vue considéré, tels qu'ils apparaîtront s'ils sont réalisés.

Cette méthode, dite parfois de « photogrammétrie inverse », est déjà ancienne et a été utilisée maintes fois

dans différents pays. Nous l'avons d'ailleurs évoquée dans notre article de 1969 [1]. Parmi les exemples les plus retentissants nous pouvons citer l'étude, ainsi réalisée, de la construction d'un Hôtel Hilton au centre de la ville de Budapest (fig. 33). Deux perspectives semblables ayant été construites de deux points de vue différents, il est de plus possible d'examiner en stéréoscopie le futur ensemble [23]. Nous signalons cet exemple comme l'un des plus complets qui ait été réalisé, sans porter pour autant sur ce projet un jugement qui n'est pas de notre compétence.

Le même procédé peut également être appliqué à la protection des sites contre des constructions plus ou moins lointaines. Parmi les travaux récents de l'I.G.N. français, citons ceux qui se rapportent au contrôle de l'invisibilité de très grands réfrigérants de centrales électriques nucléaires dans les paysages observés des châteaux de Chambord et de Sully-sur-Loire, ainsi que des villes de Gien et de Chinon.

Ce système de visualisation peut cependant être en défaut lorsque les points de vue retenus n'existent pas encore et qu'il est donc impossible d'y prendre des



photographies. On peut alors construire des *perspectives graphiques* à partir de données numériques qui sont, d'une part les coordonnées des points caractéristiques des bâtiments projetés, généralement exprimés par leurs volumes essentiels, d'autre part celles des points qui définissent le bâti actuel, enfin la position des points de vue et l'orientation des axes des perspectives. Pour le bâti actuel, on procède par restitution numérique des photographies aériennes. On revient donc une nouvelle fois à l'exploitation des photographies aériennes, augmentant encore leur domaine d'application aux centres historiques et tendant vers une utilisation systématique de ce merveilleux instrument de travail [18]. La figure 34 en donne un exemple qui concerne un quartier de la ville de Moulines. Elle présente l'une des perspectives qui ont été construites à partir de points de vue actuellement inaccessibles puisqu'ils sont situés à l'emplacement de maisons qui, dans le projet de transformation du quartier, devraient être détruites. Chaque perspective a été réalisée, d'une part dans l'état actuel des lieux (à la seule exception des bâtiments à la place desquels se situent les points de vue) d'autre part dans un état futur en projet.

Ainsi, à la base de la plus grande partie de la documentation photogrammétrique établie pour l'étude ou la protection des centres historiques se trouvent les données numériques obtenues par stéréophotogrammétrie aérienne. Le traitement de ces données, qui devient vite très complexe lorsque le secteur concerné est d'assez grande dimension, ne peut être envisagé que par l'informatique. Ayant effectué, une fois pour toutes, l'important travail de restitution numérique et les programmes de calcul ayant été écrits, il est alors possible, sur la base d'un unique *modèle numérique* du centre, d'établir automatiquement tous les documents dont nous avons parlé dans la deuxième partie de cet article. La technologie de ces travaux, étudiée par différents services dont, en France, le C.P.A.A. de l'I.G.N. (fig. 35) est maintenant bien au point [24]. Nous retrouvons, au bénéfice des centres historiques et des sites, cette puissante combinaison de la photogrammétrie et de l'informatique dont nous avons esquissé précédemment les possibilités au profit de l'étude et de la conservation des monuments.

Fig. 34. - Moulines (France). Etude de transformation d'un quartier ancien. Perspectives obtenues par photogrammétrie numérique à partir de points de vue qui n'existent pas actuellement: état actuel (en haut) et état projeté (en bas).

Maurice CARBONNELL  
I.G.N. - France  
Président du C.I.P.A.

