

# Auscultation des voûtements d'édifices anciens par la photogrammétrie

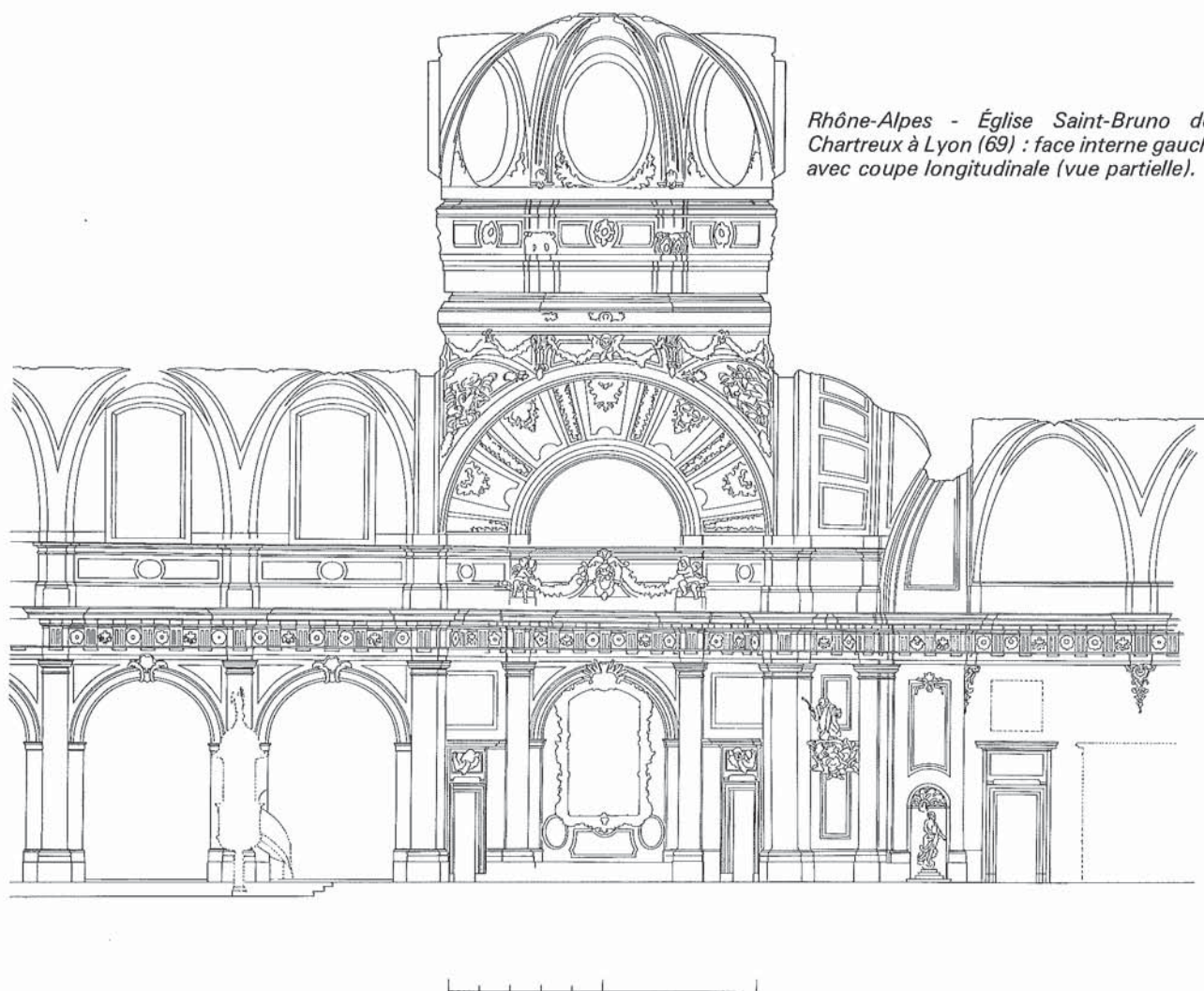
par Jean-Paul SAINT-AUBIN  
*Conservateur de l'Inventaire général des Monuments  
et Richesses artistiques de la France*

Créé en 1964 sur l'initiative d'André Malraux, l'Inventaire général des Monuments et Richesses artistiques de la France est chargé, au sein du Ministère de la Culture, de rassembler une documentation générale sur l'ensemble du patrimoine français.

Cette documentation, organisée en dossiers, concerne tant l'architecture que la sculpture, la peinture,

l'orfèvrerie, ... ; chaque dossier comporte une partie descriptive et analytique appuyée d'une illustration photographique et de relevés graphiques.

En ce qui concerne les relevés graphiques, les nécessités de normalisation et d'homogénéité ont conduit le service à faire confiance pour une large part aux techniques photogrammétriques.



*Rhône-Alpes - Église Saint-Bruno des  
Chartreux à Lyon (69) : face interne gauche  
avec coupe longitudinale (vue partielle).*

L'Atelier de Photogrammétrie architecturale de l'Inventaire général, créé en 1972, relayé en partie pour les prises de vues photogrammétriques par les équipes régionales d'Inventaire, est chargé de :

