

## INTRODUCTION A L'APPLICATION DE LA PHOTOGRAMMETRIE AUX EDIFICES ET AUX ENSEMBLES MONUMENTAUX ANCIENS

« La métrophotographie (= photogrammétrie) est l'opération inverse de la mise en perspective d'un objet d'après ses projections géométrales. »

H. Deneux, Architecte en chef  
des monuments historiques, 1930.

On définit habituellement la *photogrammétrie* comme la technique qui permet de reconstituer la forme, les dimensions et la position d'un objet à partir de *perspectives* de cet objet enregistrés photographiquement.

Les architectes ont, depuis fort longtemps, approfondi les lois de la perspective : la Renaissance italienne connaissait déjà l'art d'établir des plans et des élévations d'un édifice d'après des vues perspectives. Mais au XIX<sup>e</sup> siècle, deux inventions apportèrent des possibilités nouvelles pour l'enregistrement de ces vues. Ce fut d'abord, en 1804, la *chambre claire*, dont Aimé Laussedat, que l'on considère généralement comme le père de la photogrammétrie, pensait qu'elle était « le meilleur des instruments enregistreurs » permettant d'obtenir une image du monument qui « sans aucun chiffre, remplaçait avantageusement le croquis le plus détaillé sur lequel on eût inscrit les angles horizontaux et les angles verticaux, mesurés, en aussi grand nombre qu'on voudra l'imaginer, de la station d'où elle avait été prise ». Ce fut ensuite la *photographie* dont l'emploi par les relevés d'architecture n'entra dans une phase pratique qu'après la guerre de 1870 sous l'impulsion d'Albrecht Meydenbauer. C'est à cet architecte qu'est dû le nom de « photogrammétrie ». Il pensait que la photographie lui permettait d'obtenir, en tous points du monument et sans discontinuité, une « image perspective géométriquement exacte ».

En fait, outre sa valeur documentaire, cette image perspective n'a d'intérêt que parce qu'elle permet de reconstituer le *faisceau perspectif* de la prise de vue, c'est-à-dire la gerbe des rayons lumineux qui, partant de chaque point du monument viennent converger au centre de perspective de l'objectif puis, ayant traversé celui-ci, impressionnent la surface sensible. Cette reconstitution nécessite la connaissance des caractéristiques exactes de l'appareil photographique employé. Celui-ci, sauf cas exceptionnels, ne pourra donc pas être un appareil d'amateur ou de professionnel, quelle qu'en soit la qualité, mais sera un instrument spécialement construit à cette fin. Un tel instrument, appelé *chambre métrique*, est généralement monobloc, un « cône » reliant

l'objectif à un fond de chambre, cadre parfaitement plan sur lequel vient prendre appui, au moment de l'exposition, la surface sensible dont le support est presque toujours une plaque. Le plan du fond de chambre est perpendiculaire à l'axe optique de l'objectif (fig. 1).

L'étalonnage et le réglage de la chambre en laboratoire assurent le *centrage*, c'est-à-dire le passage de l'axe optique par le point d'intersection de deux droites joignant deux à deux des repères opposés placés sur le cadre d'appui, mesurent la *distance principale* qui sépare le centre de perspective image (point nodal arrière de l'objectif) du plan du fond de chambre, enfin déterminent la *distorsion*, aberration de l'objectif qui dévie les rayons lumineux. Ceux-ci après avoir traversé l'objectif ne sont plus tout à fait parallèles à eux-mêmes et le faisceau perspectif émergent, à l'intérieur de la chambre, n'est plus exactement semblable au faisceau incident. Dans les équipements photogrammétriques modernes, cette aberration est presque parfaitement corrigée, les écarts résiduels entre la position de chaque point image sur le cliché et sa position théorique n'excédant pas dix microns.

L'étalonnage de la chambre métrique étant effectué, on conçoit que la reconstitution du faisceau perspectif devient possible : le centre de perspective peut être replacé dans sa position exacte par rapport au cliché et le faisceau perspectif est formé par l'ensemble des droites qui joignent le centre de perspective à chaque point de l'image enregistrée. Cette image peut être *négative* ou *positive* (reproduction par contact) : l'une et l'autre jouent exactement le même rôle, symétriquement par rapport au point de vue.

L'organisation des prises de vues photogrammétriques des monuments dépend du mode d'exploitation des faisceaux perspectifs reconstitués. L'étude des différentes méthodes d'exploitation et des relations étroites qui existent entre ces méthodes et certaines catégories d'appareils va nous permettre de poser, dans leur ensemble, les principes généraux de l'application de la photogrammétrie aux relevés architecturaux.

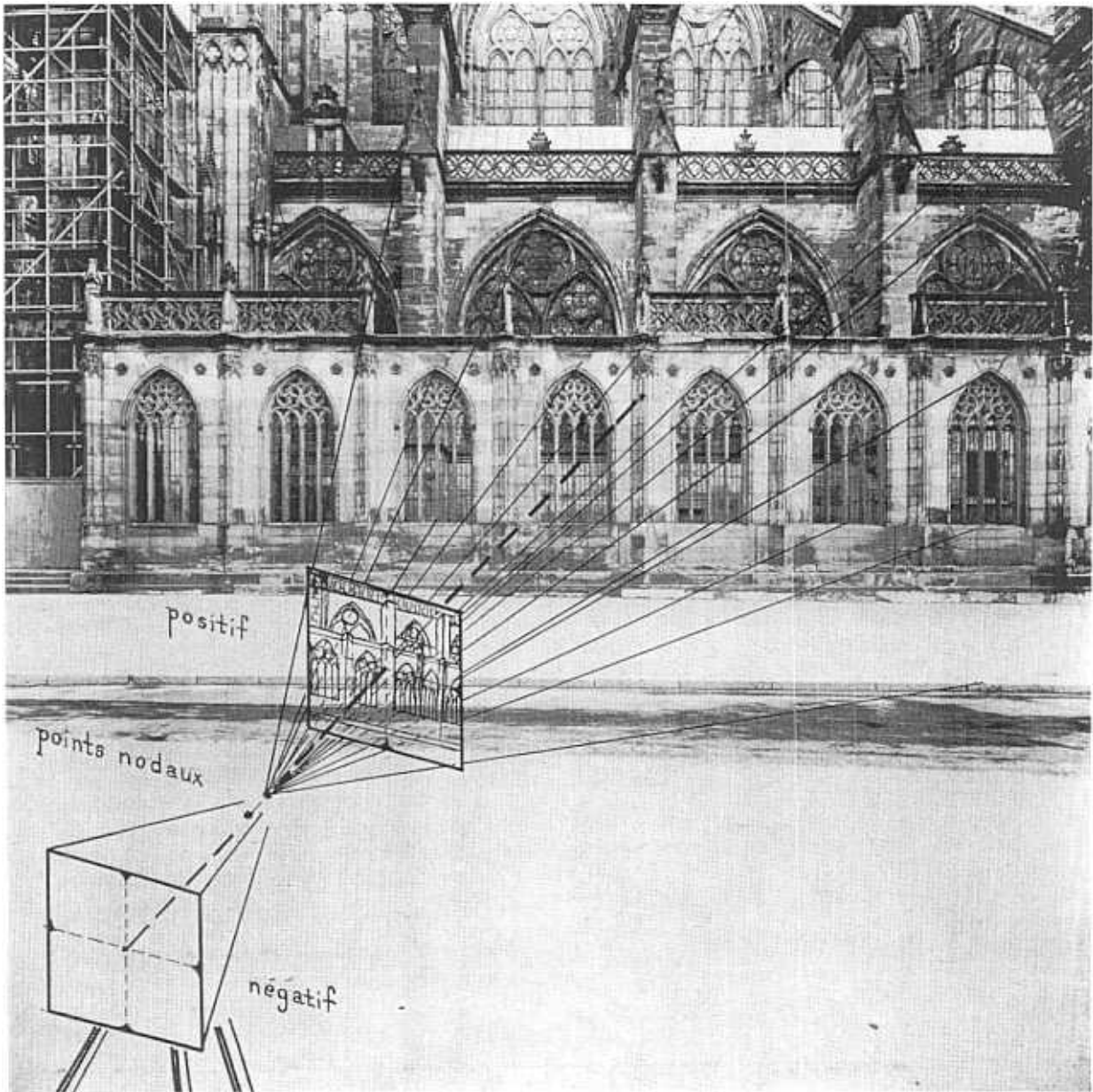


Fig. 1. — Faisceau perspectif et chambre métrique. La figure montre schématiquement les deux points nodaux de l'objectif, le fond de chambre relié de façon rigide à l'objectif et portant quatre repères, l'axe principal de prise de vue (en tireté), le faisceau perspectif et la position fictive d'un positif obtenu par contact.



Fig. 2. — Exploitation directe d'une photographie métrique. Eglise Saint-Louis des Invalides, à Paris (chambre Zeiss T M K). A gauche, la photographie métrique, avec ses quatre repères, prise selon un axe rigoureusement horizontal et orienté parallèlement à l'axe de l'édifice. La connaissance de la distance principale de la chambre et celle des éloignements du point de



vue par rapport aux différents plans successifs de la construction perpendiculaires à l'axe, ou supposés tels, permettent une mise à l'échelle du cliché dans ces différents plans. A droite, la photographie est agrandie au 1/200 dans le plan indiqué par une surcharge *blanche*. Les éloignements sont mesurés sur place ou relevés sur un plan. (Clichés IGN-J. P. Paquet.)

## I. METHODES PHOTOGRAMMETRIQUES TRAITANT CHAQUE CLICHE INDIVIDUELLEMENT

Cette « photogrammétrie à une image », selon l'expression en usage en Europe Centrale, peut prendre différents aspects et faire appel à différentes techniques.

1. Considérons d'abord le cas le plus simple, celui d'un élément architectural plan et vertical (partie de façade, mur intérieur, vitrail, etc.). On en obtiendra une image photographique géométriquement semblable en orientant l'axe de prise de vue selon une horizontale perpendiculaire au plan de cet élément. L'échelle de l'image sera égale au rapport de la distance principale de la chambre à l'éloignement du sujet par rapport au point de vue. Par simple agrandissement, on reproduira cette image à l'échelle voulue. Cette « mise à l'échelle » peut être facilitée par la mesure d'une longueur ou l'apposition de jalons sur l'élément à relever. Le cas d'un plafond ou d'un sol photographié selon un axe vertical ascendant ou descendant est évidemment identique.

La même méthode est applicable à un ensemble architectural composé de plans verticaux parallèles. Mais, sur le cliché, l'image de chacun de ces plans a une échelle propre. Il faut donc faire autant de mises à l'échelle qu'il y a de plans successifs, soit photographiquement (fig. 2), soit par des constructions graphiques. La mise en place sur le géométral des motifs qui ne sont pas dans ces plans, mais présentent un certain relief (décor, chapiteaux, etc.) met en application, graphiquement, les lois de la perspective, les repères de la chambre métrique donnant les éléments de base : ligne d'horizon et point de fuite. Cette géométrie descriptive appliquée est familière aux architectes. On peut d'ailleurs concevoir de petits appareils, faits de règles articulées, qui faciliteraient les constructions; K. Zaar avait présenté, en 1935, un tel appareil transformant en géométral l'image en projection centrale qu'est la photographie.

On remarquera que cette méthode repose sur certaines *hypothèses* de verticalité et de parallélisme des plans majeurs de la construction, hypothèses dont la vérifi-

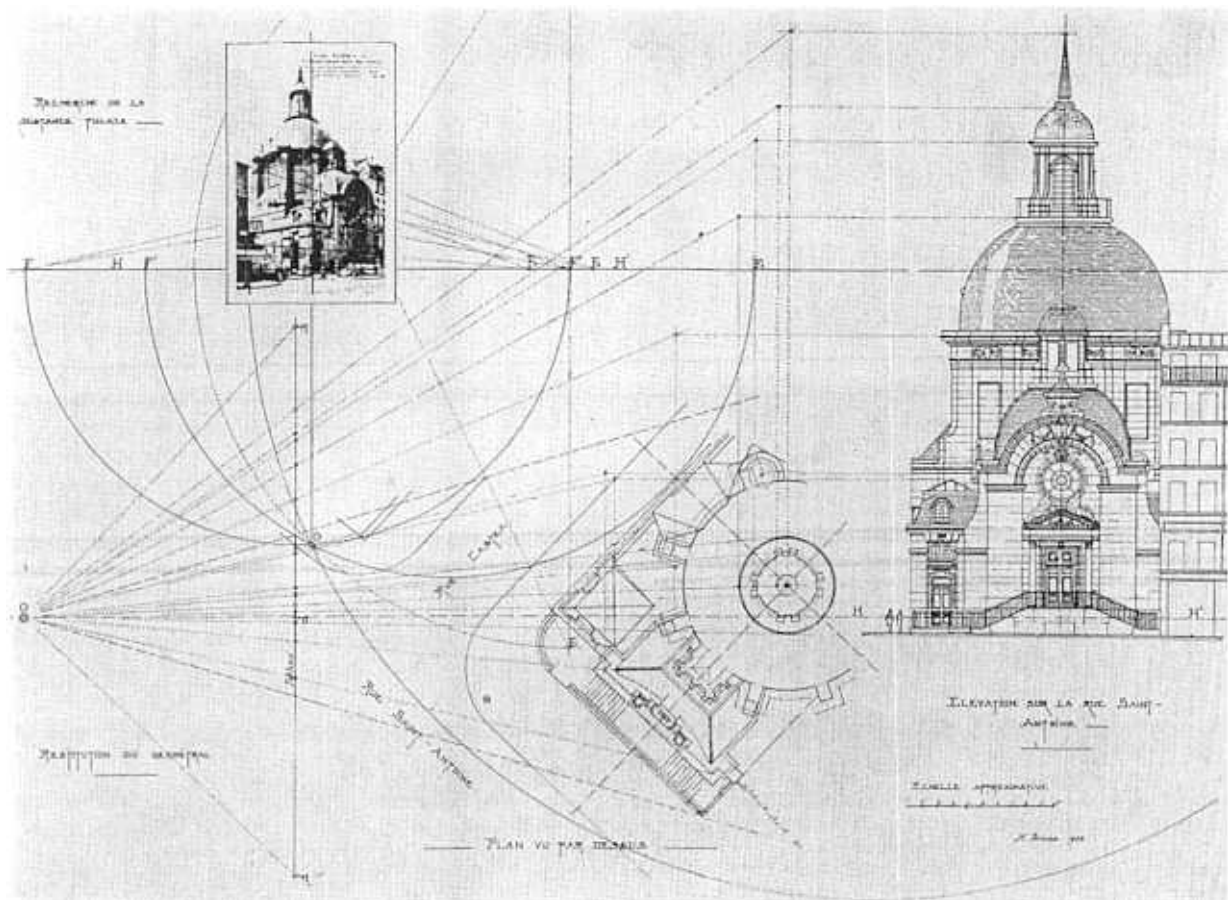


Fig. 3. — Relevé par constructions graphiques à partir d'une photographie. Le temple Sainte-Marie, à Paris. Relevé de H. Deneux (La Métrographie appliquée à l'Architecture, Paris, 1930).

cation par des mesures directes n'est pas toujours aisée. L'orientation de la chambre photographique, qu'elle soit faite à l'aide d'un dépoli portant une grille ou par des moyens optiques, sera elle-même tributaire de ces hypothèses. Cette méthode suppose, d'autre part, une certaine connaissance de la position réciproque des différents éléments considérés comme verticaux, donc pratiquement l'établissement préalable d'un plan de l'édifice. Enfin, la multiplication des constructions graphiques est forcément limitée et, si le monument est complexe, certains détails seront interpolés à vue entre les points et les lignes construites et mis en place sur le géométral avec moins de précision. Ces réserves ne diminuent nullement l'intérêt de ces méthodes dont J.P. Paquet s'est fait l'avocat lors du Colloque de l'ICOMOS en juillet 1968; elles conviennent essentiellement, comme il l'a indiqué lui-même, à des dessins approximatifs ou expressifs plus « indiqués » qu'exacts,

donnant avant tout une « impression très juste de l'esthétique d'un édifice » en vue d'un « premier examen des problèmes ».

2. L'exploitation des clichés isolés se complique singulièrement lorsqu'ils sont pris suivant un axe quelconque et lorsque, de plus, l'édifice ou l'élément architectural relevé présente une assez grande complexité. Les constructions graphiques doivent s'appuyer non seulement sur des hypothèses d'horizontalité, de verticalité, etc., mais aussi sur la position relative de certains points et sur des données linéaires et angulaires qui doivent être prélevées sur un plan ou obtenues par des mesures directes. Il faut un très grand talent d'architecte et des connaissances approfondies en perspective et en géométrie descriptive pour mener à bien une telle tâche dont on ne trouve guère d'exemple, à vrai dire, que dans l'œuvre de Deneux (fig. 3).