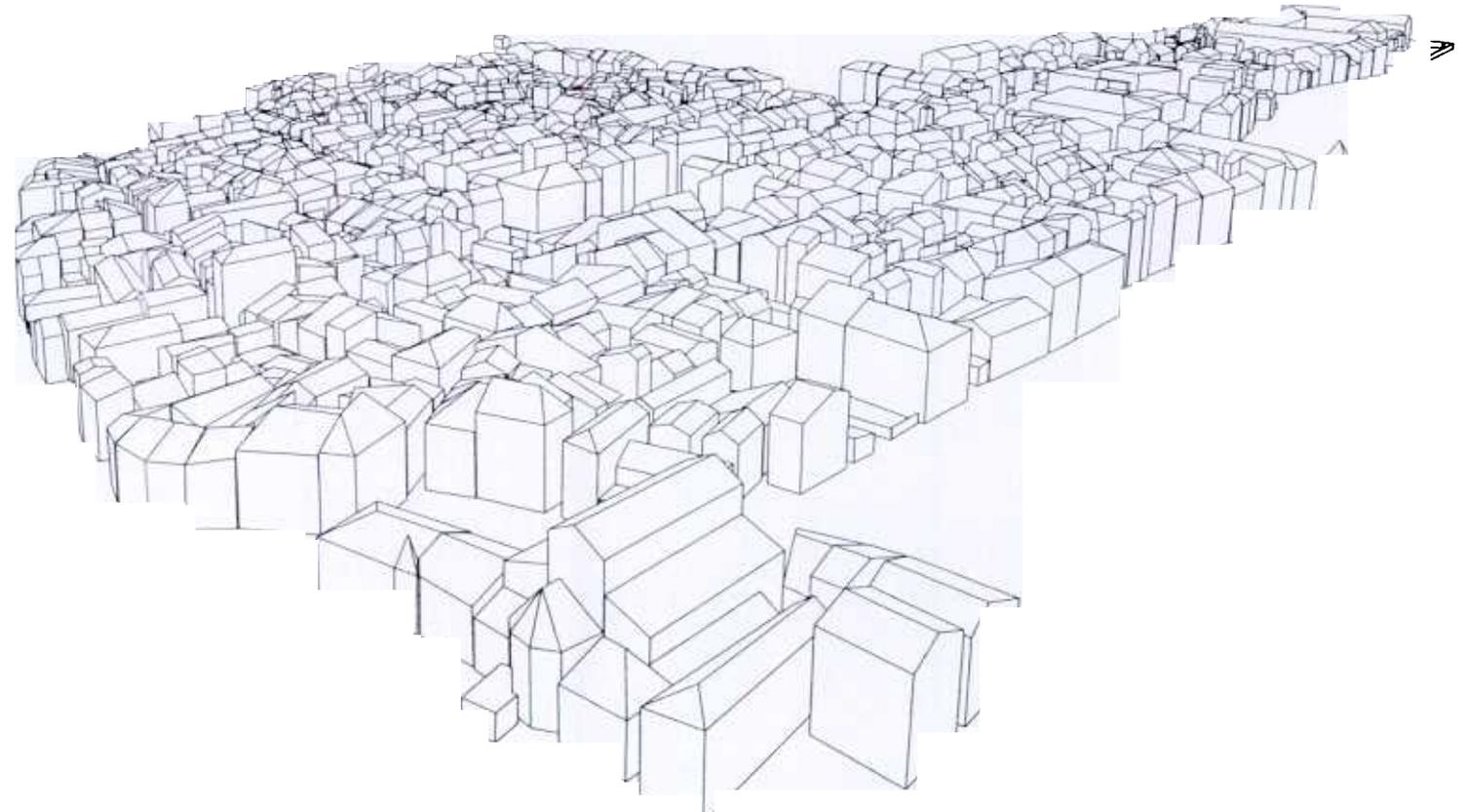


Fig. 35. - Cahors (France). Perspective d'un quartier de la ville obtenue par tracé automatique à partir d'une restitution aérophotogrammétrique numérique.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. CARBONNELL - *Introduction à l'application de la photogrammétrie aux édifices et aux ensembles monumentaux anciens*. Monumentum, vol. IV, 1969, p. 3-35.
- [2] M. CARBONNELL - *Panorama international des applications de la photogrammétrie architecturale*. Symposium international de photogrammétrie architecturale, Lucca 23-26 septembre 1973, 10 p.
- [3] W. FERRI, M. FONDELLI - *Problems in photogrammetric surveying of domes*. 12th congress of International Society for Photogrammetry, Ottawa, 1972, 16 p.
- [4] K. TSUBOI, Y. USHIKAWA, S. HASEGAWA, T. ITO et M. TSKUDA - *Application of photogrammetry for research on cultural properties*. Annual Bulletin of Nara National Research Institute of Cultural Properties, 1969, 8 p.
- [5] R.W. McDOWALL - *Some examples of architectural photogrammetry in the United Kingdom*. Symposium international de photogrammétrie architecturale, Lucca, 23-26 septembre 1973, 8 p.
- [6] W. FERRI, M. FONDELLI, P. FRANCHI et F. GRECO - *Photogrammetric survey of the "Cupola di Santa Maria del Fiore" in Florence*. Symposium on close-range photogrammetry, Urbana (U.S.A.), 1971, 39 p.
- [7] W. FERRI, M. FONDELLI, P. FRANCHI, F. GRECO - *Il rilevamento fotogrammetrico della cupola di Santa Maria del Fiore in Firenze*. Istituto Geografico Militare, Firenze, 1971, 62 p., 4 pl.
- [8] E. CLEUR, S. DILAGHI et M. FONDELLI - *Analisi delle discontinuità della cupola di Santa Maria del Fiore in Firenze*. Bollettino di Geodesia e Scienze affini, XXXI - 3, 1972, p. 313-341 + 49 pl.
- [9] P. SANPAOLESI et G. BIRARDI - *Vecchie e recenti ricerche sulla cupola di Santa Maria del Fiore e la interpretazione di un nuovo rilievo fotogrammetrico*. Antichità viva, n. 2 - 1972, 22 p.
- [10] M. FONDELLI - *Recenti sviluppi del rilevamento fotogrammetrico della cupola di Santa Maria del Fiore in Firenze*. Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia, n. 2 - 1973, 16 p.
- [11] J. NORDBLADH et J. ROSVALL - *Documentation as part of the research process. Some considerations actualized by the application of photogrammetric measuring techniques in history of culture*. Symposium international de photogrammétrie architecturale, Lucca, 23-26 septembre 1973, 15 p.