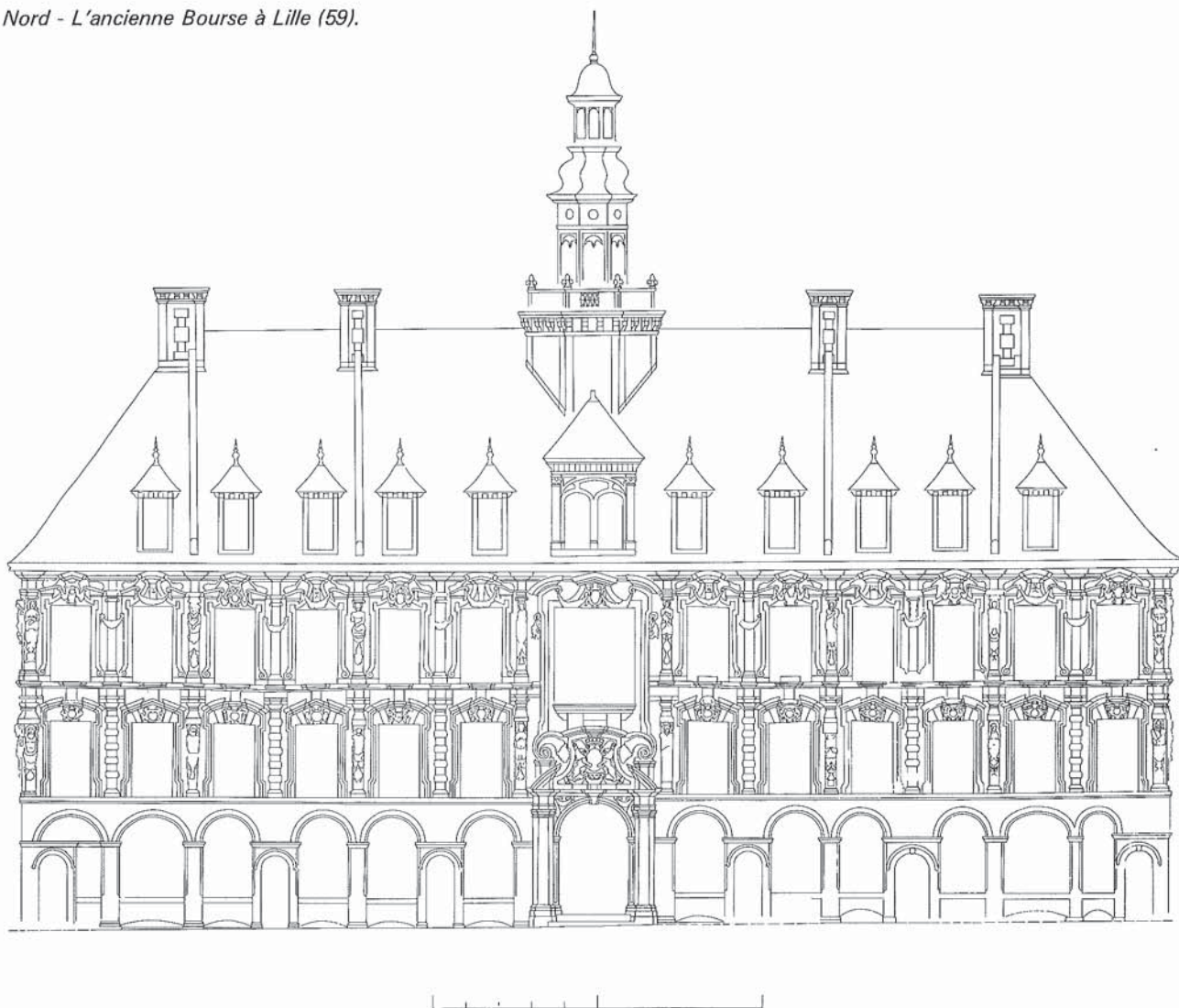
- procéder aux études et recherches fondamentales relatives à l'application des techniques photogrammétriques, cartographiques ou graphiques, et mettre au point les méthodes pratiques,
- former au relevé photogrammétrique et aux méthodes de documentation graphique et cartographique le personnel des secrétariats régionaux,
- réaliser les relevés photogrammétriques complexes nécessaires aux secrétariats régionaux ou demandés par tout organisme extérieur au service de l'Inventaire général,
- coordonner et réaliser l'ensemble des travaux de restitution photogrammétrique,
- coordonner les travaux de cartographie et réaliser les travaux de cartographie automatique demandés par les secrétariats régionaux.

L'Atelier dispose de matériel topométrique et de chambres photogrammétriques diversifiées permettant de répondre à l'ensemble des problèmes de prises de vue photogrammétriques. Le traitement des clichés s'effectue sur deux restituteurs photogrammétriques couplés à un système informatique comprenant un calculateur et deux tables traçantes.

Chaque année, 3 à 4000 clichés photogrammétriques supplémentaires s'intègrent à la documentation et donnent lieu à l'établissement d'environ 100 relevés graphiques.

Les relevés photogrammétriques, parce qu'ils permettent de prendre conscience de la forme effective d'un monument, facilitent les comparaisons typologiques ; et, parce qu'ils rendent évidentes les moindres défaillances, les moindres modifications de structure, les relevés photogrammétriques proposent des indices d'une grande sûreté pour affiner les chronologies, pour étudier les modes de construction, pour apprécier les mouvements et faciliter la surveillance de édifices.

*Nord - L'ancienne Bourse à Lille (59).*

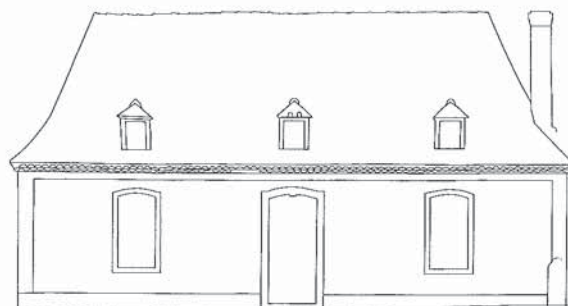




*Pays de la Loire - Église Notre-Dame  
des Marais à la Ferté-Bernard (72) : face  
externe gauche.*



*Aquitaine - Fermes des cantons de Lembeye et de Morlaas  
(64) : pour l'architecture rurale, la définition typologique  
s'établit sur le terrain et à partir de photographies et de cro-  
quis puis des relevés précis mais d'un rendu limité établis  
par photogrammétrie, illustrent chaque série en rendant  
compte de la répartition des pleins et des vides, des problè-  
mes liés à la symétrie des façades, à la position de la (ou  
des) cheminée(s), du monde de couverture (toits à longs  
pans, à croupe...), de la présence ou non de frontons, de  
généralités, décor...*





Le postulat de départ d'une des recherches entreprise depuis bientôt trois ans par l'Inventaire général consiste en un lieu commun : l'architecture est "chose mentale" ; palais ou masuré, le bâtiment est avant tout le reflet d'une théorisation préalable, d'une géométrisation. Abstraction préalable réfléchie par les projets et les dessins d'architecture, sa construction s'inscrit dans l'aléatoire et passe par l'imperfection ; son destin, qui s'écrit parfois sur plusieurs siècles, en fait un objet modifié par le temps et les remaniements ou les déprédations des hommes.

Ainsi, l'objet architectural, idéalement et aussi modeste soit-il, se trouve constitué d'un assemblage de structures parfaitement définies géométriquement ; lignes droites ou courbes, surfaces — au sens mathématique — s'organisent selon des axes multiples, le plus souvent horizontaux ou verticaux.