3. Dans le cas d'un sujet plan, les déformations pers-

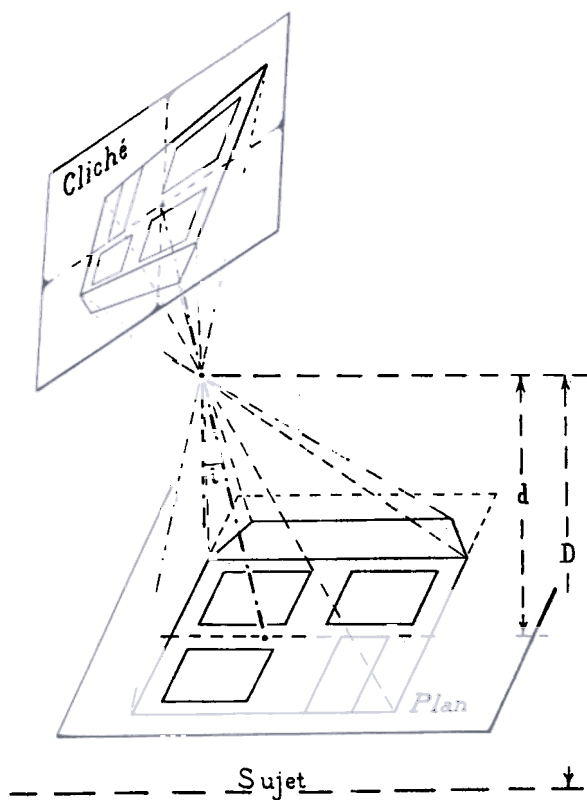


Fig. 4. — Principe du redressement photogrammétrique. Le cliché, pris selon un axe incliné de l'angle  $i$ , est mis en perspective avec le plan du géométral que l'on veut établir et dont l'échelle est égale au rapport  $d/D$ .

pectives de l'image photographique introduites par une inclinaison de l'axe de prise de vue peuvent être corrigées par les méthodes dites du *redressement* photogrammétrique. Or, faute de recul, ou en raison des obstacles qui peuvent gêner la prise de vue (piliers d'une église par exemple), cette inclinaison s'impose souvent.

Le redressement est une mise en perspective géométrique de l'image photographique et du plan du géométral établi à l'échelle désirée (fig. 4). Mais il convient d'insister sur le fait que cette opération n'est théoriquement exacte que dans l'hypothèse d'une *planéité rigoureuse du sujet*; tous les éléments qui sont en dehors du plan de référence de l'édifice (avancées de balcon, toits, etc.) restent déplacés sur l'image redressée; leur mise en place correcte sur le relevé pourra éventuellement être obtenue par des constructions relativement simples.



Fig. 5. — Redressement à la chambre claire. (Cliché IGN.)

D'autre part, hormis les cas exceptionnels où la position du point de vue et l'orientation de l'axe photographique par rapport au sujet sont déterminées, le redressement exige la connaissance de la position relative, sur le monument, d'au moins quatre points situés dans le plan de référence. Ces quatre points de contrôle, ou le quadrilatère qu'ils forment, peuvent être appliqués sur l'élément architectural traité : repères dessinés ou fixés, jalons verticaux, cadre formé de tubes métalliques assemblés et portant des voyants, etc. On peut aussi effectuer le redressement sur des lignes parallèles de l'édifice lui-même, lignes considérées comme horizontales et verticales.

3-1. Laissant de côté les méthodes graphiques qui ne sont guère applicables que dans des cas particulièrement simples, arrêtons-nous d'abord à la méthode du *redressement optique* dans laquelle la mise en perspective de la photographie et de l'épure est faite à l'aide d'une *chambre claire* (fig. 5). Cet instrument, identique à celui qui fut utilisé autrefois pour l'enregistrement des perspectives, coude à  $90^\circ$  une partie du chemin optique, celle qui vient de la photographie fixée sur une planchette sensiblement verticale, et dirige les rayons lumineux vers la table de travail sur laquelle est placée l'épure. On observe ainsi simultanément l'épure, par



Fig. 6. — Un exemple de restitution à la chambre claire. Le château de Neuhohenwang, Autriche. Echelle de l'original 1/100. (Document B D A, Vienne.)

vision directe, et la photographie, à travers le prisme; des lentilles correctrices additionnelles permettent de ramener dans le même plan les deux images. En modifiant par tâtonnements raisonnés l'orientation du prisme et de la planchette porte-cliché, on assure la coïncidence des images des quatre points de contrôle et de leurs points homologues sur l'épure. Il reste ensuite à suivre avec un crayon les lignes de l'édifice dont l'image apparaît, en géométral, sur le papier de l'épure.

L'application de cette méthode est assez délicate pour l'opérateur. Elle demande une certaine expérience. Mais elle reste éventuellement valable pour un relevé simple (fig. 6) ou pour compléter un relevé existant.

3-2. La véritable méthode photogrammétrique d'exploitation de clichés traités individuellement est le *redressement photographique*. A la mise en perspective de la photographie et du géométral, il ajoute une projection optique du cliché à travers un objectif. La théorie en est assez complexe et nous ne l'exposerons pas ici. Disons simplement que doivent être réalisés simultanément la condition de Newton (mise au point sur l'axe),

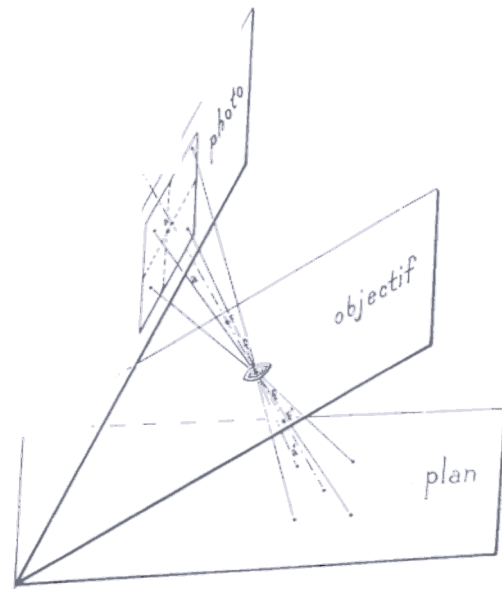


Fig. 7. — Principe du redressement photographique. A la mise en perspective géométrique du cliché et du plan, s'ajoute une projection donnant, sur un support sensible placé sur le plan, une image photographique redressée. Les trois plans (cliché, objectif, projection) concourent en une même droite et la condition de Newton doit être satisfaite:  $a.a' = f^2$ . Le cliché reçoit un décentrement  $\Delta$  par rapport à l'axe optique de l'appareil de redressement.

l'intersection sur une même droite du plan du cliché, du plan de projection du « plan de l'objectif » (netteté sur toute la surface de l'image), enfin un certain décentrement du cliché par rapport à l'axe optique de l'objectif (fig. 7). On peut également modifier l'échelle de la projection de sorte que le redressement photographique transforme le cliché original en une photographie semblable, à l'échelle voulue, à celle que l'on aurait obtenue si l'axe de prise de vue avait été perpendiculaire au plan de référence.

Des *appareils de redressement* sont conçus pour l'exécution précise de cette opération; les plus modernes réalisent automatiquement les différentes conditions géométriques et optiques (fig. 8). La commande de l'inclinaison de la table de projection et de l'éloignement de l'objectif entraîne les mouvements corrélatifs des autres parties de l'appareil. L'opérateur assure la coïncidence des images projetées des points de repère avec les points correspondants marqués sur la feuille de projection, ou le parallélisme des horizontales et des verticales de l'édifice avec les lignes d'un quadrillage, puis substitue à cette feuille ou à ce quadrillage un papier photographique qu'il impressionne (fig. 9).

Les photographies redressées peuvent être assemblées sous forme d'un *photoplan* (fig. 10) : on peut ainsi obtenir l'image totale d'un élément architectural de peu de relief qui n'a pu être enregistré qu'en plusieurs clichés.

Pour des raisons techniques de construction, les grands appareils de redressement, conçus principalement pour l'exploitation des photographies aériennes prises avec des chambres de tous formats et de toutes focales, ont des limites d'emploi assez étroites en ce qui concerne l'inclinaison de l'axe de prise de vue, limites d'autant plus faibles que la distance principale de la chambre utilisée est plus courte : environ  $16^\circ$  pour une distance principale de 200 mm, mais  $5^\circ$  pour une distance principale de 60 mm. Pour des clichés peu inclinés, on peut évidemment répéter l'opération plusieurs fois ou, s'ils sont pris avec une courte focale, les agrandir préalablement pour réduire le nombre de redressements. Mais cette multiplication des travaux photographiques diminue alors l'intérêt du redressement et affaiblit la qualité du document final.

3-3. Dans certains cas cependant, celui des façades élevées dans des rues étroites par exemple, la prise de vue selon un axe très incliné est indispensable et le choix d'une courte focale s'impose pour obtenir une profondeur de champ d'autant plus nécessaire que l'axe est plus incliné et le sujet plus élevé. On peut apporter une solution à ce problème en systématisant les conditions de prise de vues, c'est-à-dire en adoptant une inclinaison constante, l'axe optique étant placé dans un plan debout par un dispositif approprié d'orientation de la chambre (viseur à grille perspective ou système optique d'autocollimation sur une glace plaquée contre la façade). Ces conditions constantes simplifient considé-

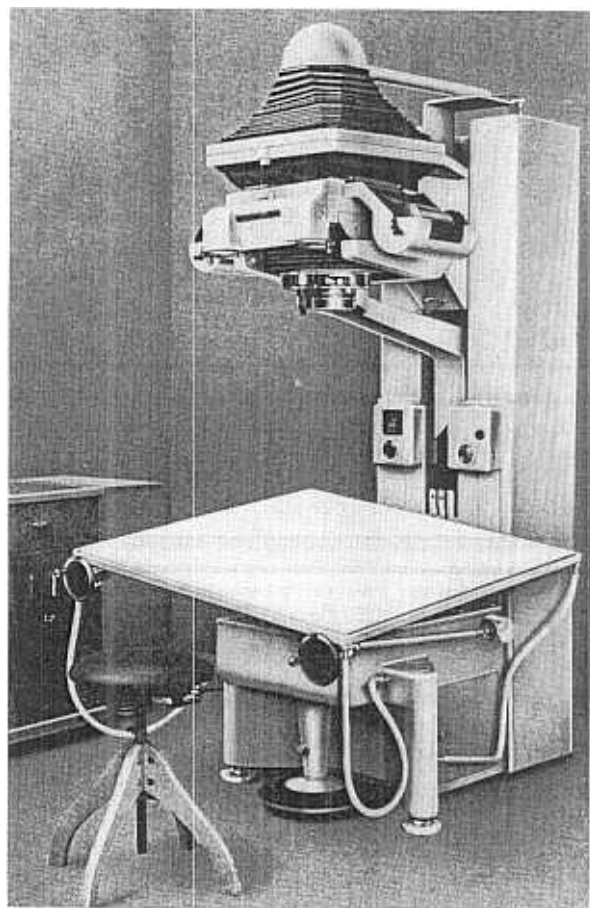


Fig. 8. — Un appareil de redressement photographique, le redresseur Zeiss SEG - V. (Cliché Zeiss.)

rament la réalisation de l'appareil de redressement qui peut être alors entièrement rigide si l'on renonce à réaliser simultanément le redressement et la mise à l'échelle (fig. 11); les travaux de laboratoire se réduisent à ces deux opérations effectuées successivement.

3-4. Il existe enfin des méthodes de *redressement analytique* dans lesquelles on procède par points, en aussi grand nombre que l'on veut, pourvu qu'ils soient situés dans le ou les plans de référence. À l'aide d'un comparateur, on mesure les coordonnées-images de tous ces points sur le cliché. Ces mesures sont traitées par le calcul, le plus souvent par le calcul électronique. On obtient ainsi, dans un système de deux axes lié au quadrilatère d'appui, les coordonnées, en vraie grandeur, de tous les points caractéristiques observés. Ces coordonnées peuvent être reportées, à l'échelle choisie, sur une épure et servir d'ossature au relevé graphique.



Fig. 9. — Photographie oblique et photographie redressée. Erfurt, Statthaltereier. (Cliché Institut für Denkmalpflege, Dresde.)

## II. METHODES PHOTOGRAMMETRIQUES TRAITANT DES COUPLES DE CLICHES

Le redressement n'apporte qu'une solution particulière au problème de l'établissement des plans d'un monument d'après les photographies puisqu'il ne permet de relever que des éléments plans ou considérés comme tels. Une solution générale de ce problème ne peut être obtenue que par le traitement simultané d'au moins deux photographies prises de deux points de vue différents. Les deux faisceaux perspectifs étant *reconstitués et réorientés*, les rayons relatifs à chaque point du monument se coupent deux à deux et l'ensemble de ces intersections forme, à une échelle donnée, un modèle semblable au sujet.

Cette *méthode des intersections* permet une reconstitution de l'édifice dans un espace à trois dimensions et offre la possibilité d'établir des plans et des coupes aussi bien que des élévations.

1. Dès les origines de la photogrammétrie, la méthode des intersections fut appliquée par des *constructions graphiques* faites à partir de données métriques relevées sur les photographies et de mesures linéaires et angulaires effectuées lors de la prise de vues. En 1850, Laussedat avait établi ainsi un relevé en plan du château de Vincennes, près de Paris, à l'aide de deux perspectives enregistrées à la chambre claire (fig. 12). Meydenbauer généralisa cette méthode, appliquée avec des photographies, à tous les relevés exécutés par le Messbildanstalt de Berlin qu'il fonda en 1885.



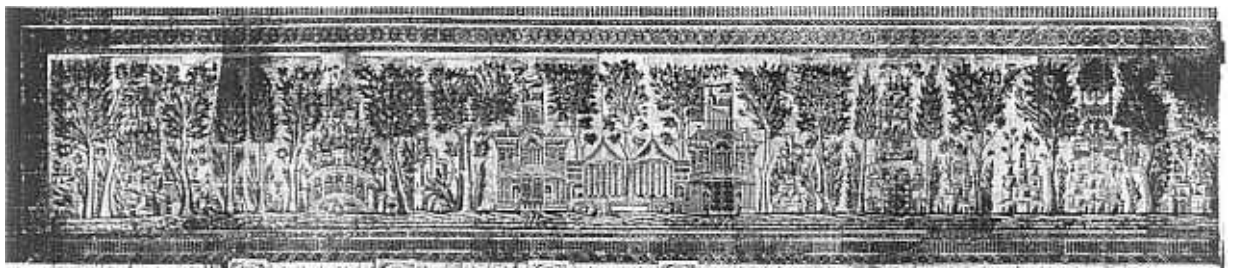
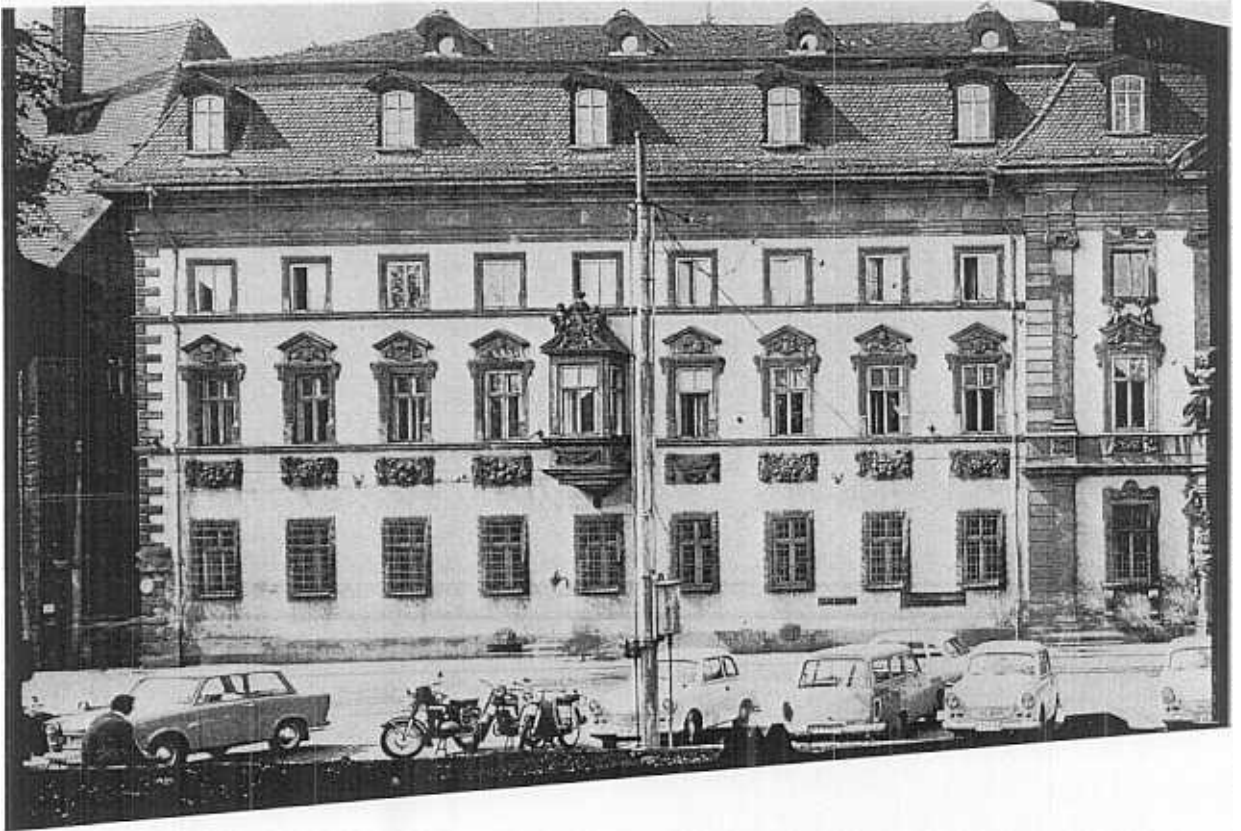


Fig. 10. — Un photoplan. Assemblage, à une échelle donnée, de photographies redressées. Mosaïque du portique ouest de la Mosquée des Omayyades à Damas. République Arabe Syrienne. Echelle de l'original 1/30. (Cliché IGN-UNESCO.)

