

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EFFICACITE DE LA CONSOLIDATION DES PIERRES

Depuis une vingtaine d'années, sous l'égide des responsables de la sauvegarde des monuments, le laboratoire de chimie du Musée National à Poznań (Pologne), en collaboration avec les instituts universitaires et techniques, étudie l'application de différentes substances à la conservation des monuments et des objets en pierre. De nombreuses publications ont présenté ces recherches. Nous tentons ici d'en synthétiser les résultats.

INTRODUCTION

1. L'approche scientifique du traitement des pierres d'un monument comporte trois groupes d'études.

Le premier groupe concerne les qualités des matériaux pierreux. Ces qualités caractéristiques minéralogiques et pétrographiques, propriétés physiques et mécaniques, sont relevées tant sur les pierres saines que sur les pierres altérées, non seulement sur l'édifice, mais aussi en laboratoire.

Le second groupe s'intéresse à l'étude des mécanismes d'altération des pierres (1). Tout comme la pathologie médicale, il traite des rapports entre causes et symptômes des maladies.

Le troisième groupe comporte les moyens d'évaluation des méthodes de traitement des pierres altérées. Ces méthodes sont le fruit, soit des expériences du passé, soit d'inventions contemporaines.

Au cours des dernières années, des organismes internationaux — l'ICOMOS, le Comité de l'ICOM pour la conservation et le Centre international de Conservation de Rome — ont associés des scientifiques aux responsables de la sauvegarde des monuments pour développer les recherches technologiques indispensables au progrès du traitement des monuments en pierre. En ce qui concerne le laboratoire du Musée National à Poznań, les études portent dans deux directions. La première s'intéresse aux observations, examens et expériences sur les effets de consolidation effectués dans le passé. La deuxième cherche à vérifier la valeur effective des consolidations par résines synthétiques.

II. RECHERCHE SUR LES CONSOLIDATIONS DE PIERRES EFFECTUEES DANS LE PASSE

1. On conserve les monuments, soit par assainissement des structures en remplaçant simplement les pierres détériorées par un matériau nouveau, soit par application de méthodes compatibles avec la nécessité de

conserver la substance originale et l'aspect esthétique du monument. Il faut dans ce cas adapter, améliorer et élaborer les méthodes d'affermissement des pierres altérées. C'est au milieu du XIX^e siècle que commencent les travaux de consolidation des pierres altérées : vers 1850, Fuchs utilise le verre liquide pour consolider et protéger les pierres poreuses; vers 1890, Kessler utilise les fluosilicates. Le procédé breveté consistait à imprégner la pierre d'une solution du kaolin (argile de porcelaine) dans l'acide fluorhydrique. Les pierres traitées d'après Fuchs ou Kessler furent consolidées durant quelques dizaines d'années. Après cette période commença la désagrégation du matériau sous la couche superficielle de pierre. Ces traitements ont causé plus de mal que de bien. En 1924 fut breveté le procédé d'imprégnation de la pierre par le produit de réaction du tétrachlorure de silicium avec l'alcool éthylique — nommé silicone. Depuis une vingtaine d'années, on a proposé l'application de différentes résines synthétiques pour la consolidation des pierres altérées. On a également introduit plusieurs centaines de produits durcisseurs des pierres poreuses; ils ont pour base l'un des matériaux suivants :

- a) les silicates solubles, silicofluorures, hydroxydes de baryum et de calcium;
- b) différentes combinaisons de substances silico-organiques, des cires, huiles et résines naturelles, des savons, baumes, etc.;
- c) la silice soluble ou colloïdale, l'hydroxyde de baryum avec l'urée, les sulfates alcalino-barytiques et autres catalyseurs de recristallisation;
- d) les résines synthétiques appliquées, soit sous forme de monomères, soit en solution de polymère.

2. Après la deuxième guerre mondiale, on a effectué un très grand nombre de travaux de conservation de monuments et de sites urbains en Pologne. Ces travaux, très divers, furent accompagnés d'études historiques et stylistiques ainsi que d'examen techniques et scientifiques. Nous avons eu ainsi la possibilité de perfectionner l'expérience des conservateurs, de vérifier le résultat des recherches théoriques, et de faire progresser les techniques de conservation.

Nos activités scientifiques portèrent d'abord sur l'identification des pierres mises en œuvre dans les monuments endommagés ou détruits pendant la guerre, afin de déterminer leur origine et de choisir les pierres de remplacement. A Poznań, quelques centaines de détails architectoniques furent ainsi examinés et la plupart des pierres purent être identifiées et leur carrière retrouvée.



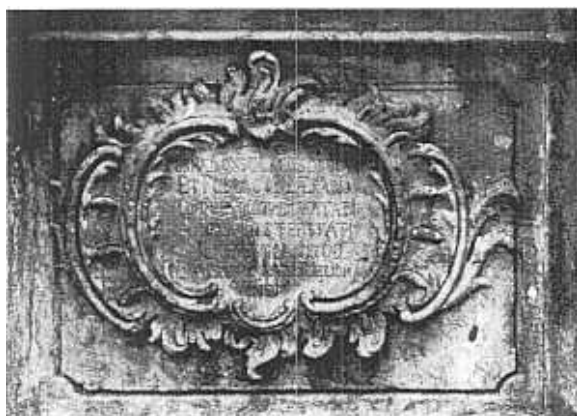
Hôtel
résine époxyde.