Les procédés de construction, les règles et les recettes, vont altérer la perfection géométrique de ce volume polyédrique complexe mais on peut dire également qu'ils vont marquer l'édifice, le signer et le dater, en rendant sa construction contingente des moyens techniques, des outils et des hommes d'une époque. A ces imperfections qui racontent le "com-

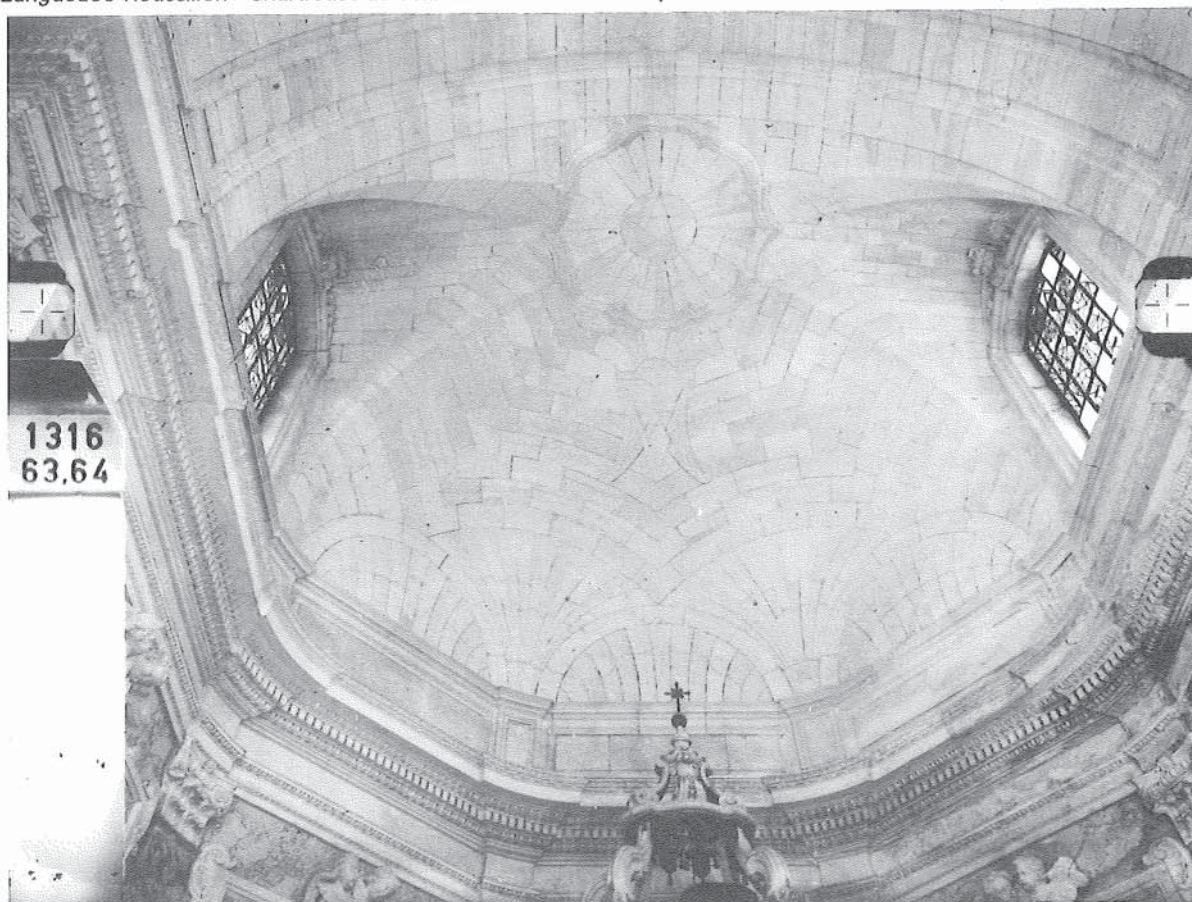
ment" de l'édifice vont s'ajouter les déformations que le temps fait subir à la structure architecturale en la tassant, en la basculant, ... et les modifications que l'homme y introduit pour la transformer ou la conserver.

La photogrammétrie qui seule permet la saisie globale de la forme effective d'un objet s'avère donc comme le moyen de constater à une date donnée l'état d'un édifice ou, mieux, la réalité vécue d'un projet architectural.

Comparée à l'auscultation d'ouvrages d'art, la finalité s'inverse immédiatement, car il ne s'agit pas de comparer deux états successifs ou de juger de l'évolution d'une forme, ou de sa conformité à un projet, mais de déchiffrer l'apparence actuelle pour saisir l'ambition du projet architectural et le mode de réalisation.

En ce qui concerne les édifices anciens, peu de projets sont conservés or, pour l'historien de l'art, l'archéologue ou l'architecte, il s'agit d'étudier ou de conserver un édifice qui illustre un moment de l'histoire des formes et concrétise l'œuvre qu'un individu ou une équipe ont produite.

*Languedoc-Roussillon - Chartreuse de Valbonne à Pont-Saint-Espirit (30) : voûte du chœur, cliché photogrammétrique.*





L'Atelier de photogrammétrie architecturale de l'Inventaire général a donc mis au point et développé depuis trois ans une recherche qui s'appuie sur la photogrammétrie et le traitement informatique. La connaissance architecturale théorique et l'appréhension précise de la forme effective d'un édifice ou d'une partie d'édifice, oriente vers une modélisation conduisant au calcul de l'objet géométrique "le plus proche" ainsi qu'à celui des écarts entre cet objet et la forme effective. L'analyse de ces écarts permet une meilleure connaissance technique de la structure architecturale et la visualisation de leur répartition distingue ceux qui sont liés à des phénomènes de vétusté et ceux qui ressortent de modes constructifs. L'étude de la forme théorique et des tracés directeurs est alors affinée par de nouveaux calculs.

La procédure est itérative mais on peut distinguer 6 phases que nous illustrerons à partir de l'opération menée sur les voûtes de la chartreuse de Valbonne et plus spécialement de la voûte de l'abside.

### La première phase

concerne l'opération photogrammétrique elle-même ; opération ponctuelle sur une partie d'un édifice (voûte par exemple) ou globale (l'édifice dont la voûte par exemple).

### La deuxième phase

correspond à l'analyse architecturale — sur le terrain, sur les photographies et en stéréoscopie dans le restituteur lui-même ; elle permet de définir les limites de la structure à étudier, les différents secteurs qui la composent et les lignes qui les cernent.

### La troisième phase

rassemble, à partir de la restitution photogrammétrique, l'information sur la forme effective des voutains et des arêtes, secteur par secteur : elle crée, par l'intermédiaire d'un micro-ordinateur, des fichiers de données numériques de surfaces ou de lignes.

### La quatrième phase

solicite des programmes de calcul stockés sur le micro-ordinateur qui définissent la nature de la ligne (droite, conique,...) de la surface (plan, quadriple, quartique,...).