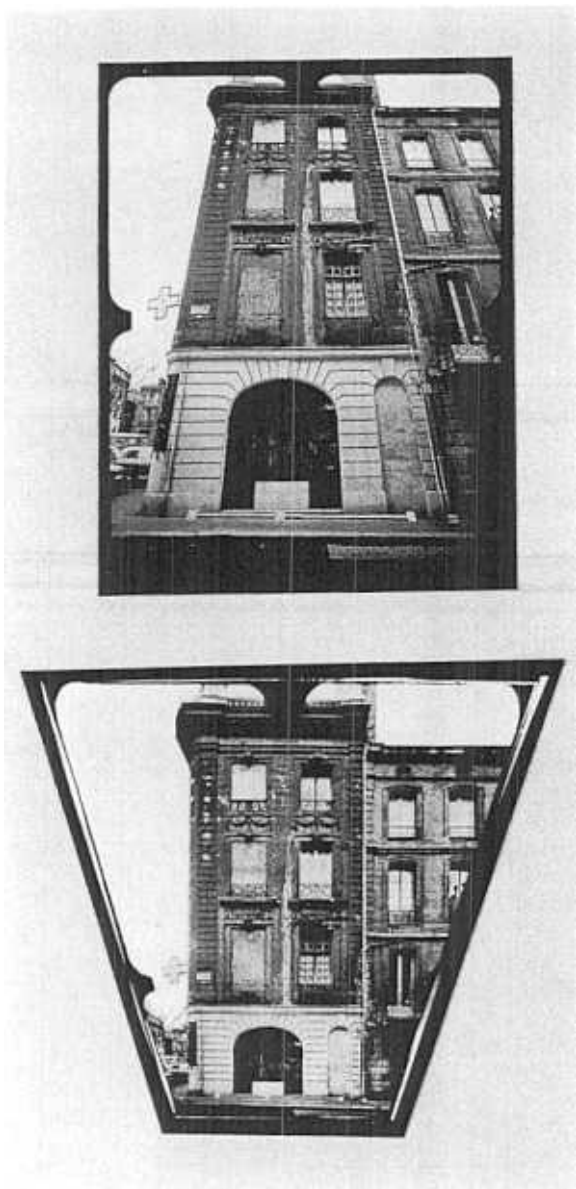


Fig. 11. — Redressement à angle constant. Photographie prise selon un axe incliné de 30 grades dans un plan debout et redressée avec un appareil à réglage constant. Echelle du redressement original 1/200. (Cliché IGN - Secteur sauvegardé de Bordeaux.)

La *base*, c'est-à-dire la distance qui sépare les deux points de vue, doit être grande par rapport à l'éloignement afin que les rayons perspectifs se coupent suivant un angle assez ouvert, voisin si possible d'un angle droit (fig. 13). Tous les points de vue sont déterminés par polygonation et triangulation, ainsi que certains points remarquables de l'édifice. La direction de chaque axe de prise de vue est obtenue en orientant systématiquement la chambre photographique sur l'un des points de repère intersectés sur le monument (fig. 14).

Lors de l'exploitation des clichés, tous les éléments topométriques (position des stations photographiques et points de repère sur l'édifice) sont reportés sur un plan.

On peut donc tracer chaque axe photographique et, à partir du point de vue, construire en vraie grandeur le centre du cliché, la trace de ce cliché, la projection horizontale de chaque point que l'on veut « restituer » et la visée relative à ce point. L'intersection des visées homologues issues des deux points de vue donne la position du point sur le plan. Quant à sa position en hauteur, on l'obtient par des calculs très simples à partir de mesures graphiques sur les photographies et sur le plan. Ainsi construit-on, point par point, les élévations. Le dessin définitif est établi à partir de ce canevas (fig. 15).

Le procédé peut évidemment être étendu à un nombre de clichés supérieur à deux.

2. La méthode des intersections graphiques fut employée au Messbildanstalt de Berlin jusqu'à sa disparition en 1945. Deneux, entre autres, en fit également usage. Cependant, dès les premières années du XX<sup>e</sup> siècle, était apparue la *stéréophotogrammétrie* dont le professeur autrichien Eduard Doležal s'était fait aussitôt le propagateur et qui, après la seconde guerre mondiale, fit définitivement abandonner les constructions graphiques ponctuelles.

La stéréophotogrammétrie impose des bases plus courtes et des axes photographiques dont la convergence est limitée, afin de permettre un *examen stéréoscopique* des clichés (fig. 16). L'exploitation de ces clichés se fait dans des *appareils de restitution*, appareils optico-mécaniques dans lesquels s'opèrent successivement la reconstitution des faisceaux perspectifs relatifs aux deux clichés formant un *couple*, l'orientation relative de ces faisceaux l'un par rapport à l'autre, opération qui assure l'intersection des rayons homologues et la formation d'un *stéréomodèle*, enfin la mise à l'échelle exacte de ce modèle et son orientation absolue par rapport aux plans de référence choisis. Lorsque ces réglages sont effectués, l'opérateur observe dans le système optique binoculaire de l'appareil une image en relief du monument et, dans la même vision en relief, un index. À l'aide de trois commandes, généralement deux volants et une pédale, il peut donner à cet index un déplacement apparent à la surface de l'image du monument et suivre toutes les lignes architecturales qu'il désire relever. Les trois commandes entraînent simultanément des dispositifs méca-

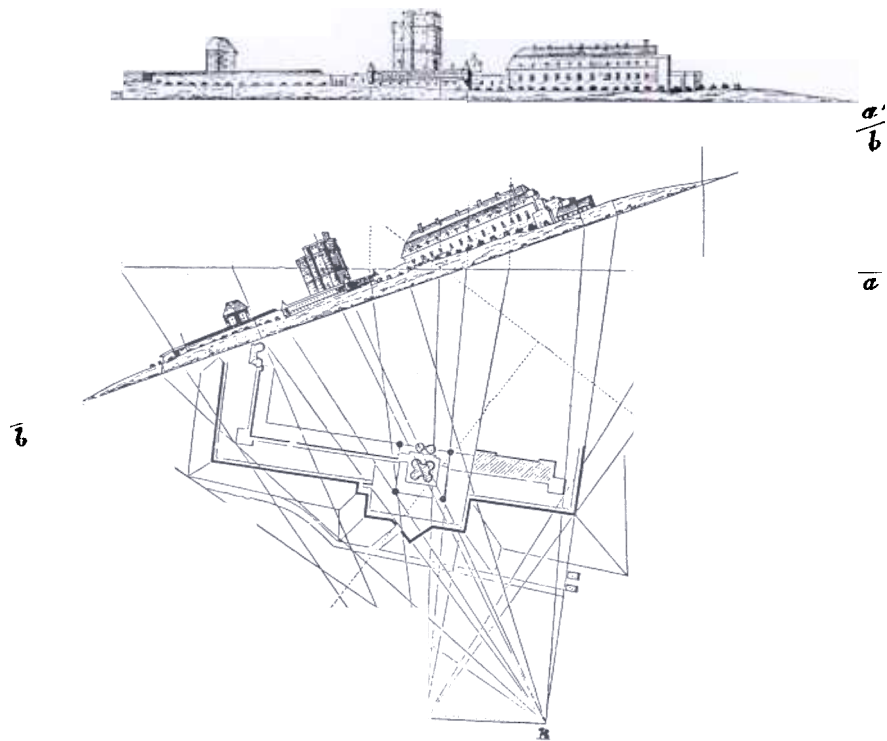


Fig. 12. — Relevé par la méthode des intersections graphiques appliquée à des perspectives enregistrées à la chambre claire. Relevé du château de Vincennes par A. Laussedat, 1850.

niques qui mettent eux-mêmes en mouvement un système traceur (coordinatographe); celui-ci dessine, à l'échelle du relevé, la projection orthogonale de chaque ligne suivie. Il est généralement possible de choisir trois plans de référence orthogonaux permettant d'établir une élévation et des coupes horizontales et verticales.

La stéréophotogrammétrie réalise donc automatiquement pour des lignes continues ce que la méthode des intersections graphiques effectue, par des constructions délicates, pour des points caractéristiques du monument. Elle atteint, grâce à l'acuité stéréoscopique de l'œil et à la parfaite réalisation des appareils, une haute précision, pourvu que le rapport de la base à l'éloignement ne soit pas trop petit <sup>(1)</sup> et que l'échelle des photographies ne soit pas trop faible par rapport à celle du tracé. La précision du centimètre pour des éléments architecturaux moyens, de quelques centimètres pour les grands édifices, peut être atteinte. Notons qu'il s'agit d'une précision absolue sur la position de chaque détail dans le système de référence choisi, de sorte que la précision relative sur les longueurs, habituellement considérée dans les relevés architecturaux, varie avec ces longueurs elles-mêmes.

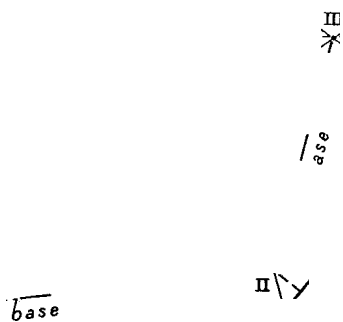


Fig. 13. — Principe de la prise de vues dans la méthode des intersections graphiques. Grandes bases et axes convergents.

<sup>(1)</sup> Il est préférable que ce rapport reste compris entre 1/5 et 1/15, exceptionnellement 1/20; la première limite évite d'enregistrer des contours apparents trop différents sur les deux clichés d'un même couple; la seconde maintient la précision de la restitution.

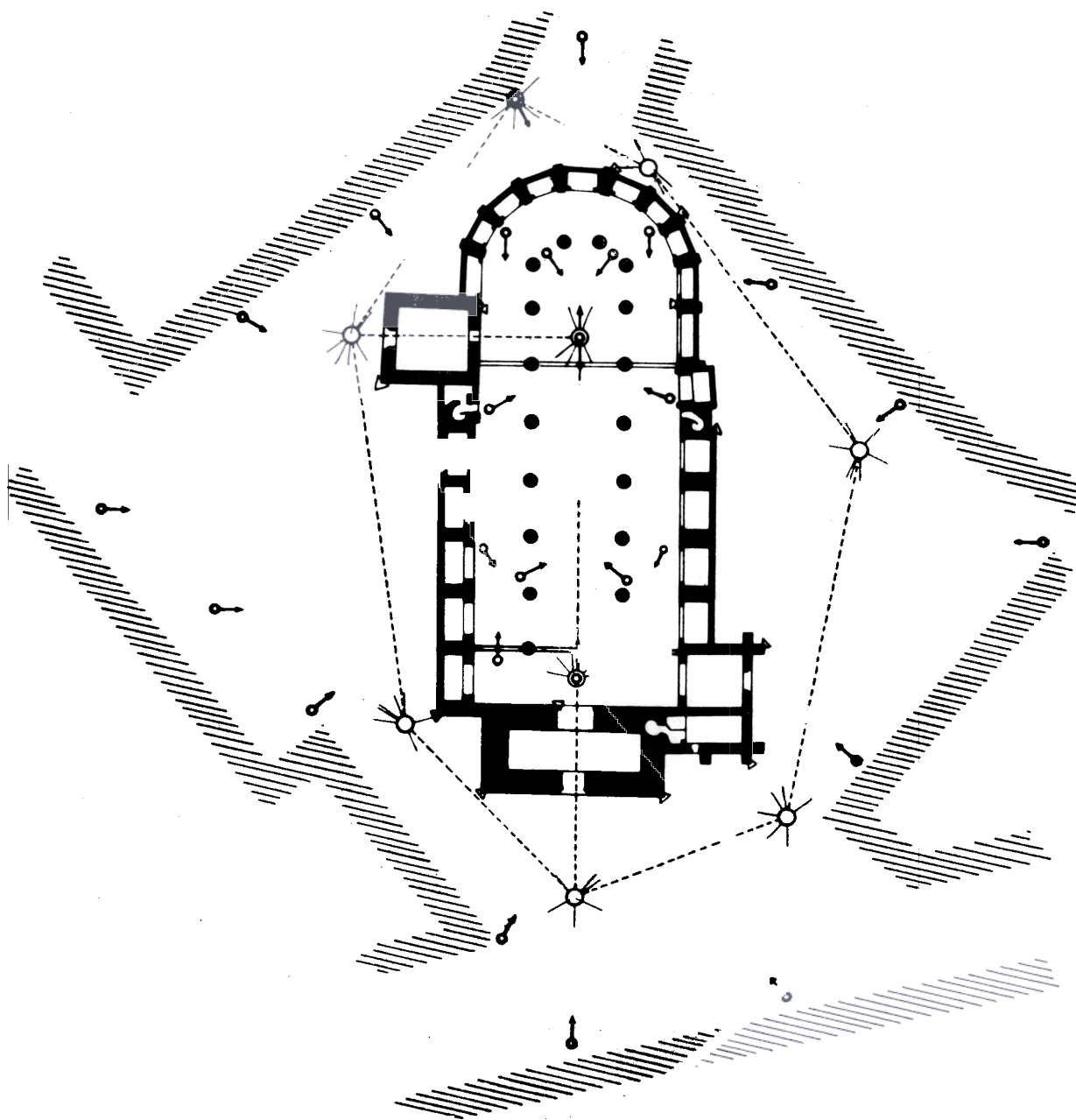
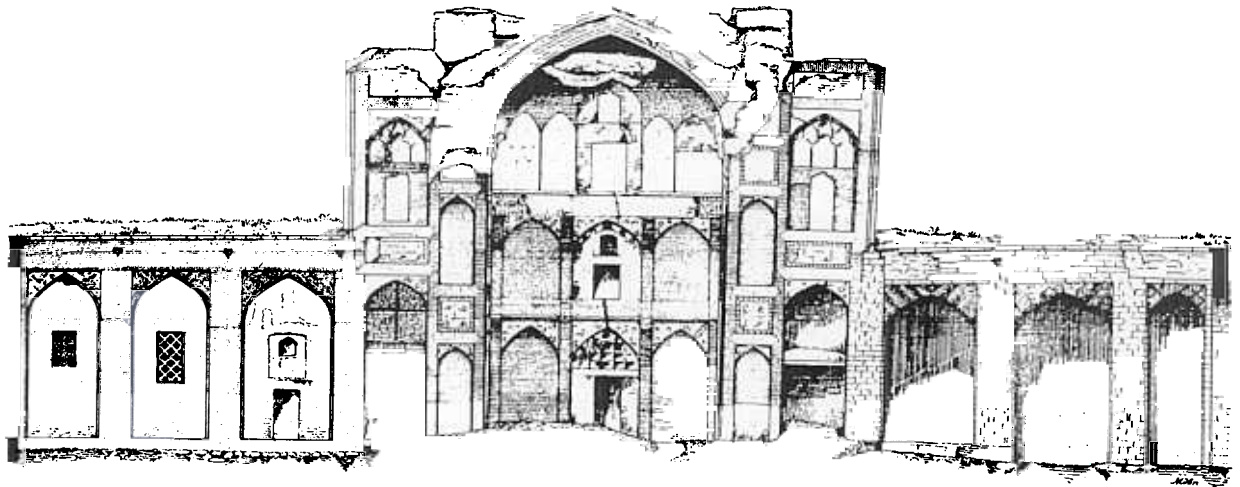


Fig. 14. — Exemple de prise de vues selon la méthode des intersections graphiques. Plan du relevé photogrammétrique de l'église Saint-Nicolas à Berlin par Meydenbauer.  $\odot \rightarrow$  stations photographiques et directions des axes,  $\square$  stations de triangulation,  $\Delta$  points de repère intersectés. (Document communiqué par le Prof. R. Burkhardt, Berlin.)

Fig. 15. — Exemple de relevé photogrammétrique par la méthode des intersections graphiques. La Mosquée du Vendredi à Shiraz, Iran. Relevé établi par A. Meydenbauer (1879) d'après les clichés pris par Stolze. (Document communiqué par l'ing. R. Meyer, Dresde.)

Fig. 16. — Principe des relevés stéréophotogrammétriques. (Document IGN.)