- [12] R. de VITA - *Finalità del rilievo stereo-fotogrammetrico nelle ricerche sulle tipologie e caratteristiche costruttive in alcuni castelli pugliesi*. Symposium international de photogrammétrie architecturale, Lucca, 23-26 septembre 1973, 11 p.
- [13] E. CLEUR, M. FONDELLI et F. GRECO - *La fotogrammetria numerica e l'elaborazione automatica dei dati osservati nello studio e nella conservazione dei monumenti architettonici*. Symposi-

sium international de photogrammétrie architecturale, Lucca, 23-26 septembre 1973, 8 p.

[14] M. FONDELLI et F. GRECO - *Nuovi orizzonti nel rilievo e nel controllo dei monumenti*. Le Scienze, n. 63, nov. 1973, pp. 91-98.

[15] G. REDELIUS - *Äldre bebyggelse i de centrala delarna av Trosa*. Publications du Riksantikvarieämbetet, n° 3, 1971, 86 p.

[16] K. LÖFSTRÖM - *Porvoon vanhan kaupungin fotogrammetri- nen tallentaminen ja mittaus*. Arkkitehti n° 3, 1971, pp. 44-46.

[17] *Gamla Borgå (Porvoo ancien) Helhetsplan för Bebyggandet av Gamla Borgå*. Porvoo, 1972, 54 p., 49 pl.

[18] B. de TOURTIER - *Sites urbains et stéréophotogrammétrie. Une méthode d'interprétation*. Secrétariat d'Etat à la Culture, Service de la création architecturale, Paris, 1975.

[19] M. CARBONNELL - *Historic Center Conservation* (The contribution of photogrammetry to the study and conservation of historic centres). Report to the congress of the Society of Architec-

tural Historians, Cambridge, August 1973. *Photogrammetric Engineering*, vol. XL, n° 9, 1974, pp. 1059-1070.

[20] M. CARBONNELL - *Contribution de la photogrammétrie à l'étude et à la conservation des centres historiques*. Bulletin d'information de l'Institut Géographique National, n° 24, décembre 1973, pp. 18-35.

[21] A.D. HALL - *A methodology for systems engineering*. Princeton, New Jersey, 1968.

[22] L. OPTNER (editor) - *Systems analysis*, Penguin Books, Ltd, Middlesex, England, 1973.

[23] Z. GYÖRKE et F. KARSAY - *La représentation exacte des bâtiments projetés sur des photographies*. Revue d'Éna, n° 3, 1972, pp. 134-136.

[24] *Les nouvelles techniques de représentation en architecture*. Centre de Recherche architecturale, Paris, 1974, 90 p.