Si l'on prend le cas le plus courant, le programme part de l'équation générale d'un type de surfaces, organise les données selon cette équation et crée des expressions où les inconnues sont les paramètres et qui sont calculées par les moindres carrés, la linéarisation des équations et plus particulièrement par la méthode d'approximation de Newton.

Une fois les paramètres déterminés, les caractéristiques géométriques de la surface sont explicitées : centre, direction des axes, leurs longueurs,...

Le système mis au point est conversationnel ; le chercheur peut intervenir avant le calcul — en introduisant par exemple des valeurs a priori de certains paramètres — et après le calcul en choisissant le type d'écarts : radiaux, parallèles à une direction...

### La cinquième phase

est constituée par l'affichage des résultats : paramètres de l'équation, situation spatiale, écarts, apparaissent sur l'écran ou sur le tracteur et de nombreuses possibilités de présentation sont proposées : histogramme de répartition, projection géométrale selon des axes libres, projection axonométrique,...

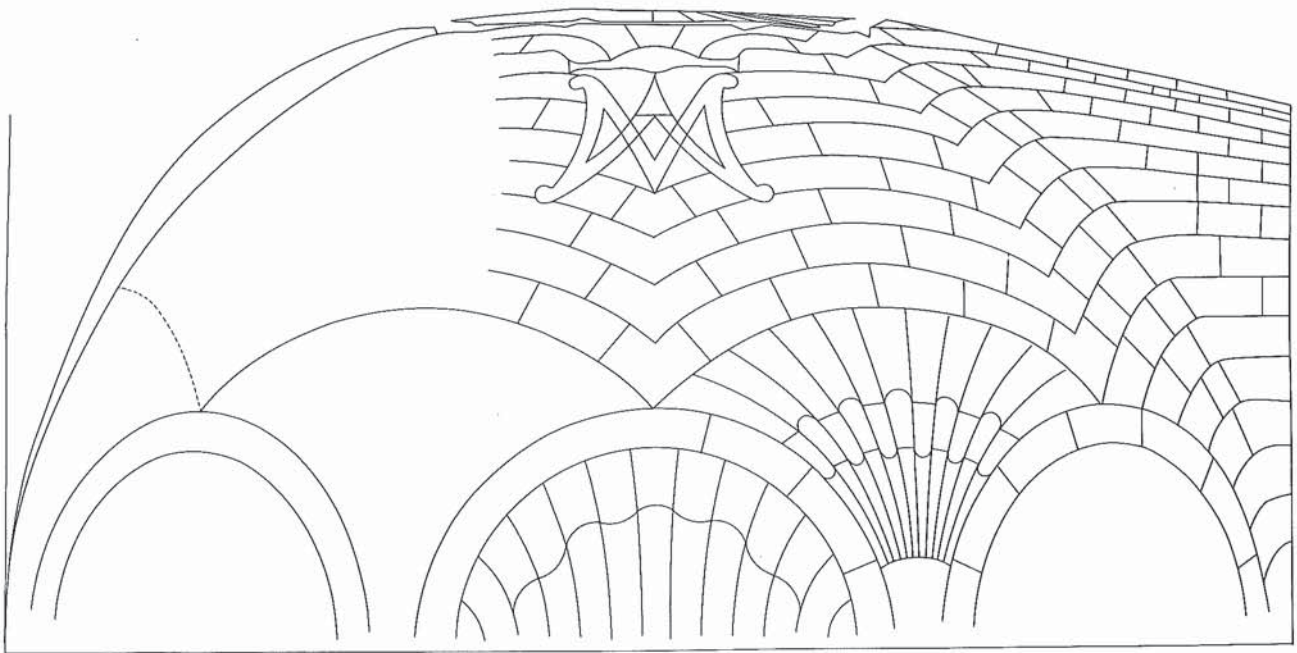
Ces choix permettent l'interprétation des écarts et de leurs zones de répartition.

### La sixième phase

comporte l'analyse des différents secteurs de la même structure ; cette analyse doit permettre par la comparaison des données, de formuler des hypothèses concernant le tracé théorique et les formes prévues par le projet. Le retour à la phase 4 de calculs mais, en introduisant les paramètres supposés du projet architectural, assure la vérification des hypothèses.