<p>① Prise de vues</p>	<p>② Reconstitution des faisceaux perspectifs</p>	<p>③ Orientation relative des faisceaux perspectifs. Formation du modèle à l'échelle <math>\frac{A+B}{B}</math></p>
<p>④ Orientation absolue et mise à l'échelle définitive sur les points d'appui connus. Echelle: <math>\frac{A+B}{B}</math></p>	<p style="text-align: center;"><b>Organes constitutifs d'un appareil de restitution analogique</b></p> <p>1° Dispositif permettant la reconstitution des faisceaux perspectifs (optiquement ou mécaniquement).</p> <p>2° Système optique permettant d'observer stéréoscopiquement les deux clichés restitués et de faire des pointés, en posant optiquement un index, qui fait partie de l'espace observé par l'opérateur, sur l'image en relief de l'objet.</p> <p>3° Système mécanique commandant le déplacement apparent de l'index dans les trois dimensions et matérialisant simultanément, par des tiges ou des règles articulées, les rayons perspectifs correspondant au détail pointé ainsi que l'intersection de ces rayons.</p> <p>4° Dispositif traceur, entraîné par le système mécanique, permettant le report, en projection orthogonale, à une échelle donnée, des points ou des lignes de l'objet pointés ou vues par l'index.</p>	<p>⑤ Exploration du modèle et restitution</p>

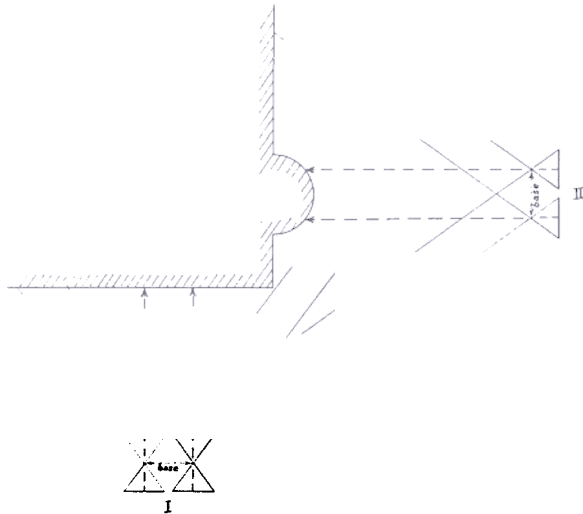


Fig. 17. — Schéma d'une prise de vues stéréophotogrammétrique dans le cas normal. Les axes optiques font un angle droit avec la base qui est elle-même parallèle au plan de référence du relevé. Comparer à la figure 13.

2-1. On apporte une simplification importante au schéma général de la stéréophotogrammétrie en plaçant la base parallèlement au plan de référence du relevé et en assurant le parallélisme des axes de prise de vue et leur perpendicularité à la base (fig. 17). Ce cas *normal*, selon la terminologie des photogramètres, peut être réalisé soit avec des chambres métriques munies d'un dispositif de visée dans une direction perpendiculaire à l'axe optique, soit surtout avec des *chambres stéréométriques* formées de deux chambres métriques identiques montées sur une base rigide de longueur parfaitement étalonnée : le plus souvent 1,20 m ou 2 m et, pour les sujets rapprochés, 0,40m ou 0,60 m (fig. 18). Les appareils de restitution peuvent être alors d'une conception plus simple, tout en conservant une égale précision (fig. 19). Ces appareils et les chambres stéréométriques forment généralement un équipement global, dont les éléments peuvent difficilement être dissociés et utilisés avec d'autres matériels. Dans ce type d'équipe-

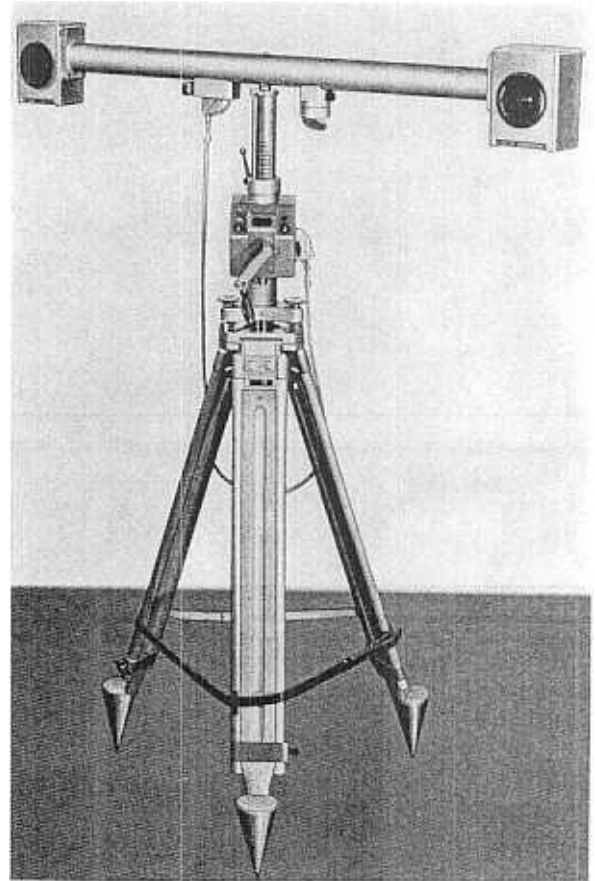


Fig. 18. — Une chambre stéréométrique, la chambre Zeiss S M K - 120. Base 120 cm, focale 60 mm, format utile  $8 \times 10$  cm. (Cliché Zeiss.)

ment, la tendance actuelle est aux chambres grand-angulaires de petit format ( $6,5 \times 9$  à  $9 \times 12$  cm par exemple) et de courte focale (60 mm par exemple). Dans la majorité des cas, la base est horizontale et les axes optiques sont horizontaux (élévation) ou verticaux (voûtes et plafonds, ou sols), donc perpendiculaires au plan de référence; c'est d'ailleurs la seule condition dans laquelle puissent fonctionner les appareils limités au cas normal. Mais souvent aussi (façades dans des rues étroites, murs intérieurs photographiés sans recul suffisant, dallages enregistrés du haut d'une tribune, etc.) on ne peut obtenir sur le cliché la totalité de l'élément architectural relevé qu'en inclinant les axes optiques par rapport au plan de référence. Le Dr Foramitti, du Bundesdenkmalamt de Vienne, a apporté une heureuse solution à ce problème. Grâce à un niveau décalé précis, on donne à l'inclinaison des axes une valeur constante (30 grades par exemple ou le complément 70 grades) (fig. 20) et l'on interpose entre l'appareil de restitution

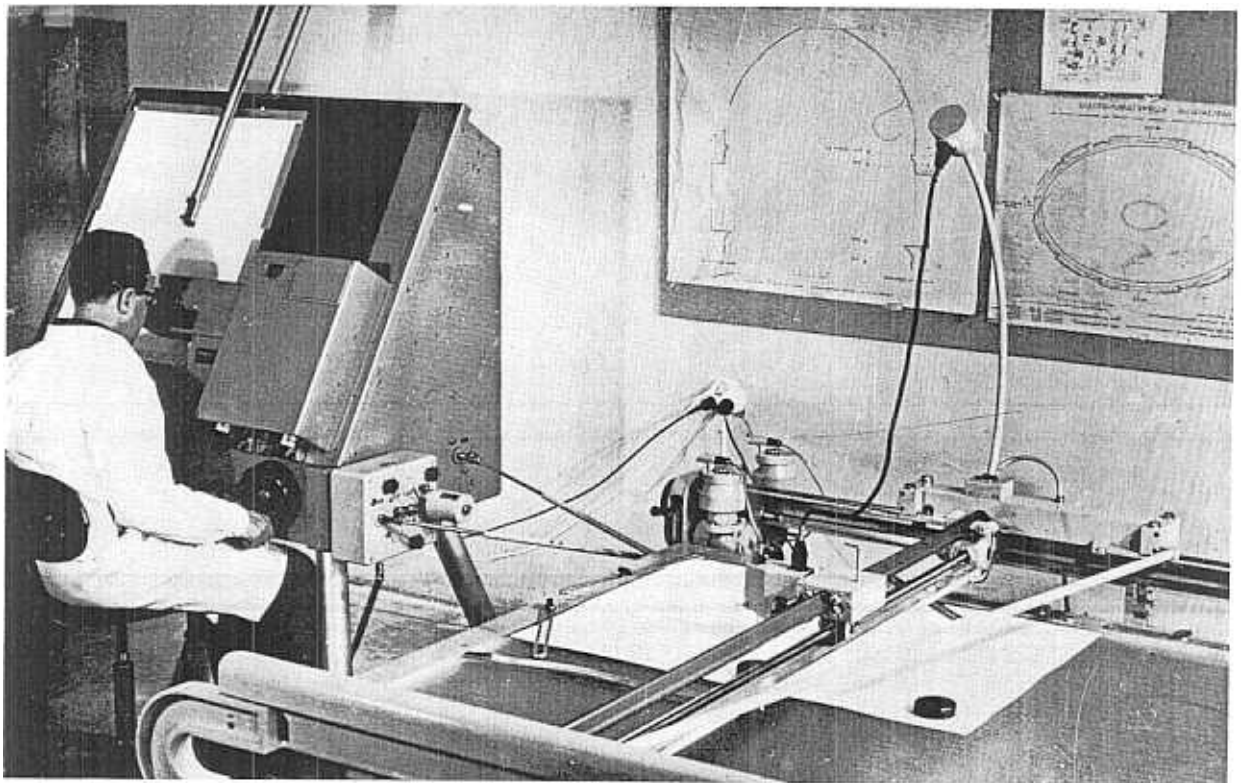


Fig. 19. — Un appareil de restitution exploitant les clichés pris dans le cas normal, le Terragraph Zeiss. Sur la face droite de l'appareil, le calculateur corrigeant les déformations dues à une inclinaison des axes de prise de vues (30 ou 70 grades). (Cliché B D A, Vienne.)

et le coordinatographe un calculateur analogique qui opère une rotation d'axes autour de la base et transmet au dispositif traceur des déplacements corrects dans le plan de projection.

Plus exceptionnellement, la même méthode peut être appliquée avec des photographies prises de flanc; la base est alors verticale et les axes optiques, horizontaux, sont inclinés du même angle fixe sur le plan de référence vertical.

La base étant connue avec précision, il n'est théoriquement pas indispensable, lorsqu'on opère dans le cas normal, de prendre des mesures sur l'édifice. Des contrôles cependant sont toujours nécessaires et il est prudent de mesurer une ou plusieurs longueurs sur l'édifice, ou encore l'éloignement du sujet par rapport à l'un des points de vue. Il sera toujours bon aussi de matérialiser une verticale ou la trace d'un plan horizontal.

2-2. Lorsque les dimensions de l'édifice imposent un recul important, lorsque les éléments debout ou la multiplicité des plans créent trop d'angles morts pour qu'une prise de vues à axes très inclinés soit possible, lorsque la configuration du monument ou son environnement gênent les visées réciproques entre les stations photographiques, on ne peut plus obtenir que de façon plus ou moins approximative les parallélismes ou orthogonalités qu'imposent le cas normal. S'il est bien préférable de s'efforcer toujours d'opérer dans ce cas, il arrive, surtout pour le relevé des grands monuments, qu'il faille y renoncer. On utilise alors des chambres métriques individuelles (fig. 21) et, pour l'exploitation des clichés, des appareils de restitution *universels* (fig. 22) dans lesquels les inclinaisons des axes et les composantes des bases selon les axes de référence peuvent être introduites, soit directement si elles ont été mesurées ou calculées lors des travaux sur place, soit indirectement par les opérations classiques de la

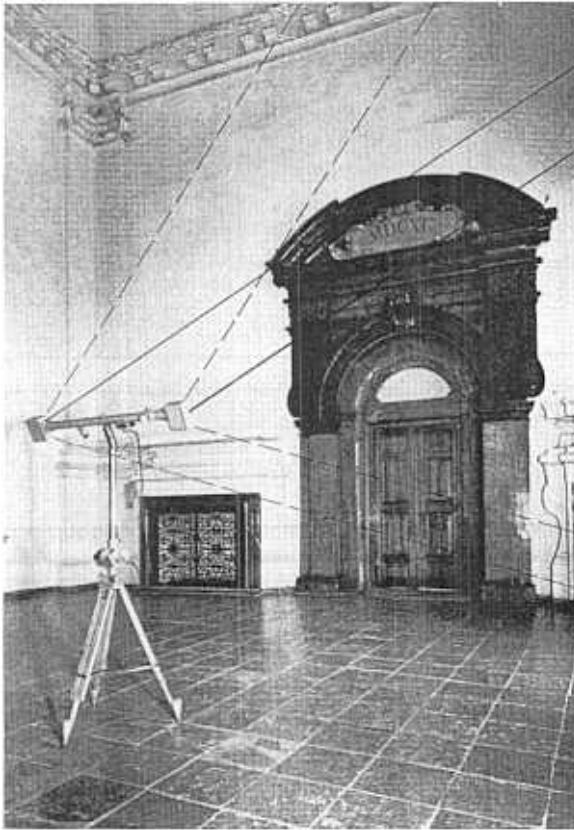


Fig. 20. — Prise de vues dans le cas normal avec des axes inclinés de 30 grades. Chambre Zeiss SMK-120. (Cliché B D A, Vienne.)

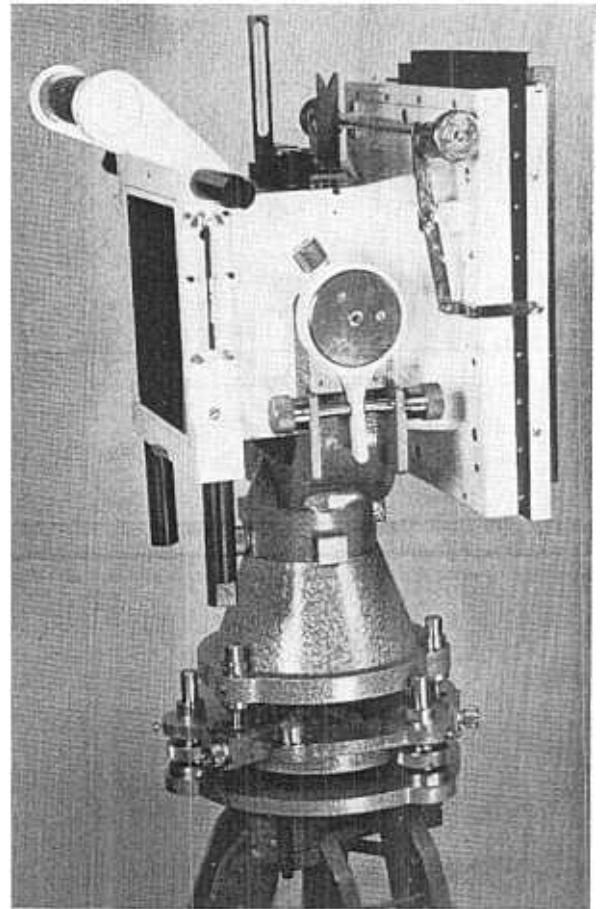


Fig. 21. — Une chambre métrique individuelle. Chambre spécialement réalisée à l'IGN de Paris pour les relevés d'architecture. Focale 125 mm, format  $18 \times 18$  cm. (Cliché IGN.)

stéréophotogrammétrie : orientation relative des chambres, suivie de l'orientation absolue du modèle. Ces appareils sont les mêmes que ceux qui sont d'un usage courant en stéréophotogrammétrie topographique aérienne. On remarquera d'ailleurs que la photogrammétrie architecturale est beaucoup plus voisine de la « photogrammétrie aérienne », puisque les axes de prise de vues sont sensiblement perpendiculaires au sujet, que de la photogrammétrie dite « terrestre », dans laquelle on exploite par projection sur un plan horizontal des photographies prises elles aussi selon des axes horizontaux.

Les mesures sur place nécessaires à la mise à l'échelle du modèle et à son orientation par rapport aux plans de référence sont plus importantes que dans le cas

normal. Elles peuvent être de deux types :

a) Dans un système d'axes liés aux plans de projection du relevé, on détermine la position des stations photographiques et les directions des axes optiques ou des rayons perspectifs relatifs à un certain nombre de repères choisis ou placés sur le monument. Cette méthode nécessite l'emploi de *photothéodolites* (fig. 23) ou l'utilisation successive, sur le même support, d'une chambre métrique, puis d'un théodolite.

b) On ne mesure pas les éléments ci-dessus, mais on détermine la position de repères sur le monument; ces repères forment le *canevas* sur lequel s'appuiera la restitution stéréophotogramétrique. Un canevas de ce type est, en particulier, indispensable si l'on désire faire le relevé complet d'un édifice ou d'un ensemble monu-





Fig. 22. — Un appareil de restitution universel. Stéréotopographe SOM-Poivilliers type BP. Restitution en sections verticales équidistantes d'un bas-relief égyptien. (Cliché IGN.)