## SUMMARY

*The progress achieved in architectural photogrammetry during the past five years, and the extension of its applications, affect the surveying both of individual monuments and of whole historic centres.*

**Monuments:** Numerical photogrammetric methods, whether analogical or analytical, are particularly suitable for studies of structure. They provide a means of obtaining a highly accurate image of a building in the form of a set of basic points which correspond to its "skeleton" or contours. This numerical model may then be used for the obtention of a detailed analysis of the structural relations existing between the different parts of a monument (as in the case of the church of Tingstad in Sweden), for the measurement of the deformations which have developed between two successive surveys (example: the Kaijusanji Pagoda, Japan), or in order to check the stability of a building when major transformations are in progress in its immediate vicinity (Abbey Church of St. Denis, France). A numerical survey, followed by a line-drawing executed on an automatic tracing table, can provide extremely accurate data for a structural study while simplifying camera-station problems (church at Evron, France). In certain cases graphical stereophotogrammetric plotting may offer the advantage of providing a detailed survey which is both complete and also sufficiently accurate to enable fairly marked changes in the building to be studied; it was adopted for this purpose in the case of a late 18th-century iron bridge (Coalbrookdale Bridge) surveyed in Great Britain.

All the potentialities of numerical photogrammetry are exploited when it is used to determine the geometrical forms adopted for the design and execution of given architectural features. Some extremely important studies of this type have been made in Italy on the interiors of the great Renaissance domes; the one on which the most work has been done so far is that of the Cathedral of Santa Maria del Fiore in Florence.

*Side by side with the extension of the applications of photogrammetry in connection with the surveying and studying of buildings, we find progress in serious abstract thought regarding the role to be attributed to the survey. One of the most important ideas which have emerged is that of the "finalized survey" or, to put it more accurately, of finalized plotting: since a record in the form of a stereogram will be permanently capable of providing a practically complete spatial image of a building, instantaneously and in a homogeneous form, it is effectively both possible and worthwhile to make plottings from it to cover specific elements or aspects, such as basic architectural forms, materials, type of construction, etc. Another idea is being worked on by a group of photogrammetrists and data-processing experts in Tuscany; it involves the systematic establishment of numerical photogrammetric archives on monuments and the processing of these by computer to provide increased possibilities for studying forms and the changes in them.*

**Historic Centres:** The role of photogrammetry in the establishment of the records required for the study and subsequent renovation of historic centres has greatly increased, and it is now used not merely for the surveying of continuous street frontages — which is achieved in a variety of ways (example: Porvoo in Finland) — but also, and primarily, for surveys of whole town centres, to which it is now possible to extend the combined plan view, cross-section and elevation system of representation habitually adopted for individual buildings, and even the making of axonometric projections. The principal method used is aerial stereophotogrammetry. The examples shown here (Thiers, Moulins and Cahors in France, the Athenian Acropolis, and the Suleimaniyeh in Istanbul) were obtained by the graphical analogical method; however, computer-processed numerical surveys are on the

increase. Indeed one and the same model built up from the set of points which gives the framework or contour of the ancient town serves to provide, by automatic line-drawing, the same documents as the aforesaid method and perspective views as well. The perspective views are particularly useful for the exploration of the means of protecting a site when renovation schemes or new development projects are

envisaged, and they have the special advantage of being obtainable even where the viewpoint does not in reality as yet exist (as at Moulins). They thus serve as a complement to the photographed views on which the proposed buildings or engineering works have been fitted in by "inverse photogrammetry" (example: Budapest).

Fig. 1. - The different methods used for photogrammetric surveys.

Fig. 2. - Church of Tingstade (Sweden), 13th-14th centuries.

Fig. 3. - Summary graphical representation of a survey effected by analytical photogrammetry of the tower of the Tingstade church.

Fig. 4. - Measurement, by numerical analytical photogrammetry, of the development of deformations in the Kaijusanji Pagoda (Japan) between October 1963 and October 1968.

Fig. 5. - Abbey church of St. Denis (France). Stability check by analytical photogrammetry. Control points on pillars (black triangles) and on vaults (white circles) in the narthex.

Fig. 6. - Photogrammetric survey of the iron bridge at Coalbrookdale (Great Britain) (1779). Note the deformations in the upper portion of the arch.

Fig. 7. - Epsom Bridge (Great Britain) (about 1860). Photogrammetric surveys were made, prior to consolidation work, of the profiles marked here in white.