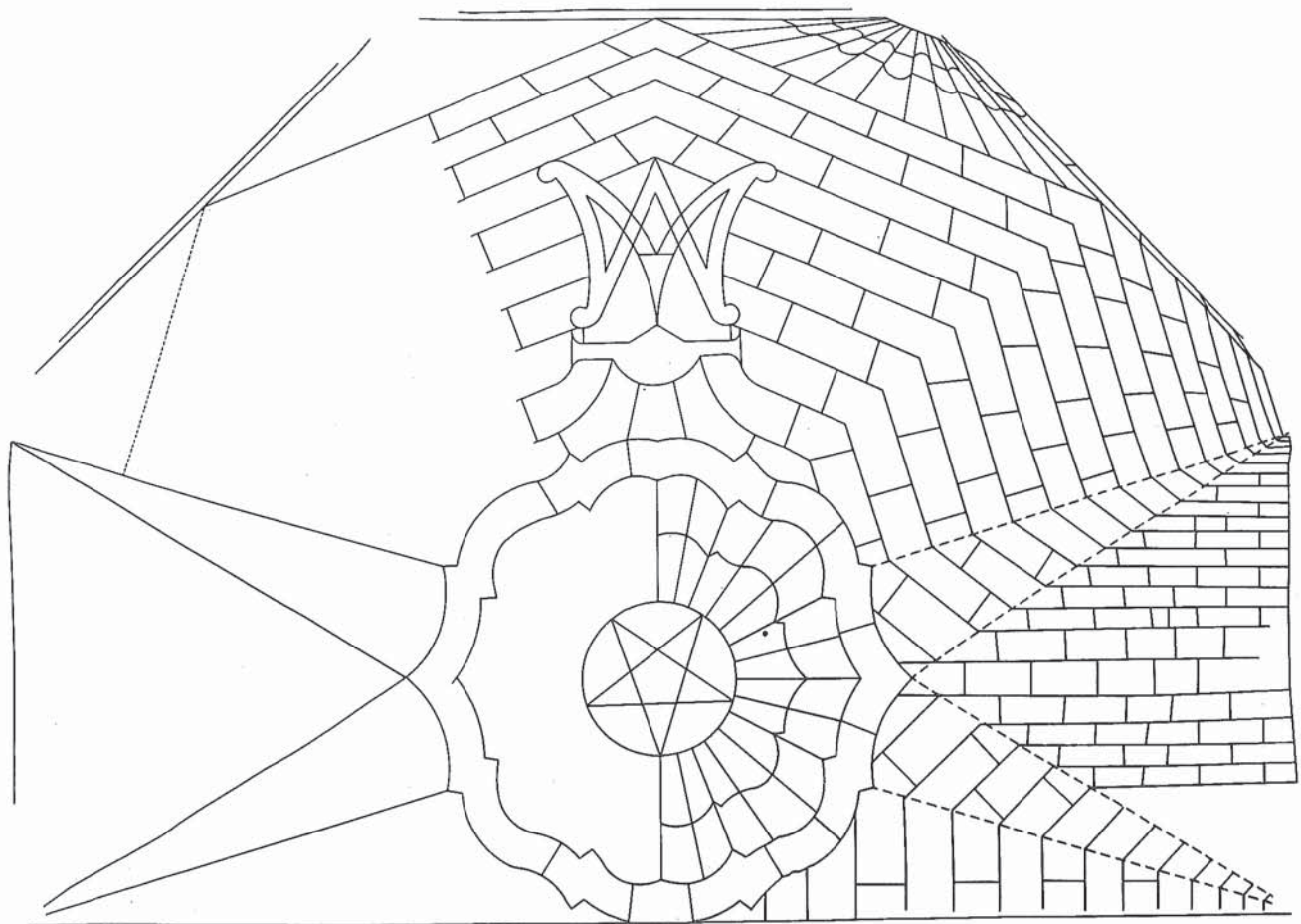
N	X	Y	Z	DELTA Z
1	6.939	101.363	17.063	-0.004
2	6.953	101.400	17.156	-0.008
3	6.984	101.432	17.280	-0.010
4	7.026	101.468	17.397	-0.008
5	7.119	101.567	17.604	-0.017
6	7.213	101.655	17.726	-0.013
7	7.393	101.832	17.904	-0.013
8	7.585	102.001	17.995	-0.011
9	7.767	102.207	18.027	-0.009
10	7.569	101.062	18.826	-0.010
11	7.633	101.253	18.786	-0.002
12	7.702	101.487	18.723	-0.007
13	7.777	101.740	18.606	-0.010
14	7.821	101.887	18.521	-0.009
15	7.852	101.995	18.443	-0.009
16	7.880	102.108	18.361	-0.018
17	7.902	102.156	18.440	-0.016
18	8.222	102.239	18.567	-0.009
19	8.440	102.335	18.656	-0.015
20	8.661	102.421	18.703	0.001
21	8.926	102.526	18.724	-0.001
22	9.177	102.643	18.717	-0.015
23	9.434	102.751	18.651	-0.010
24	9.661	102.840	18.571	-0.017
25	9.863	102.937	18.447	-0.012
26	10.005	102.981	18.359	-0.005
27	10.120	102.929	18.438	-0.002
28	10.340	102.838	18.508	-0.010
29	10.566	102.741	18.657	-0.013
30	10.759	102.663	18.704	-0.018
31	11.053	102.537	18.734	-0.022
32	11.255	102.439	18.717	-0.012
33	11.525	102.345	18.673	-0.035
34	11.738	102.235	18.577	-0.013
35	11.969	102.140	18.454	-0.017
36	12.077	102.004	18.381	-0.019
37	12.108	101.980	18.460	-0.011
38	12.138	101.866	18.536	-0.006
39	12.178	101.733	18.627	-0.014
40	12.255	101.489	18.743	-0.011
41	12.322	101.238	18.810	-0.009
42	12.376	101.066	18.841	-0.011
43	12.273	100.863	19.032	-0.009
44	12.216	101.034	19.012	-0.002
45	12.162	101.229	18.987	-0.012
46	12.085	101.482	18.910	-0.009
47	12.010	101.741	18.793	-0.009
48	11.864	101.914	18.695	-0.014
49	11.942	101.976	18.648	-0.008

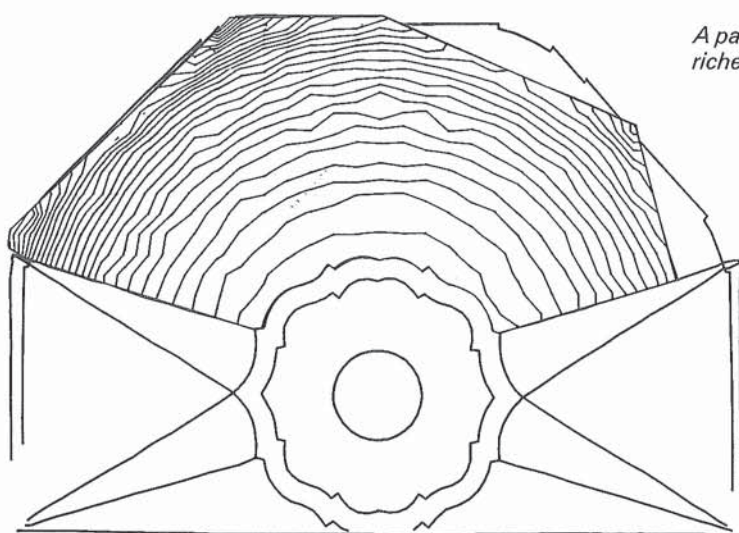




Lors de la phase 3 (créations des fichiers), la numérisation des formes peut s'accompagner, sans perte de temps significative, d'une rédaction graphique en plan ou en élévation ;

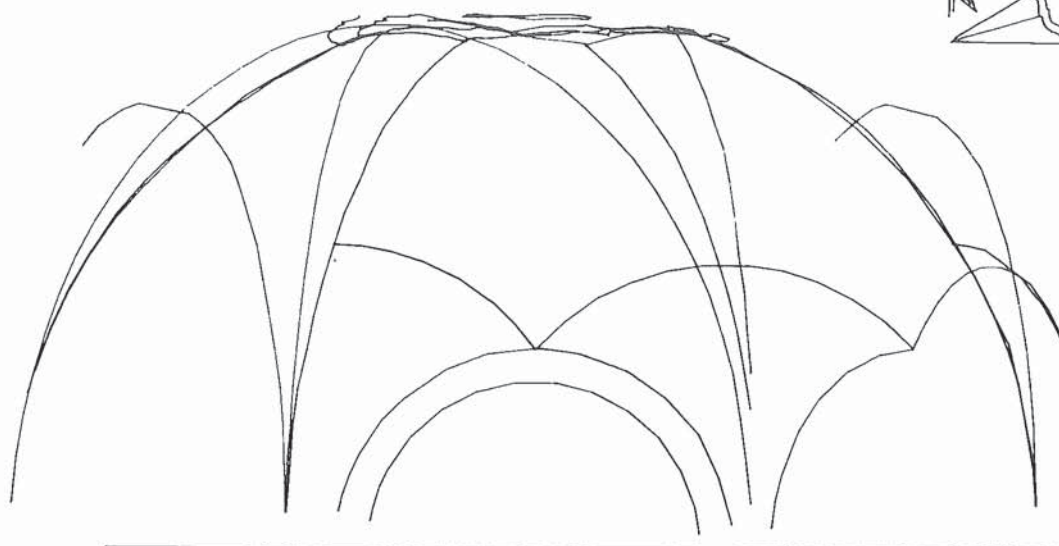
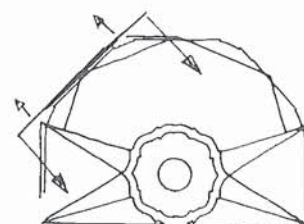
ce plan et cette élévation ont été ici traités pour partie en lignes de structure et pour partie avec le rendu de l'appareil.