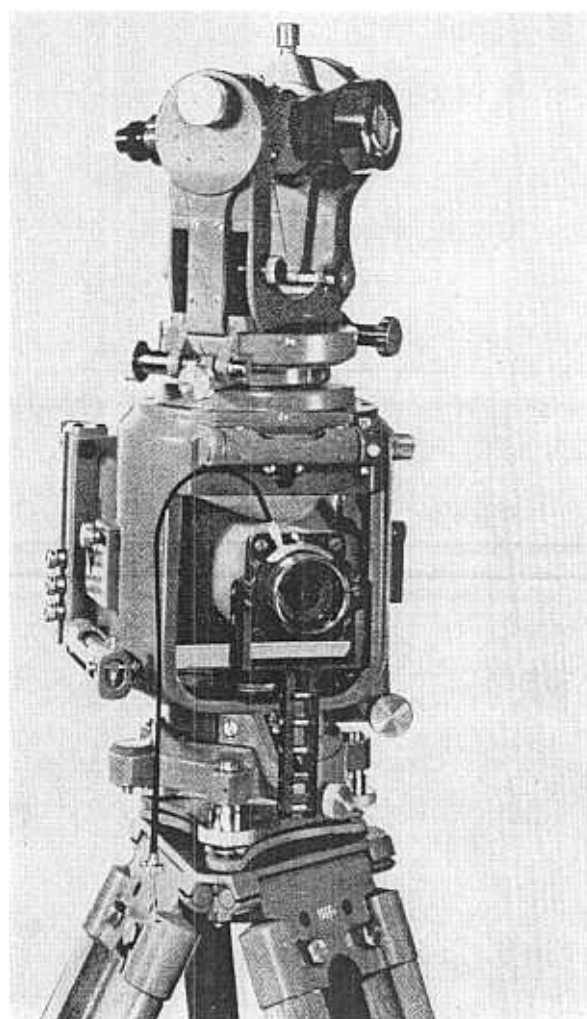


Fig. 23. — Un photothéodolite. Photothéodolite Wild P. 30. Focale 165 mm, format  $10 \times 15$  cm. (Cliché Wild.)

mental en reliant entre elles, dans leurs positions relatives, les différentes parties (fig. 24).

3. Les appareils de restitution sont généralement équipés de règles graduées ou de compteurs qui permettent de mesurer, dans le système d'axes de l'instrument, les coordonnées de n'importe quel point du modèle. Il est facile ensuite de transformer ces coordonnées dans le système de référence du relevé. Cette *stéréorestitution numérique* peut être appliquée si l'on se contente de déterminations ponctuelles servant ensuite d'ossature à un relevé graphique; mais c'est une assez mauvaise utilisation des possibilités de la stéréorestitution. Plus généralement cette méthode sera retenue s'il s'agit simplement de mesurer des longueurs, des orientations ou des angles sur l'édifice, ou encore pour déterminer, à l'aide d'un couple

de photographies couvrant l'ensemble d'un élément architectural, le canevas d'appui nécessaire à la restitution d'autres clichés à plus grande échelle ne couvrant que certaines parties de cet élément.

4. Enfin, il existe des méthodes de *restitution analytique* qui exploitent par le calcul des mesures de coordonnées faites directement sur les clichés, à l'aide de comparateurs, et non plus sur le stéréomodèle formé dans un appareil de restitution. Ces méthodes conduisent, comme la stéréorestitution numérique, à des déterminations ponctuelles et s'appliquent dans les mêmes cas. Rendues aujourd'hui d'un emploi plus aisé par les enregistreurs automatiques et le calcul électronique, elles peuvent être considérées comme la forme moderne de la méthode des intersections graphiques.



Fig. 24. — Relevé photogrammétrique de la face sud de la cathédrale de Strasbourg. A gauche, canevas des points de repère déterminés sur le monument dans un système de référence XYZ. A droite, schéma de la prise de vues. (Document IGN.)

### III. DIVERS CHAMPS D'APPLICATION DES METHODES PHOTOGRAMMETRIQUES DANS LES RELEVES D'EDIFICES ET D'ENSEMBLES MONUMENTAUX ANCIENS

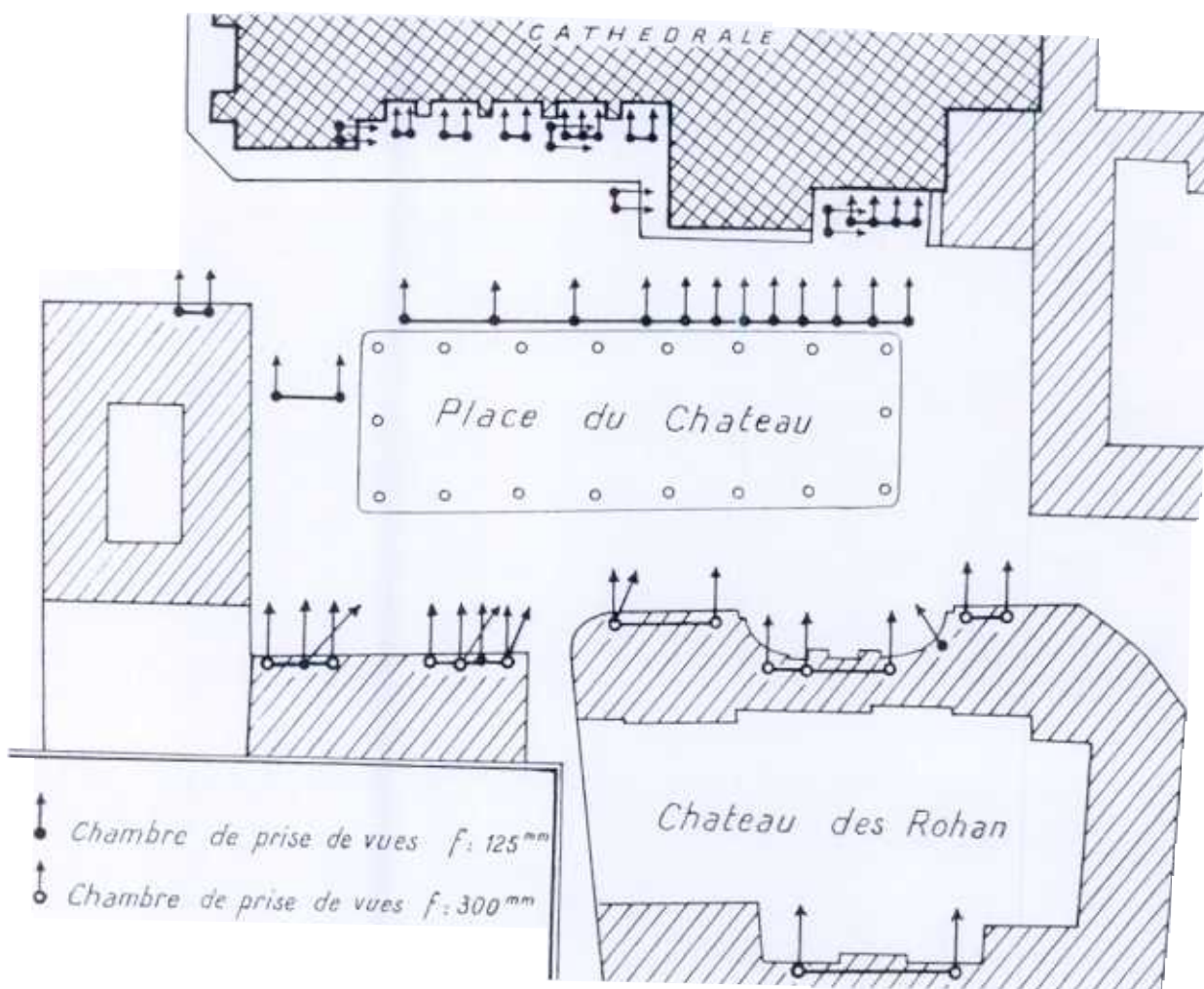
L'une des préoccupations du Colloque de l'ICOMOS sur l'étude de la photogrammétrie appliquée aux monuments historiques (Saint-Mandé, 4 - 6 juillet 1968) fut de définir les différents types de relevés nécessaires à l'étude, la conservation et la mise en valeur de ces monuments et de dresser le tableau correspondant des solutions offertes par la photogrammétrie <sup>(2)</sup>.

<sup>(2)</sup> N.d.I.R. Les rapports du colloque sont disponibles au bureau de la Revue.

1. Dans une première catégorie, on peut grouper les *relevés simples et rapides* en vue d'un dessin à caractère surtout expressif, relevés destinés à des avant-projets de restauration, des études préliminaires de mise en valeur, etc. Les tolérances sur la précision sont assez grandes, 5 % par exemple sur les longueurs principales.

Pour les travaux de ce type, la prise de vues, effectuée avec chambres individuelles ou stéréométriques, généralement de petit format et réalisant de préférence le cas normal, est accompagnée de la détermination d'éléments de contrôle aussi simples que possible : repérage d'horizontales ou de verticales, mesures de longueurs. En raison de l'esprit dans lequel ces relevés sont entrepris, l'exploitation des clichés peut se faire :

— par des constructions graphiques mettant en place sur l'épure des points caractéristiques de l'édifice entre



lesquels le dessin sera interpolé : constructions traitant des clichés isolés, selon les procédés exposés au début de cette étude, ou des couples de clichés par la méthode des intersections graphiques;

- par redressement à la chambre claire;
- par redressement photographique, les redressements successifs d'un même ensemble pouvant être ensuite assemblés sous forme d'un photoplan, ou éventuellement exploités graphiquement;
- par stéréorestitution graphique rapide avec des appareils simplifiés.

Pour les relevés de ce type et plus particulièrement pour les développements sommaires de façades, il convient de souligner l'intérêt que présentent le redressement et les photoplans (fig. 25). Avec une image photographique redressée, sans correction, par des constructions graphiques, des déformations perspectives

des éléments debout ou situés dans des plans différents du plan général de la façade, on obtient certes un relevé imparfait, mais dont certains pensent qu'il est un pré-document essentiel, ayant la valeur d'un constat de l'état de l'édifice et permettant toute étude préliminaire. Cet intérêt a été fortement marqué par les services des monuments historiques tchécoslovaques lors du Colloque de l'ICOMOS et lors du symposium sur les relevés architecturaux qui s'est tenu à Prague du 15 au 18 octobre 1968.

2. Un deuxième groupe, le plus important, comprend les *relevés détaillés et précis* exécutés en vue de travaux de restauration, de mise en valeur et d'études scientifiques, notamment d'études de tracés directeurs. Les tolérances sur la précision se resserrent et s'expriment par une erreur absolue de quelques centimètres sur la position de chaque détail de la construction dans le

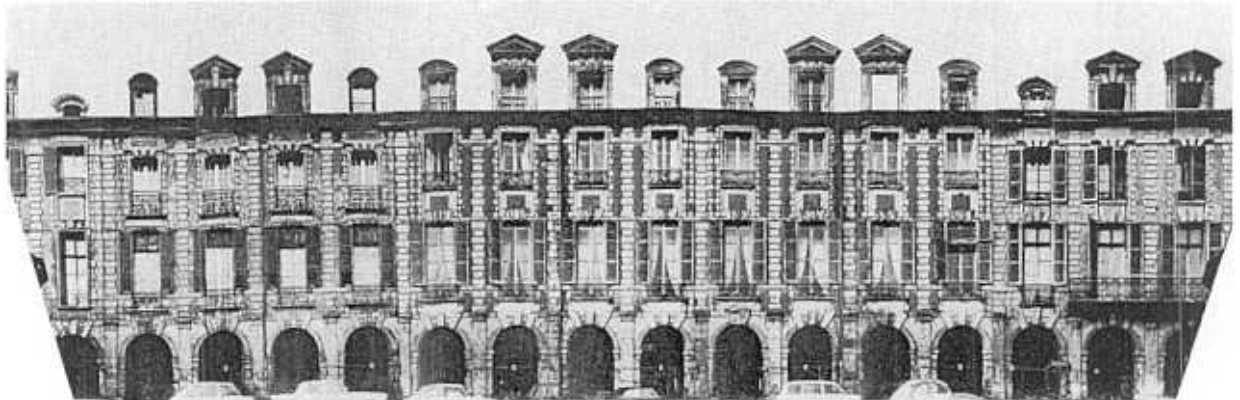


Fig. 25. — Relevé par assemblage de photographies redressées. La place des Vosges à Paris, côté Ouest. Les toits et les cheminées, n'étant pas dans le plan général de la façade, présentent sur les photographies redressées d'importantes déformations perspectives qui rendent leur assemblage impossible et ont été supprimés. Echelle de l'original 1/100. (Cliché IGN.)

système de référence choisi. Tous les *travaux courants de la conservation* des monuments historiques, qu'il s'agisse d'éléments architecturaux considérés individuellement, d'édifices entiers, de développements de façades dans les vieux quartiers ou d'ensembles monumentaux anciens, appartiennent à ce deuxième groupe, sous réserve toutefois qu'ils ne concernent pas de grands monuments ou des éléments architecturaux de très grandes dimensions, cas qu'il convient de considérer spécialement.

Pour les sujets de petites ou moyennes dimensions, les opérations sur place ne diffèrent guère de celles qui conviennent à la première catégorie. L'emploi de chambres métriques de plus grand format peut cependant être envisagé et les mesures de contrôle seront plus nombreuses et plus soignées, comportant des opérations topométriques allégées.

La stéréorestitution, exploitant de préférence des clichés pris dans le cas normal, est la meilleure solution d'établissement des documents graphiques (et éventuellement des données numériques linéaires ou angulaires). Elle permet en effet un tracé continu et d'une précision homogène de tous les éléments architecturaux dans leurs moindres détails, donnant directement le géométral (fig. 26) ou les coupes. Ce tracé est *objectif*, ce qui ne veut pas dire qu'il ne comporte pas une certaine part d'interprétation, par l'opérateur, de l'image en relief qu'il observe, interprétation qui pourra être grandement facilitée par l'enregistrement, au cours des travaux sur

place, des photographies stéréoscopiques de détails <sup>(3)</sup>. Objectif, le tracé photogrammétrique exprime la *forme effective* du monument, avec toutes les irrégularités, les modifications voulues ou non, les déformations apportées dès la construction ou subies au cours des temps, forme qui se distingue souvent de la *forme théorique* conçue au départ par l'architecte et, plus encore, de la *forme apparente* que perçoit un spectateur placé en un certain point de vue. La connaissance de la forme effective, expression géométrique de l'état actuel du monument, est indispensable à toute étude de déformation et de restauration, aussi bien qu'aux recherches techniques sur la construction, études et recherches dont le Professeur R. de Vita disait au colloque de l'ICOMOS qu'elles exigent un « relevé scientifiquement correct qui garantit la mesure rigoureuse de toutes les parties de l'édifice » et que la photogrammétrie leur offre « un mode nouveau de pénétrer à l'intérieur de l'œuvre architectonique au moyen d'éléments décrits avec une précision graphique et non pas esquissés ou expliqués par un rapport ».

<sup>(3)</sup> « Le photogrammètre ne se limitera pas exclusivement à la prise de vue de stéréogrammes dont le seul but est la restitution photogrammétrique. Il devra aussi veiller à fixer sur les clichés les nuances et les subtilités particulières des œuvres d'art architectoniques. Certains stéréogrammes ne seront même pas destinés à la restitution photogrammétrique, mais à améliorer cette interprétation architectonique » (F. Cattelain, 1956).

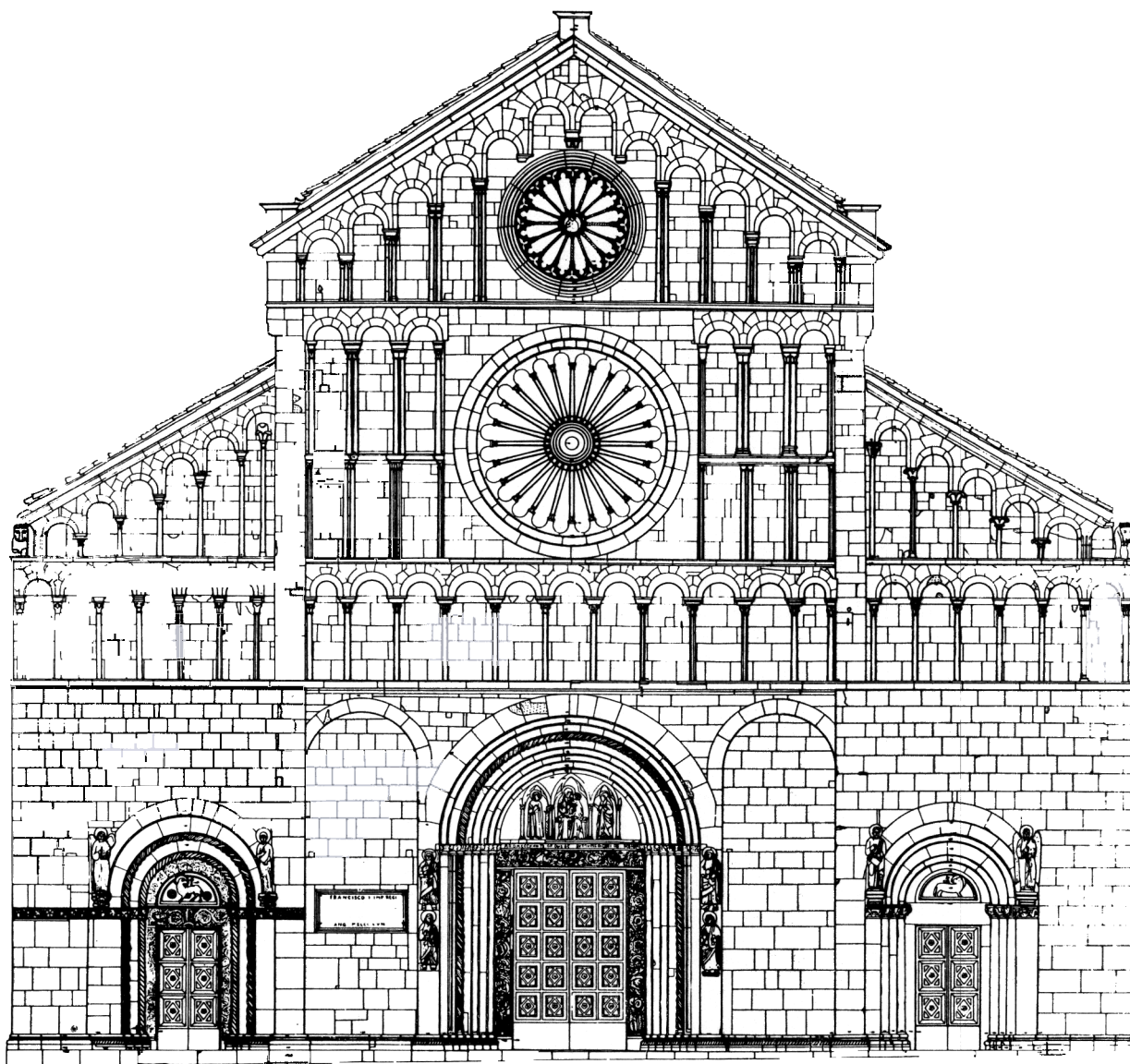


Fig. 26. — Relevé stéréophotogrammétrique d'un édifice de moyenne dimension. Façade de la cathédrale de Zadar, en Yougoslavie. Echelle de l'original 1/25. (Document de l'Institut de Photogrammétrique de Zagreb.)