édifice construit

fontaine 1968, imprégné

solution

b



d

Nos résultats furent confirmés par des documents trouvés à Berlin (1). Il s'agit de grès fins, silicateux, résistant bien à la pollution atmosphérique et aux intempéries et qui proviennent de Rakowice, Zerkowice et Warta.

Vers 1950, la méthode électro-osmotique de pétrification de la pierre d'après Cebertowicz fut employée pour stabiliser des reliques architecturales préromanes sous la Cathédrale de Poznań. Après 10 années, l'observation de nouveaux dégâts imposa le réexamen attentif de ce cas, particulièrement important sur le plan historique (2). Les recherches physiques et chimiques établirent l'analyse des éléments et groupes principaux, de même que celle des traces, l'examen microscopique et électromicroscopique, l'examen gammagraphique (Debye-Scherer) et diffractométrique, les déterminations de la porosité, de la densité apparente, de la surface spécifique et de la chaleur d'hydratation.

Fig. 1 b. — Hôtel de Ville à Poznań. Fragment de la façade.

Fig. 1 c-d. — Hôtel de Ville à Poznań. Fragment de la fontaine.

Fig. 1 e. — Hôtel de Ville à Poznań. Fragment de l'intérieur.

Fig. 1 f. — Hôtel de Ville à Poznań. Le portail sculpté en pierre et peint.

c

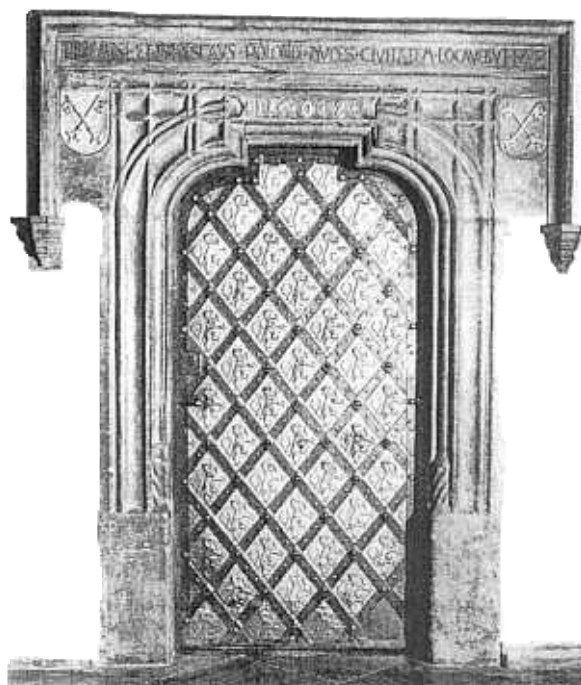




Fig. 2 a. — La Grande-Garde à Poznań. Après la restauration.



Fig. 2 b. — La Grande-Garde à Poznań. Détail.

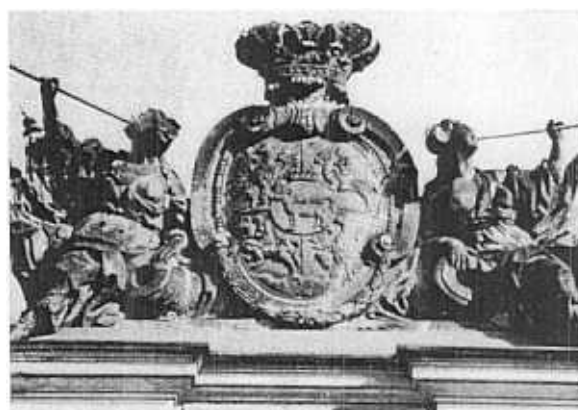


Fig. 2 c. — La Grande-Garde à Poznań. Détail (complété avec des mastics à résine polyester).

On a constaté que le processus d'altération accélérée était basé sur un double mécanisme de dégradation, à la fois chimique et physique. La dégradation du matériau pierreux était accompagnée d'efflorescences externes ou internes de sels solubles.

Le nombre de résultats permet de classer les sels d'après les symptômes de destruction et suivant le degré d'accélération de l'altération de la pierre (3).

Nous pouvons en déduire que :

1. l'accélération de l'altération de la pierre est proportionnelle à sa teneur en sels solubles;
2. l'altération croît visiblement en même temps que la basicité ou que l'acidité du milieu salin;
3. l'accélération de l'altération dépend de l'hygroscopicité des sels formés dans la pierre. Le degré d'humidité de la pierre dépendait de l'humidité de l'air. L'humidité absorbée par la pierre salée variait avec le degré d'hydratation des sels, lui-même toujours en équilibre avec l'humidité relative de l'air;
4. la vitesse de l'altération est proportionnelle à la porosité x , l'hygroscopicité x , l'énergie de la réaction entre la pierre et le milieu agressif, exprimée en chaleur d'hydratation et mesurée au microcalorimètre.