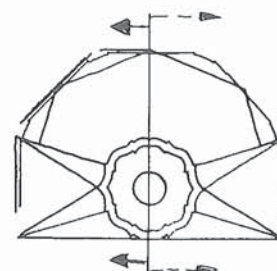
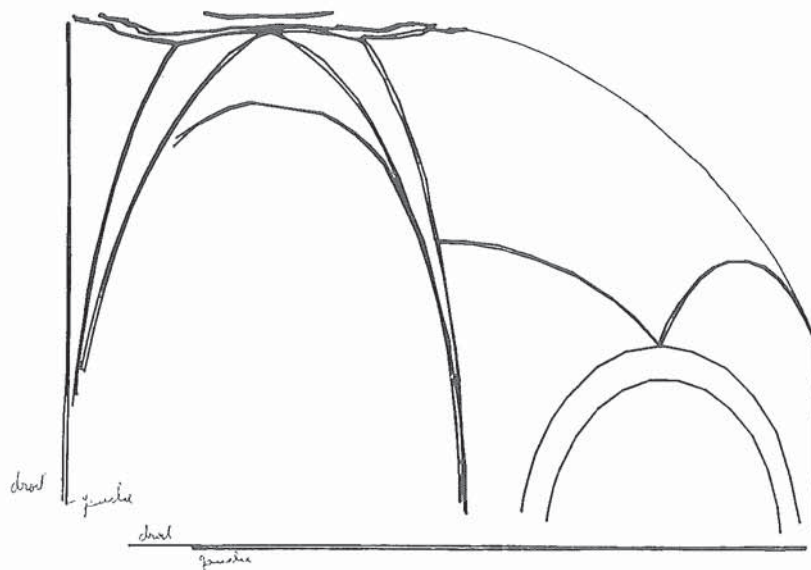


*A partir des fichiers, il est possible d'obtenir des figures très riches d'information sur la structure architecturale.*

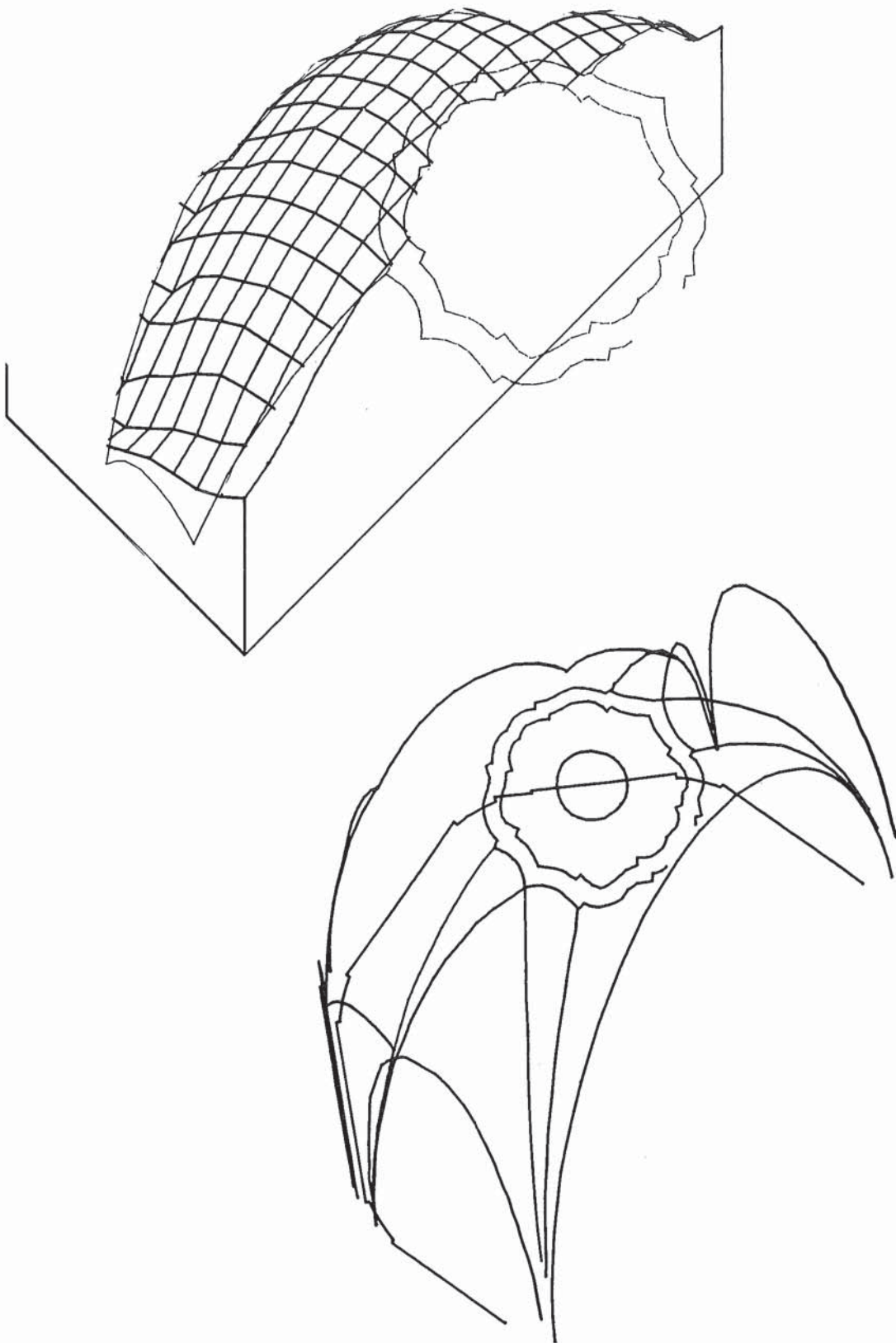
*Ainsi, les projections au miroir des parties gauche et droite ou antérieure et postérieure de la voûte montrent la symétrie presque parfaite de sa réalisation.*