Seule aussi, la stéréorestitution permet la représentation totale des surfaces non planes par l'application à ces surfaces du principe des courbes de niveau des cartes topographiques. Puisque l'opérateur est maître du déplacement de son index dans un espace à trois dimensions, il peut l'amener à une certaine profondeur, puis, le maintenant à cette profondeur, le déplacer en gardant le contact avec la surface à relever. La ligne suivie par l'index est une courbe de niveau si le plan

de référence est horizontal, une section verticale de la surface si ce plan est vertical. Ainsi peuvent être relevées, de façon complète et fidèle, les formes exactes des coupôles et des voûtes (fig. 27), des colonnes et des chapiteaux, des sculptures intégrées dans l'œuvre architecturale. L'équidistance entre ces coupes parallèles sera choisie en fonction du relief des formes, de l'échelle du relevé et de la précision recherchée. Si les conditions nécessaires ont été réalisées lors de la prise de vues, cette

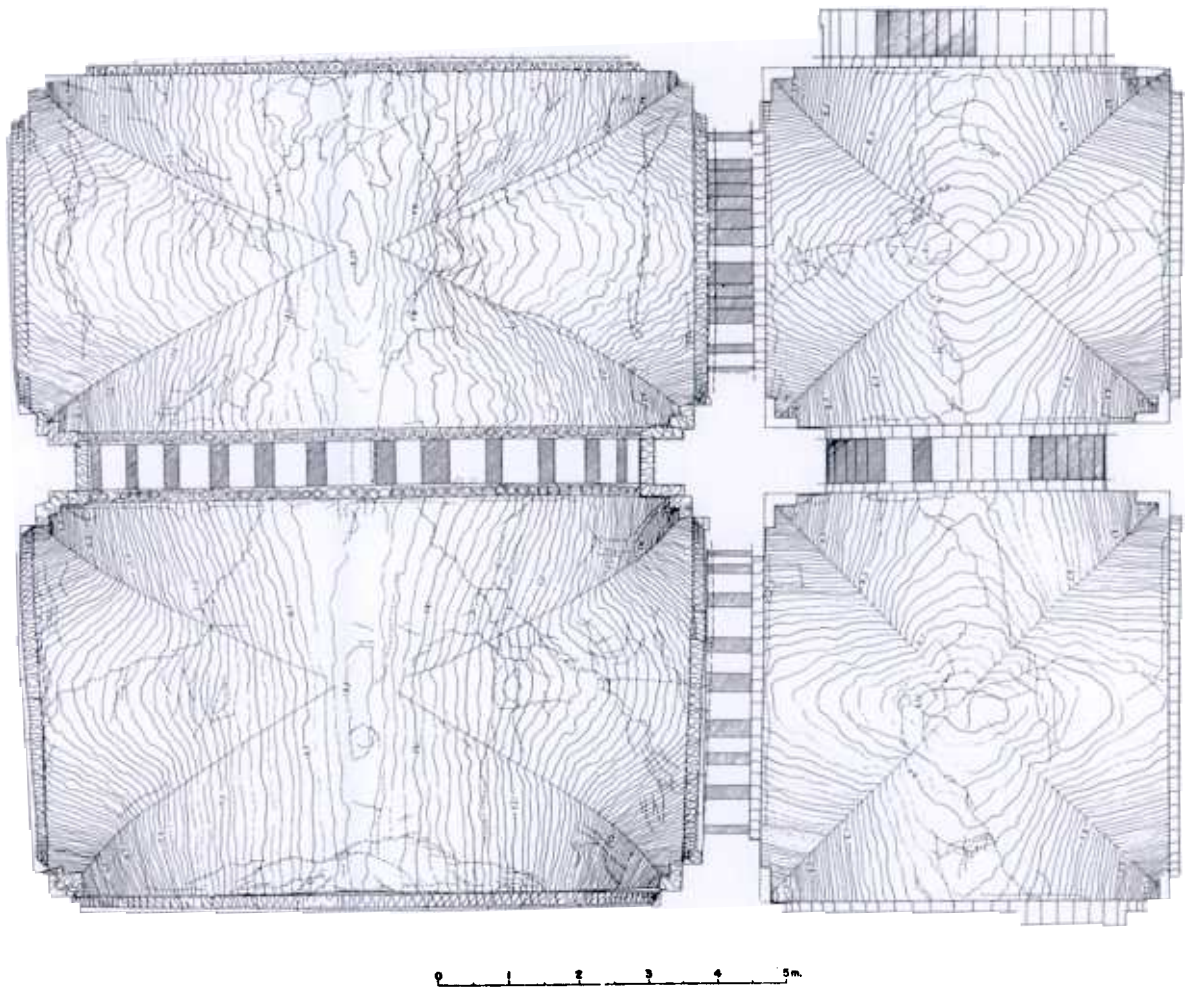


Fig. 27. — Relevé stéréophotogrammétrique de voûtes. Voûtes des deux premières travées de la nef et du collatéral sud de la basilique de la Madeleine à Vézelay. Echelle de l'original 1/50. Equidistance des courbes de niveau 0,50 m. (Document IGN - Centre de Recherche des Monuments Historiques, Paris.)

équidistance peut être très petite, de l'ordre du millimètre, par exemple, pour les bas-reliefs (\*) (fig. 28). Si la stéréorestitution reste la solution la plus générale d'exploitation des clichés photogrammétriques pour les travaux courants de l'architecte-conservateur, le redressement photographique est aussi largement employé pour le relevé de façades relativement planes. Il est bon toutefois de le corriger, comme nous l'avons dit, des

(\*) Le relevé très fin de surfaces polies, notamment de sculptures pour lesquelles la précision obtenue devrait permettre de saisir l'épiderme (de l'ordre de 1/10 mm), est théoriquement du domaine de la photogrammétrie. Il pose cependant un problème très délicat qu'aucun équipement ne permet de résoudre actuellement. La méthode elle-même reste à penser; il n'est pas certain, à priori, qu'elle puisse être graphique.

déformations perspectives dues aux défauts de planéité du sujet (balcons, toits, etc.) (fig. 29). Soulignons ici l'intérêt d'une méthode appliquée par les services techniques des monuments historiques de Tchécoslovaquie : le redressement est exécuté en deux exemplaires; l'un est conservé comme document photographique, l'autre est dessiné à l'encre et corrigé des déformations perspectives, puis « blanchi », c'est-à-dire que l'on fait disparaître l'image photographique pour ne conserver que le tracé.

Intéressante aussi est la combinaison entre la stéréorestitution et le redressement. La première donne le canevas de redressement ou mieux encore le tracé des éléments en relief entourant les parties planes, tracé qui sert de figure d'appui au redressement photographique de ces parties. Celles-ci sont ensuite reportées

tupe

que  
e  
G

tu  
dée  
Due

Abou  
Echelle

ici  
on



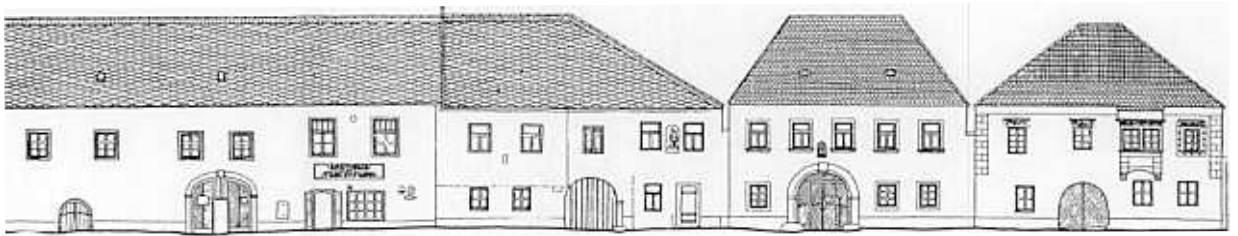


Fig. 29. — Relevé graphique par redressement photogrammétrique. Le dessin est exécuté en calquant les photographies redressées. Les déformations perspectives des parties hors des façades sont corrigées par des constructions simples. En haut, Eggenburg, Stadtplatz (échelle de l'original 1/50); en bas, Breitenbrunn, Prangerstrasse (échelle de l'original 1/100), Autriche. (Documents B D A, Vienne.)

graphiquement sur l'épure (fig. 30). Cette combinaison permet souvent, pourvu que les sujets relevés s'y prêtent, un meilleur emploi d'un équipement constitué d'un redresseur et d'un stéréorestituteur.

3. Le cas du relevé de grands édifices ou d'éléments architecturaux de grande dimension doit être traité presque exclusivement par stéréorestitution. Pour maintenir une échelle des photographies qui ne soit pas trop petite par rapport à l'échelle du relevé, il est indispensable d'utiliser des chambres métriques grand-angulaires, de focale 100 à 200 mm, et parfois même, si les points de vue doivent être éloignés (notamment pour les parties hautes des édifices) de chambres de focales encore plus longues (300 mm par exemple). La détermination d'un canevas topométrique permettant de relier entre elles les restitutions de chaque couple s'impose presque toujours; pour le relevé extérieur total de la cathédrale de Strasbourg, le service spécialisé de l'Institut Géo-

graphique National a dû prendre 120 couples de photographies et déterminer la position, dans un système de référence unique pour l'ensemble de la cathédrale, de 370 points repérés sur les photographies (fig. 31). Quant à la restitution, elle nécessite l'emploi d'appareils universels de haute précision. On conçoit que de tels relevés ne peuvent être effectués que par un personnel très qualifié disposant d'un important équipement et que le coût en soit relativement élevé. Mais ils permettent d'obtenir des résultats qu'aucune autre méthode ne pourrait atteindre.

4. Une attention spéciale doit être portée aux relevés à caractère archéologique, qui peuvent prendre différents aspects.

Il peut s'agir d'abord de relever des structures d'un monument au cours de travaux qui les mettent en évidence : démontages totaux ou partiels, consolidations et restaurations, fouilles (fig. 32). Les méthodes à



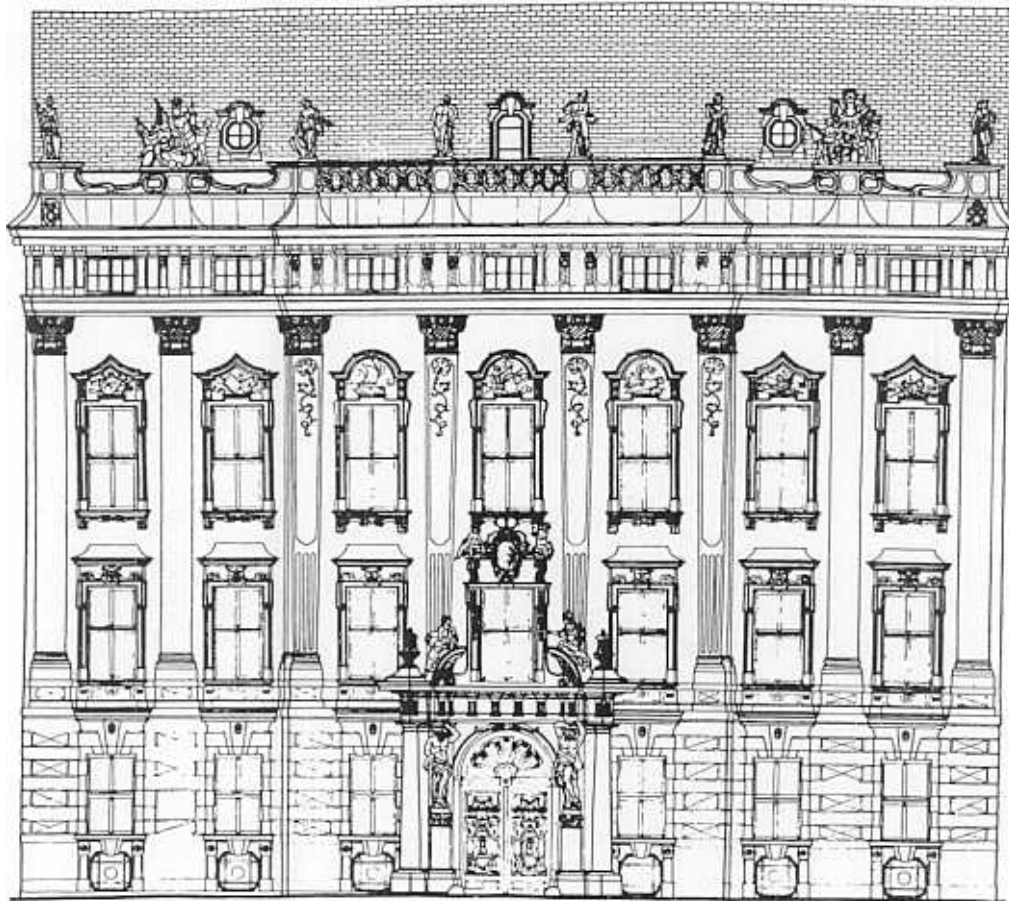


Fig. 30. — Relevé graphique par redressement photographique des parties planes appuyé sur une stéréorestitution des parties relief. Vienne, Palais Daun-Kinsky. Echelle de l'original 1/50. (Document B D A, Vienne.)

mettre en œuvre s'apparentent à celles qui ont été précédemment décrites, puisqu'il s'agit de fixer un état à un instant donné. L'un des avantages de la photogrammétrie, dans ce domaine, est de pouvoir enregistrer rapidement toute une série d'états successifs au cours de l'avancement des travaux, sans perturbation ni retard. Il peut s'agir également d'exécuter un relevé d'ensemble d'un grand site, à une échelle plus petite que celle d'un relevé architectural proprement dit. La photogrammétrie terrestre, appliquée avec un peu plus de recul, peut donner des élévations extrêmement intéressantes (fig. 33). Pour un plan général, par contre, il sera préférable de procéder par *photogrammétrie aérienne* en faisant appel à un service spécialisé dans ce type de travail (fig. 34).