Fig. 8. - Evron (France), church of Notre-Dame de l'Epine, photogrammetric survey of the vaulting over the choir. The profiles of the arches were surveyed from pairs of photographs taken with the camera axis vertical (a), by numerical stereophotogrammetric plotting, followed by line-drawing on the automatic tracing table (b).

Fig. 9. - Photogrammetric survey of the interior of the dome of Santa Maria del Fiore in Florence. 1. A plotting of the interior of the dome (distance between curves 1 m). 2. Profile of a groin as calculated from a numerical photogrammetry plotting.

Fig. 10. - Historic centre of Bari (Italy), unit sector 49, north side. An attempt at «finalized» plotting from one and the same pair of photographs. Top to bottom: Outline drawing showing general proportions and relative importance of door and window areas compared with walled-in areas; general features of the building fabric (stratification); detailed survey of the fabric of the tower.

Fig. 11. - Computer-processing of data obtained from a numerical photogrammetric survey. The numerical model of the architectural feature concerned is stored in the computer together with the different programs for processing it, and it is then possible to project the results of different calculations almost instantaneously on to a screen. In this case we have, for the Cathedral of Santa Maria del Fiore in Florence, a perspective view of the interior profiles of the dome (see fig. 9), the geometric curve passing as nearly as possible through the plotted points of a groin, and the graph of the statistical analysis of the deviations of the curve in relation to the points.

Fig. 12. - Photogrammetric survey of a continuous street frontage in Porvoo (Finland). The survey (top) was obtained by means of a drawing made from an assemblage of rectified photographs (middle) in the case of the facades, and from a dimensioned drawing (bottom) in that of the roofs.

Fig. 13. - Porvoo (Finland). Continuous street frontages.

Fig. 14. - Porvoo (Finland). Flat projection of a unit sector near the river.

Fig. 15. - Porvoo (Finland). Aerial view of the historic centre.

Fig. 16. - Porvoo (Finland). Planimetric and altimetric aerial stereophotogrammetric survey. Superimposed, the buildings in their present state.

Fig. 17. - Ostuni (province of Brindisi, Italy). Overall flat projection obtained by terrestrial stereophotogrammetry.

Fig. 18. - Thiers (France). Part of flat projection of west view, as interpreted by the architect.

Fig. 19. - Thiers (France). Combination of an east-west cross-section and of a flat projection of the south view (The big rectangle in the centre of the projection is a modern building).

Fig. 20. - Moulins (France). Aerial photograph of the centre of the town with, superimposed, the part of the flat projections corresponding to the foreground.

Fig. 21. - Moulins (France). Central portion of flat projection n° 4. The direction of the projection plane corresponds to the mean position of the line marking the foreground.

Fig. 22. - Moulins (France). Volumetrical analysis of the ancient centre of the town on a flat projection, showing the heights to which new buildings may reach and the height of the overall "velum" (B. de Tourtier, architect).

Fig. 23. - Acropolis of Athens (Greece). Portion of an aerial view.

Fig. 24. - Acropolis of Athens (Greece). Corresponding portion of the aerial photogrammetric survey.

Fig. 25. - Acropolis of Athens (Greece). North-south cross section.

Fig. 26. - Acropolis of Athens (Greece). Portion of flat projection of south side. In the foreground, the Plaka district.

Fig. 27. - Auxerre (France). Portion of an axonometric projection obtained by analogical stereophotogrammetric plotting.

Fig. 28. - Rocamadour (France). Portion of a flat projection.

Fig. 29. - Thiers (France). Flat projection on which has been drawn in the outline of a projected new road with the buildings which would stand on it.

Fig. 30. - Istanbul (Turkey). Complex of Ottoman buildings of Suleiman the Magnificent ("Suleimaniyeh"). Photogrammetric plan view survey.

*Fig. 31. - Istanbul (Turkey). Suleimaniyeh. Sectional aerial photogrammetry survey.*

*Fig. 32. - Istanbul (Turkey). Suleimaniyeh. Flat projection obtained by aerial stereophotogrammetry.*

*Fig. 33. - Budapest (Hungary). Use of "inverse photogrammetry" as a prelude to the building of a hotel.*

*Fig. 34. - Moulins (France). Study made prior to the renovation of an ancient quarter. Obtention of perspective views by numerical photogrammetry from viewpoints not actually in existence as yet. Above: present state, and below: proposed future appearance.*

*Fig. 35. - Cahors (France). Perspective view of a section of the town obtained by automatic drawing from a numerical plotting of an aerial photogrammetry survey.*