*La rotation des fichiers permet également d'obtenir des géométraux dans le plan de projection particulier, défini par certains éléments de la structure.*



*Des vues axonométriques en "fil de fer" (sans suppression des parties cachées) ou réticulées (diagrammes volumétriques) présentent à l'observateur la voûte selon n'importe quel point de vue.*





# CHARTREUSE DE VALBONNE ( 84 ) SECTEUR 1

## NATURE DE LA QUADRIQUE

### ELLIPSOÏDE

LONGUEUR DES DEMIS AXES : 3.13 2.79 3.03

CENTRE : X0=9.98 Y0=100.29 Z0=17.21

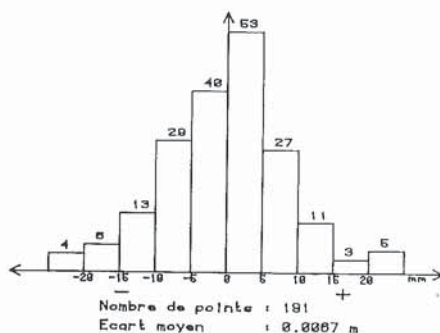
### AXES :

Angle avec la verticale : 97.3 20.0 80.2  
Angle horizontal avec OY : -93.1 -1.5 7.8

EQUATION RAPPORTEE AUX AXES :  $\frac{X^2}{A} + \frac{Y^2}{B} + \frac{Z^2}{C} = 1$   
AVEC A=9.81 B=7.78 C=9.18

L'affichage des résultats (phase 5) s'effectue automatiquement ; la nature de la surface géométrique et sa définition sont suivies d'un histogramme de répartition des écarts entre la forme effective et la forme mathématique et de l'indication de l'écart moyen.

Ecart dans la direction :  
X2=0.00 Y2=0.00 Z2=1.00

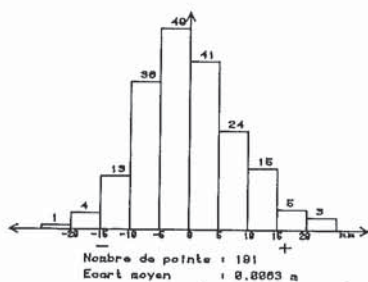


Au vu des premiers résultats, un nouveau calcul peut être entrepris en sélectionnant une forme particulière — ici, sphère — ou en intervenant sur plusieurs fichiers à la fois.

## CHARTREUSE DE VALBONNE (84) Secteur I (C70,F2)

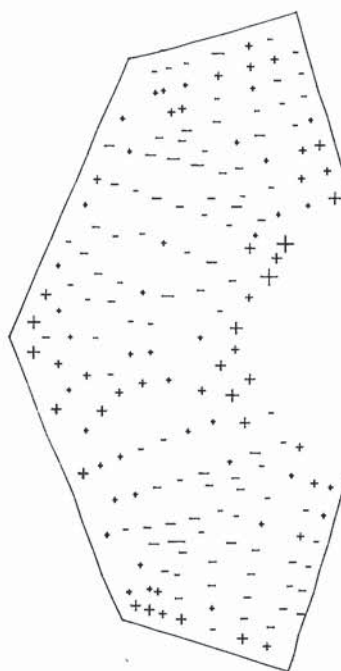
CENTRE DE LA SPHERE : X0=9.98 Y0=100.27 Z0=16.07  
RAYON : R=3.38

Ecart



## PROJECTION SUR LE PLAN DES XY

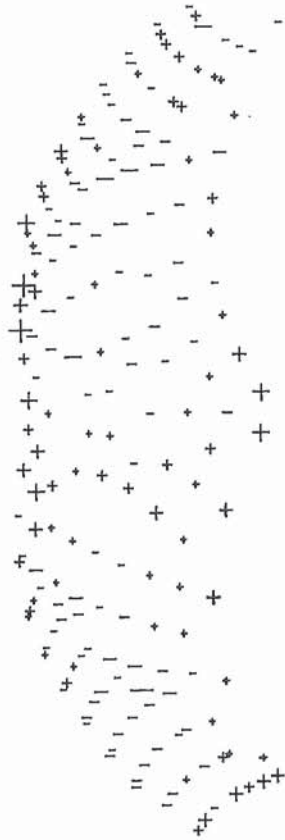
1 m C1 cm pour 0.25 m



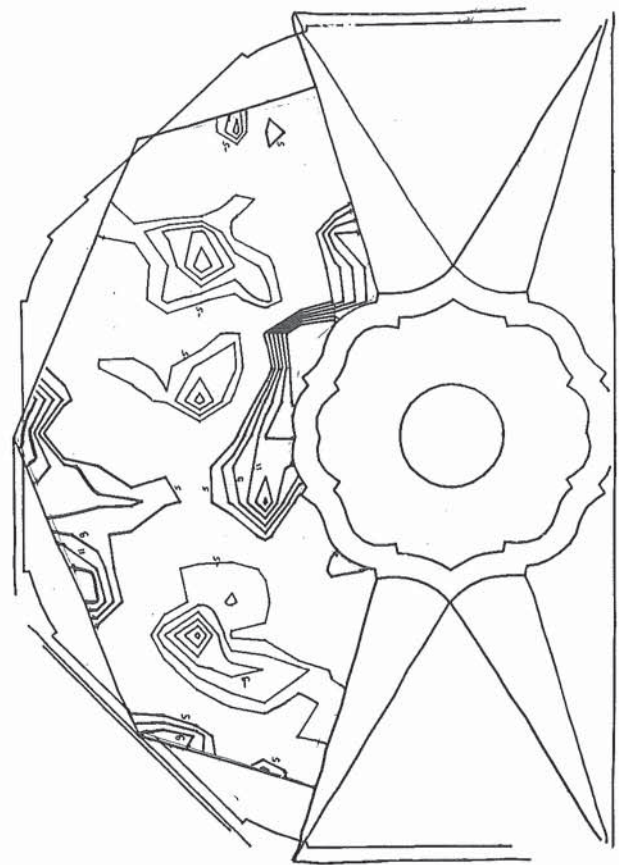
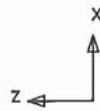
Xmin=7.57 Xmax=12.37 Ymin=100.54 Ymax=102.93