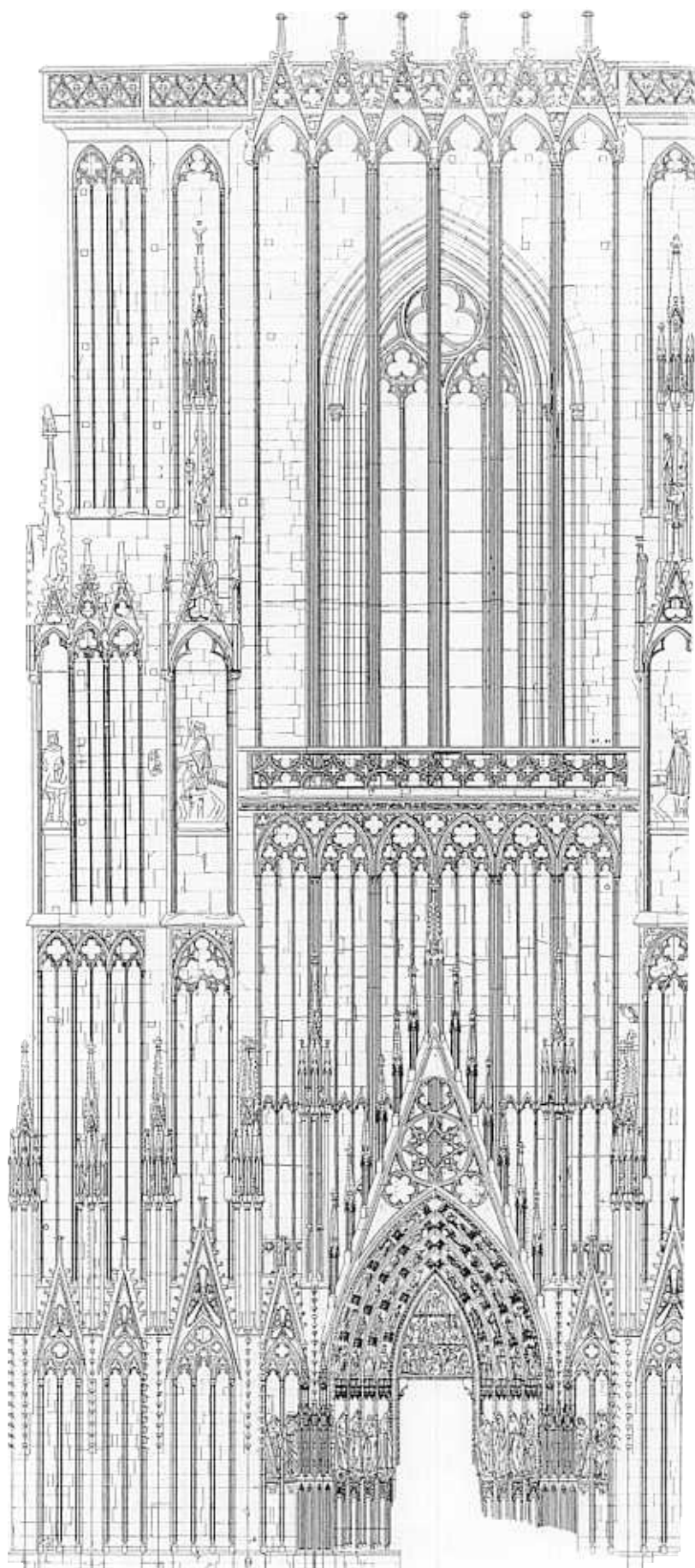
5. La précision du relevé photogrammétrique doit s'accroître et atteindre l'ordre du millimètre s'il est entrepris en vue d'étudier la lente évolution de *faibles déformations*. La restitution numérique ou analytique

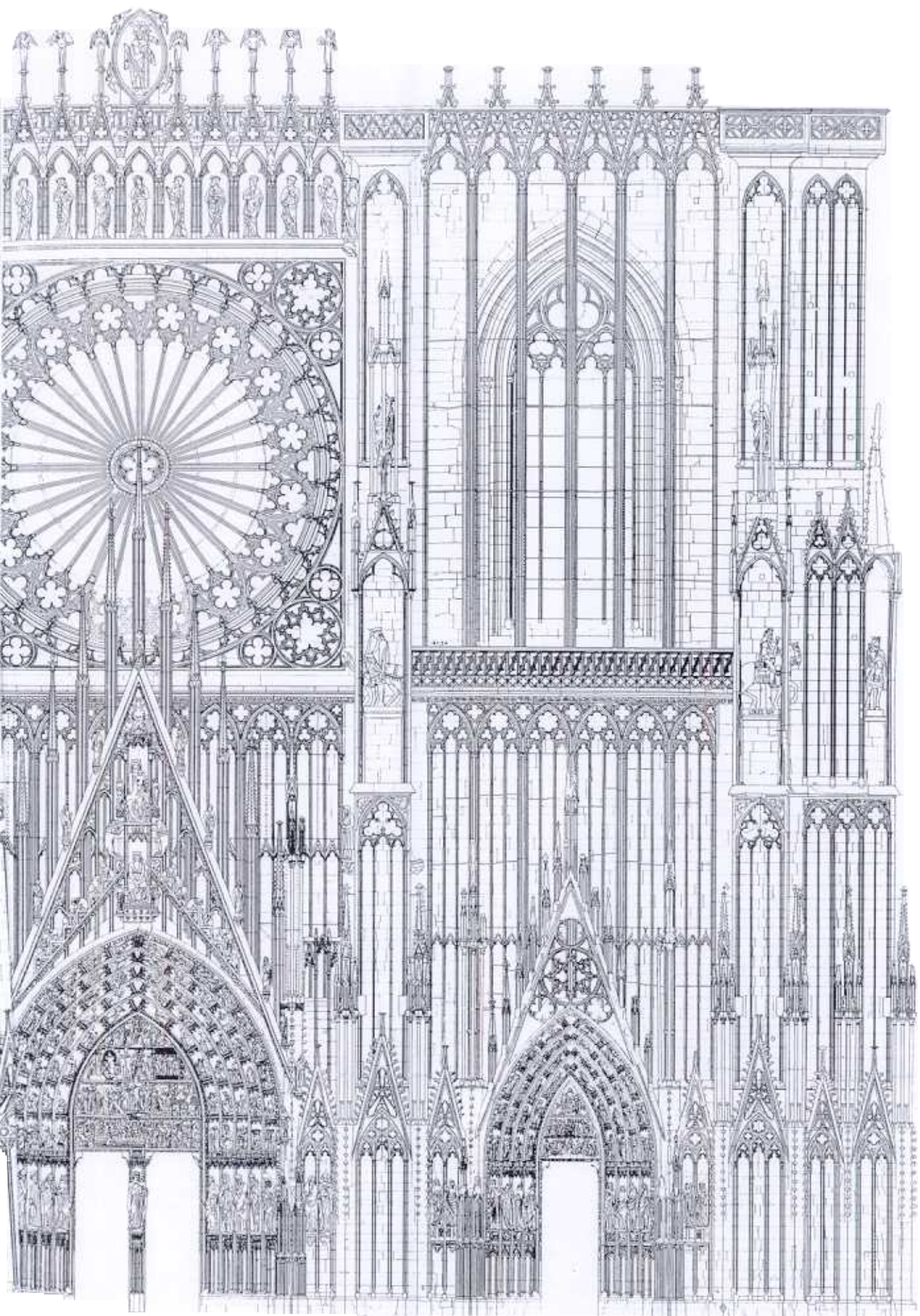
peut seule y parvenir. Elle s'appliquera soit à des couples de clichés pris avec le maximum de précaution et s'appuyant sur une ossature topométrique de haute précision, soit à des clichés pris successivement avec le même appareil, du même point de vue et selon le même axe et sur lesquels on fera des mesures différentielles à l'aide d'un comparateur. La seconde méthode peut conduire à d'excellents résultats; toute sa difficulté réside évidemment dans la réalisation précise des conditions constantes de prise de vues, dans la définition des points sur lesquels se font les mesures dans la stabilité des références.

6. Enfin la photogrammétrie peut apporter une solution au problème délicat que pose d'étude de *l'intégration d'une construction nouvelle dans un ensemble monumental ancien*.

Par une opération inverse de celle du relevé photogrammétrique, on peut situer et dessiner sur une pho-

Levé stéréophotogrammétrique d'un grand édifi-  
ce de Strasbourg, façade occidentale. Echelle  
1/50. Document IGN - Centre de Recherche des  
Historiques, Paris.





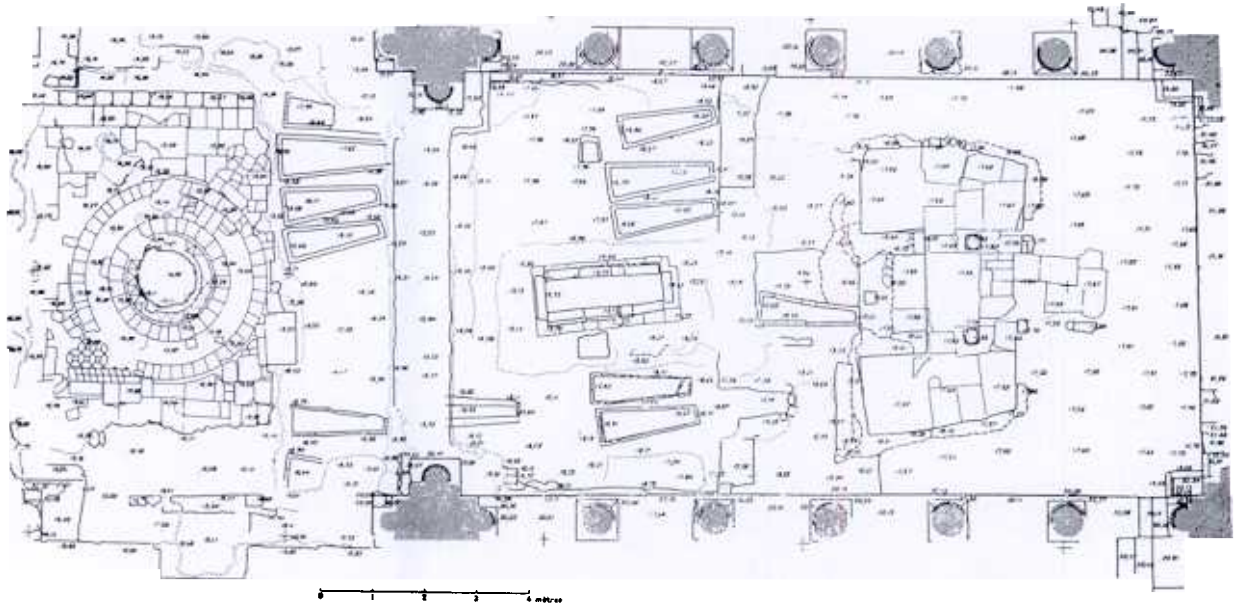
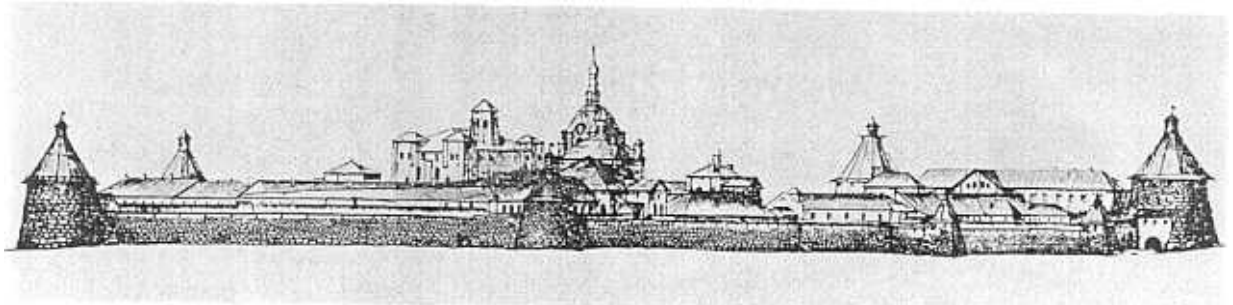


Fig. 32. — Relevé stéréophotogrammétrique de fouilles dans une église. Prise de vues à axe vertical descendant. Fouilles de 1958 dans la basilique de Saint-Benoît-sur-Loire. Echelle de l'original 1/50. (Document Société Française de Stéréotopographie, Paris.)

Fig. 33. — Relevé par stéréophotogrammétrie terrestre d'un ensemble architectural. Elévation du Monastère de Solovetske (Mer Blanche), vue générale sud-est. Echelle de l'original 1/200. (Document Institut Central de Restauration des Monuments Historiques, Moscou.)



tographie prise d'un certain point de vue l'élément nouveau dont on a fixé l'emplacement, la forme et les dimensions. Il s'agit cette fois de la mise en perspective d'un objet d'après ses projections géométrales. Partant d'un plan du quartier intéressé et des cotes de la construction nouvelle, on détermine, à l'aide d'un appareil de restitution ou par le calcul, la position exacte qu'occuperait sur les clichés cette construction si elle était édiflée (fig. 35).

Mais une autre méthode, de portée beaucoup plus générale, est offerte par la photogrammétrie numérique, le calcul électronique et l'automatisation. La restitution permet de définir le volume construit de l'ensemble monumental ancien par les coordonnées d'un grand nombre de points caractéristiques de chaque édifice. On connaît également les coordonnées qui définissent les grandes lignes de la construction nouvelle. Par calcul

et dessin avec une table traçante automatique, il est possible d'obtenir des perspectives actuelles et futures de l'ensemble étudié, en n'importe quel point de vue. Cette technique, qui est d'un emploi courant pour les projets de génie civil et notamment les tracés d'autoroutes, ne semble pas avoir été encore appliquée aux secteurs urbains anciens. Elle devrait avoir, dans ce domaine, un important avenir.

Tel est, brièvement esquissé, le panorama des possibilités qu'offre la photogrammétrie aux relevés et aux études de monuments historiques et d'ensembles architecturaux.

Il importe de souligner qu'une des caractéristiques essentielles des relevés photogrammétriques est de dissocier les opérations sur le monument, toujours rapides et peu onéreuses, de l'exploitation des clichés pris lors de ces opérations. Les *archives photogrammétriques*,

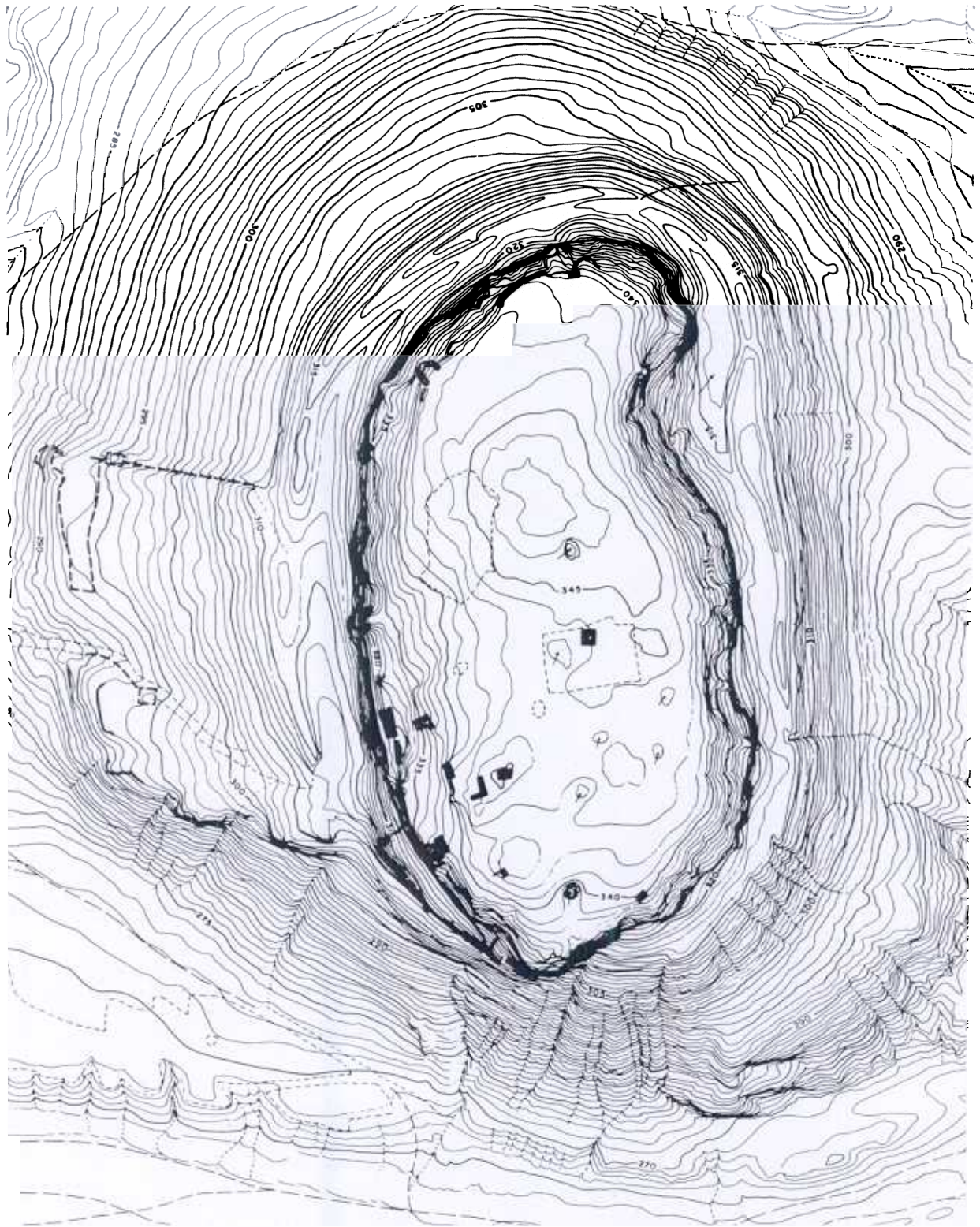


Fig. 34. — Relevé par stéréophotogrammétrie aérienne d'un site archéologique. Ruines de la citadelle seldjoukide de Qalaat Djarab, dans la haute vallée de l'Euphrate, en République Arabe Syrienne. Echelle de l'original 1/2.000. (Document IGN - UNESCO.)

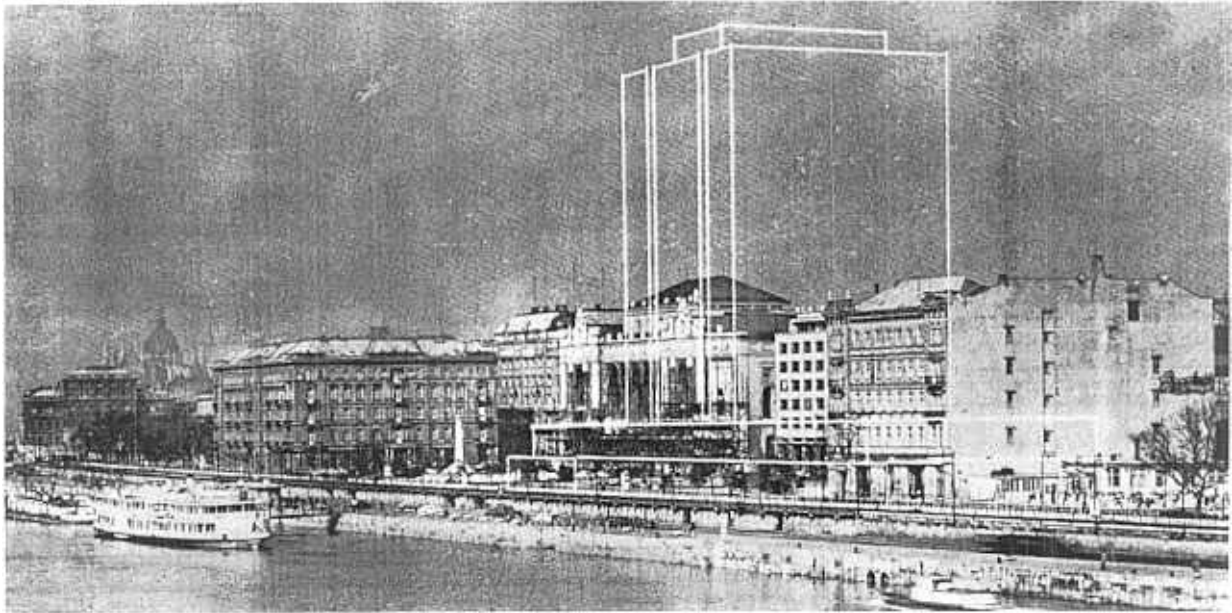


Fig. 35. — Tracé, sur une photographie, des lignes principales d'un bâtiment projeté dans un ensemble architectural ancien. Hôtel Intercontinental sur le quai du Danube, à Budapest. (Document Entreprise de Géodésie et de Géotechnique, Budapest.)

dont l'établissement représente une tâche fondamentale et de première urgence; pourront n'être exploitées qu'ultérieurement, lorsque les études archéologiques et historiques ou les travaux de conservation le nécessiteront. Réflétant impartialement l'état exact du monument à la date de prise de vues, elles seront disponibles à tout moment pour l'établissement de relevés graphiques, la détermination d'éléments structuraux, la mesure de déformations.

Sans doute ne convient-il pas toujours d'appliquer les méthodes photogrammétriques; certains relevés, notamment les relevés en plan, seront parfois plus rapidement et plus simplement établis par les méthodes traditionnelles et il est bon de savoir conserver un juste équilibre entre les mesures directes, les procédés topométriques et les techniques photogrammétriques. Mais le champ d'application de ces dernières est extrêmement vaste et, avec les nuances que nous n'avons pas manqué de souligner, elles permettent d'obtenir des relevés dont la précision, l'homogénéité et l'objectivité ne sauraient être atteintes autrement. Il est vrai, comme le remarquait H. Deneux lors du Congrès International de Photogram-

métrie de Paris, en 1934, que « d'autres exigences, telles qu'une présentation artistique et un style irréprochable sont au moins aussi importantes ». Mais l'étude scientifique des monuments et l'histoire technique de l'architecture considérées maintenant comme une partie essentielle de la connaissance artistique, exigent des relevés complets, précis et obligatoirement détaillés et marquent une évolution dans le sens de la rigueur. « Il s'agit maintenant de cerner toujours de plus en plus près la réalité des structures, des formes, des épidermes » déclarait A.J. Donzet au Colloque de l'ICOMOS. Ici aussi, il importe de trouver un équilibre optimal entre l'art et le style d'une part, la technique de l'autre, dans une étroite collaboration entre les architectes, les conservateurs, les historiens d'art et les photogrammètres.

Décembre 1968.

Maurice CARBONNELL  
(Paris)

## ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE

LAUSSE DAT A., *Les applications de la perspective au levé des plans*, « Annales du Conservatoire des Arts et Métiers », 2<sup>e</sup> série, t. II à VI, Paris, 1894;

DOLEŽAL E., *Die Photographie und Photogrammetrie im Dienste der Denkmalpflege und das Denkmälerarchiv*, « Archives Internationales de Photogrammétrie », t. I, 1909, p. 45-70;

MEYDENBAUER A., *Handbuch der Messbildkunst in Anwendung auf Baudenkmäler und Reiseaufnahmen*, Halle a. d. Saale, 1912;

DENEUX H., *La métrophotographie appliquée à l'architecture*, Paris, 1930;

CATTELA IN F. et VERMEIR P., *Relevés photogrammétriques de monuments historiques*, Ministère des T. P. de Belgique, Bruxelles, 1956;

RAAB K. O., *Architekturbildmessung*, Karlsruhe, 1960;

*La photogrammétrie au service de l'architecture.* (Articles de J. P. PAQUET, R. BURKHARDT, H. FORAMITTI, J. BERNHARD, A. SCHLUMBERGER, T. MARUYASU et T. OSHIMA, P. E. BORCHERS, M. CARBONNELL), Société Française de Photogrammétrie, Bulletin spécial n° 19, Paris, 1965;

JÍŘINEC M., *Měřická dokumentace v památkové péči* (Documentation métrique pour la conservation des monuments), « Monumentorum Tutela », Bratislava, 1966, p. 113-133;

*Photogrammétrie architecturale. Application des méthodes photogrammétriques au relevé des monuments*, Institut Géographique National, Paris, 1967;

FORAMITTI H., *Die Bildmessung in der Hand des Baufachmannes*, « Deutsche Bauzeitung », Stuttgart, 1966, p. 786-792 et 874-880;

FORAMITTI H., *Die Photogrammetrie im Dienste der österreichischen Denkmalpflege*, « Österreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege », Vienne, 1968, p. 112-123;

*Colloque sur la photogrammétrie appliquée aux monuments historiques* (Saint-Mandé, 4-6 juillet 1968), (Rapports de M. CARBONNELL, J. P. PAQUET, R. de VITA, A. J. DONZET, M. JÍŘINEC, R. W. Mac DOWALL, C. ERDER, R. MEYER, H. FORAMITTI, J. GOMOLISZEWSKI, P. E. BORCHERS), réunion de l'ICOMOS (à paraître);

*Premier symposium géodésique sur le relevé des monuments historiques* (Prague, 15-18 octobre 1968), Société tchécoslovaque pour la Science et la Technique; lire notamment les rapports de M. JÍŘINEC, M. ŠIMANA, J. BRYKNAROVÁ, J. ŠÍMA et R. KUDELÁSEK.

## SUMMARY

When used for architectural surveys, photogrammetry provides a means of deriving vertical plans, plan views and cross-sections of monuments from photographs. The methods applied to the photographs — which are taken with special photogrammetric cameras — are the result of a century of gradual discovery and development, and are to-day sufficiently varied to meet all the requirements arising in connection with the conservation, enhancement and scientific study of ancient monuments and architectural units.

Some of these methods are for use with single photographs; they are based on the assumption that the subject is a single plan, the principal planes of the building being vertical or horizontal, and they involve either drawing in accordance with the laws of perspective and of descriptive geometry, or else photogrammetric rectification. Such rectification may be optical (using the sketchmaster), but it is generally photographic, in which case a plate photographed with the camera axis inclined in relation to the reference plane of the survey forms the basis of a second photograph in which the perspective distortions caused by this inclination have been corrected.

A second group of methods uses pairs of plates and is based on the intersection of the two sighting rays corresponding to each point of the building, determined by the two different camera stations. The processes

involving drawing have now given place to stereo-photogrammetric methods. With these, which have as their basis the keenness of stereoscopic vision, it is possible, with the aid of highly accurate optico-mechanical devices, to obtain unbroken recordings of all the outlines of a building as projected in the reference planes chosen, and hence to obtain vertical plans and horizontal and vertical cross-sections, and even geometrical reproductions of non-plane surfaces and of sculptured sections by means of a series of lines comparable to the contour lines on a map. By dissociating the operations effected on the actual monument (i.e. the taking of photographs and the recording of a few simple measurements) from the subsequent work on the plates, the stereophotogrammetric methods make it possible to build up, rapidly and at small cost genuine, emergency archives of the buildings concerned.

Adapted to modern requirements in connection with the conservation and study of historical monuments, the various photogrammetric methods can be adopted equally well in the case of simple and rapid surveys with a view to obtaining a drawing primarily intended to express general character, and in that of detailed and accurate surveys of buildings and groups of buildings of whatever size, of archaeological surveys, of measurements of distortions and of projects for the integration of a new building into a body of ancient monuments.

Fig. 1. — Cone of rays and photogrammetric camera. Diagram showing two nodal points of the lens, the back of the camera with its rigid connection to the lens and its four fiducial marks, the main camera axis (dotted line), the cone of rays and the position of an imaginary positive obtained by contact.

Fig. 2. — Direct use of a photograph taken with a photogrammetric camera. Church of St. Louis des Invalides, Paris (Zeiss TMK camera). Left, the photogrammetric camera photograph, with its four fiducial marks, taken on a strictly horizontal axis parallel to that of the building. If the principal distance of the camera and the distances of the camera station from the various successive planes of the building actually perpendicular to the axis, or assumed to be so, are known, the plate can be scaled for each of these planes. Right: an enlargement to a scale of 1:200 of the plane marked in white. The distances of the planes are measured on the site or read from a plan. (IGN - J.P. Paquet.)

Fig. 3. — Survey obtained from a photograph by hand drawing. Protestant church of Sainte Marie, Paris. Survey made by H. Deneux (*La Métophotographie appliquée à l'Architecture*, Paris, 1930).

Fig. 4. — Photogrammetric rectification. The plate, taken with camera axis inclined at angle  $i$ , is put into correct perspective with the plane of the flat projection to be obtained whose scale

Fig. 5. — Sketchmaster rectification. (IGN)

Fig. 6. — An example of camera lucida plotting. Neuhohewang Castle, Austria. Scale of original 1:100. (BDA, Vienna.)

Fig. 7. — Photographical rectification. The geometrical correction of the perspective between plate and flat projection is completed by optical projection of a rectified photographic image on to a sensitive ground placed on the flat projection. The three planes (plate; lens and projection) are on the same straight line, and Newton's formula ( $a \cdot a' = f^2$ ) must apply. The plate is de-centred ( $\Delta$ ) in relation to the optical axis of the rectifying apparatus.

Fig. 8. — Photographic rectification apparatus. The Zeiss SEG-V Rectifier. (Zeiss)

Fig. 9. — Oblique photograph and same photograph after rectification. Stäthalterei, Erfurt. (Institut für Denkmalpflege, Dresden).

Fig. 10. — A photoplan. Assembly, on a given scale, of rectified photographs. Mosaic from the west porch of the Mosque of the Omayyades in Damascus (Syrian Arab Republic). Scale of original 1:30. (IGN - UNESCO.)

Fig. 11. — Constant angle rectification. Photograph taken with camera axis inclined 30. grades in a vertical plane, and rectified with a peculiar device. Scale of original rectification 1:200. (IGN - protected sector of Bordeaux.)

Fig. 12. — Survey made by the method of intersecting hand-drawn lines, using perspective views obtained with a sketchmaster. Château de Vincennes on the outskirts of Paris. Survey by A. Laussedat, 1850.

Fig. 13. — System adopted for photographing when method of intersecting hand-drawn lines is to be used. Long bases and converging axes.

Fig. 14. — Photographing prior to use of intersecting hand-drawn lines method. Scheme adopted for photogrammetric survey of the Church of St. Nicholas in Berlin, by Meydenbauer.  $\circ \rightarrow$  Camera stations and directions of axes.  $\square$  Triangulation points.  $\Delta$  Intersecting control points. (Lent Prof. R. Burkhardt, Berlin.)

Fig. 15. — Example of photogrammetric survey obtained by the intersecting hand-drawn lines method. "Friday" Mosque, Shiraz, Iran. Survey by A. Meydenbauer (1879) from photographs taken by Stolze. (Lent by Dr. R. Meyer, Dresden.)

Fig. 16. — Stereophotogrammetric method of surveying (IGN).

Fig. 17. — Diagram showing how stereophotogrammetric photographs are taken in the normal case. The optical axes form a right angle with the base, which is itself parallel to the reference plane of the survey. Cfr. fig. 13.

Fig. 18. — Stereometric camera. Zeiss model SMK - 120. Base 120 cm. Focal length 60 mm. Size of pictures  $8 \times 10$  cm. (Zeiss)

Fig. 19. — Plotting apparatus for plates taken in the normal case. Zeiss "Terragraph". On its right-hand face is to be seen the computer which corrects the distortions caused by tilting of the camera axes (30 or 70 grades). (BDA, Vienna.)

Fig. 20. — Taking photographs in the normal case, with axes inclined 30 grades. Zeiss model SMK - 120. (BDA, Vienna.)

Fig. 21. — Single photogrammetric camera. A camera specially made for architectural surveying by IGN, Paris. Focal length 125 mm., size of plates  $18 \times 18$  cm. (IGN.)

Fig. 22. — Universal plotting apparatus. SOM-Poivilliers stereotopograph, type BP. Plotting of an Egyptian bas-relief in equidistant vertical sections. (IGN.)

Fig. 23. — A phototheodolite. Wild P.30 phototheodolite. Focal length 165 mm., size of plates  $10 \times 15$  cm. (Wild.)

Fig. 24. — Photogrammetric survey of the south side of Strasburg Cathedral. Above: network of control points on building as X, Y and Z. Below, plan of camera stations. (IGN.)

Fig. 25. — Survey by assembly of rectified photographs. Place des Vosges, Paris, west side. Roofs and chimneys, which are not in the same general plane as the facade, showed serious perspective distortions on the rectified photographs which made it impossible to include them in the assembly, and are omitted. Scale of original 1:100. (IGN.)

Fig. 26. — Stereographic survey of a medium-sized building. Facade of Zadar Cathedral in Yugoslavia. Scale of original 1:25. (Zagreb, Institute of Photogrammetry.)

Fig. 27. — Stereophotogrammetric survey of vaulted ceilings. Vaulting in the first two bays of the Basilica of La Madeleine, Vézelay. Scale of original 1:50. Interval between contour lines 0.05 m. (IGN - Centre de recherche des Monuments Historiques, Paris.)

Fig. 28. — Stereophotogrammetric survey of a wall bearing sculptured reliefs. Temple of the Queen, Abou Simbel (United Arab Republic). Bas-relief showing the divinisation of Queen Nofretari by the goddesses Isis and Hathor (detail). Scale of original 1:4. Contour distance between vertical sections 0.001 m. (IGN - Centre de Documentation sur l'Égypte Ancienne, Cairo.)

Fig. 29. — Hand-drawn surveys obtained through photogrammetric rectification. The drawing is a tracing of the rectified photographs. The perspective distortions in the areas outside the facades are corrected by means of simple drawn outlines. Above: Stadtplatz, Egenburg. Scale of original 1:50. Below: Prangerstrasse, Breitenbrunn, Austria. Scale of original 1:100. (BDA, Vienna.)

Fig. 30. — Hand-drawn survey using photographic rectification of plane sections and stereo-plotting of areas in relief. Vienna, Daun-Kinsky Palace. Scale of original 1:50. (BDA, Vienna.)

Fig. 31. — Stereophotogrammetric survey of a large building. Strasburg Cathedral, west face. Scale of original 1:50. (IGN - Centre de Recherche des Monuments Historiques, Paris.)



*Fig. 32. — Stereophotogrammetric survey of excavations in a church. Photographs taken with camera axis descending vertically. Excavations made in the Basilica of St.-Benôit-sur-Loire in 1958. Scale of original 1:50. (Société Française de Stéréotopographie, Paris.)*

*Fig. 33. — Terrestrial stereophotogrammetric survey of an architectural unit. Elevation showing general view of the southeastern side of the Monastery of Solovetske (White Sea). Scale of original 1:200. (Central Institute for the Restoration of Historical Monuments, Moscow.)*

*Fig. 34. — Aerial stereophotogrammetric survey of an archaeological site. Ruins of the Seldjukid citadel of Qalaat Djabar, in the upper valley of the Euphrates (Syrian Arab Republic). Scale of original 1:2000. (IGN - UNESCO.)*

*Fig. 35. — Main outline drawing, on a photograph, of a building it is proposed to construct within an ancient group of buildings. Intercontinental Hotel on the Danube, in Budapest. (Geodesic and Geotechnical Institute, Budapest.)*