# PROJECTION SUR LE PLAN DES XZ

1 m 0.1 cm pour 0.25 m

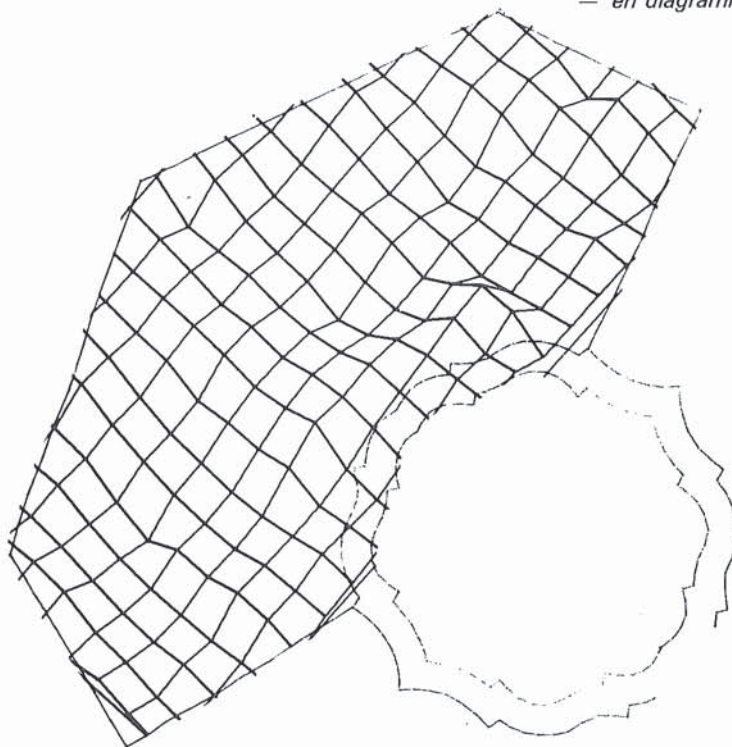


X<sub>min</sub>=7.57 X<sub>max</sub>=12.37 Z<sub>min</sub>=18.32 Z<sub>max</sub>=19.86

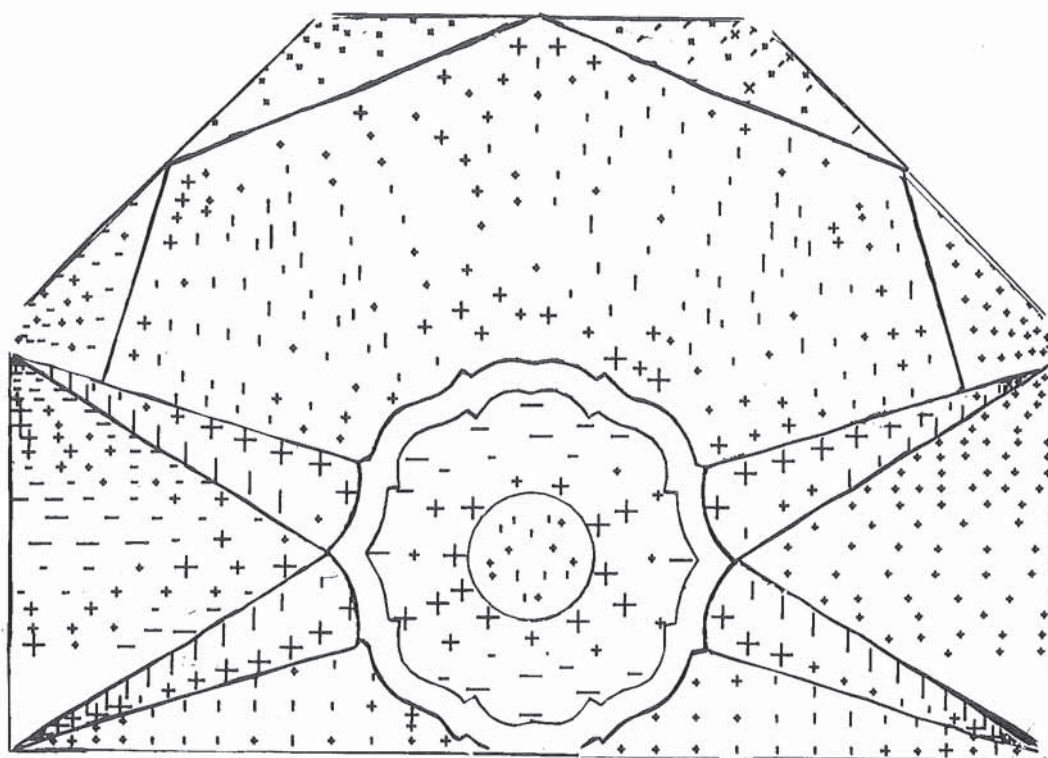


Des programmes graphiques sont alors sollicités pour visualiser la position des écarts et leur répartition :

- en projection géométrale selon un plan choisi : X, Y ou X, Z,
- en courbes d'écart égal,
- en diagramme volumétrique.







L'ensemble des programmes d'organisation des données, de calcul et de traduction des résultats est aujourd'hui au point. La capacité limitée en mémoire du micro-ordinateur utilisé, dont il a fallu tenir compte, a singulièrement compliqué la rédaction et l'organisation des programmes, notamment en ce qui concerne les graphiques. Pour les programmes de calculs, nous avons notamment désiré que l'intervention du chercheur soit minimale et que les a priori architecturaux n'éliminent que les solutions à l'évidence aberrantes ; les programmes de calcul ont une généralité graduée et par exemple le programme des quadriques débouche sur les programmes particuliers comme celui de la sphère.

Les tests sur des voûtes et des ensembles de voûtes doivent maintenant être multipliés afin de mieux dégager des règles pour l'interprétation des résultats.

Dès à présent, il semble qu'il est possible d'appliquer à n'importe quelle structure architecturale cet ensemble d'auscultations qui constitue ainsi, un outil nouveau pour l'étude et la conservation du patrimoine.

**J.P. S.A.**

*Maquette : J.-P. SAINT-AUBIN.*

\* *Restitutions photogrammétriques : Inventaire Général (Michel Maumont).*

#### **Nouveaux adhérents et abonnés de 1981**

**Si vous désirez compléter votre COLLECTION DE LA REVUE XYZ depuis le n° 1, veuillez simplement indiquer les numéros souhaités en écrivant au Secrétariat de l'A.F.T., 39 Ter, rue Gay-Lussac - 75005 PARIS, et en joignant F 20, par chèque ou en timbres pour frais d'envoi, quel que soit le nombre de numéros.**