Les conclusions des recherches sur l'altération accélérée de la pierre sont suffisantes pour établir les règles d'appréciation de l'efficacité d'un traitement de consolidation de la pierre. Elles peuvent, en outre, servir de critères pour déterminer la durabilité des pierres et des mastics employés dans la conservation.

3. Le tableau I fournit les données caractéristiques des altérations observées sur :

a) *Une pierre consolidée par un verre liquide d'après la méthode Fuchs,*

— monument : sculpture de la façade de l'église baroque St-Pierre à Cracovie;

— pierre : calcaire;

— symptômes : exfoliation, efflorescences formant des taches humides lorsque l'humidité relative de l'air augmente, destruction complète jusqu'à une profondeur de 2 à 3 cm;

— échantillon :

1. calcaire non traité,
2. couche superficielle.

b) *Une consolidation électro-osmotique d'après Ceber-towicz,* effectuée avec les solutions du verre liquide et du chlorure de calcium,

— monument : reliques architecturales sous la Cathédrale de Poznań;

— pierres : granite et matériau synthétique composé d'argile, de chaux et de sable;

— symptômes : efflorescences cristallines, croûtes dures en surface, couches tendres sous la croûte;

— échantillons :

1. efflorescences,
2. croûte.

c) *Une pierre consolidée par des solutions de fluo-silicates d'après la méthode Kessler,*

— monument : portail roman de l'église des Saintes Marie et Madeleine à Wrocław;

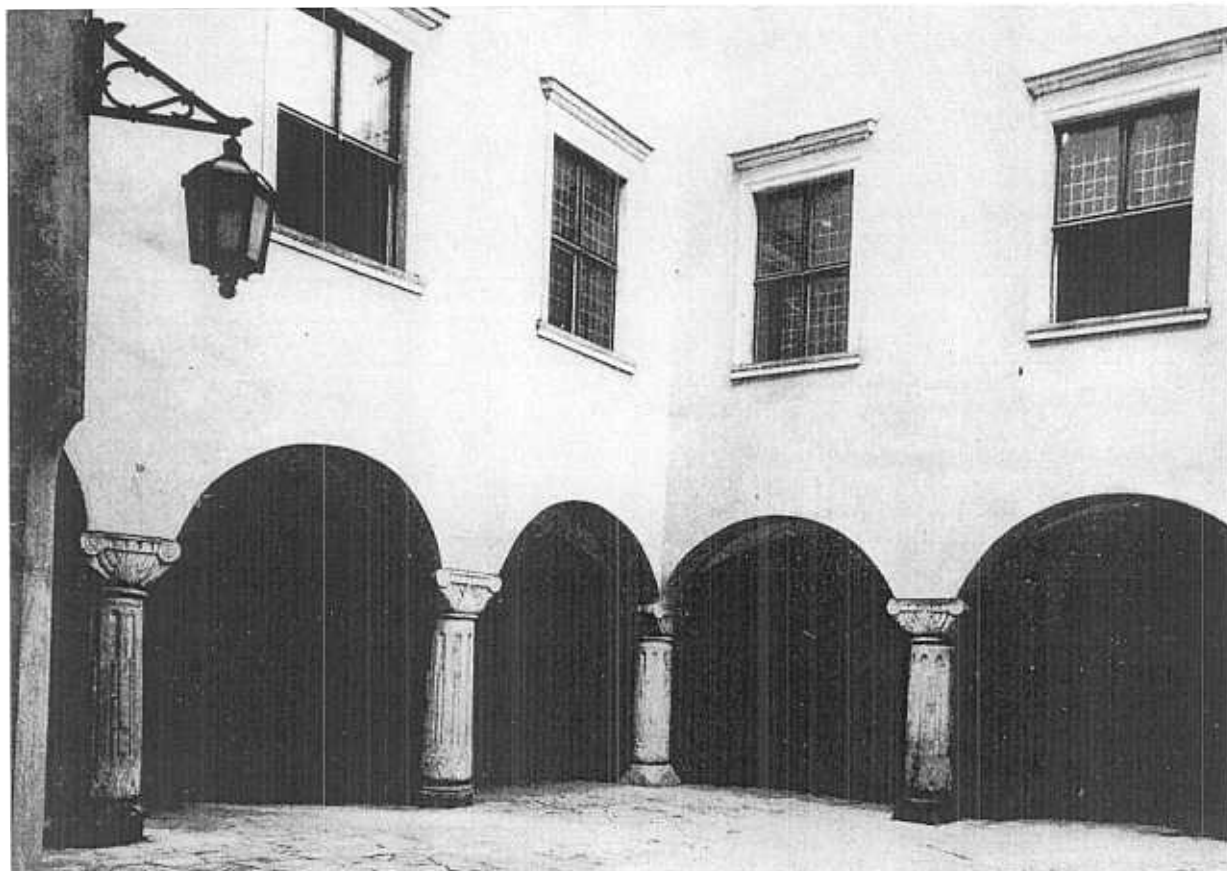
TABLEAU

Détermination en %	Echantillons																	
	b 1		b 2		2		d 1		d 2		d 3							
Cl'	tr.	1,05	6,35	5,52	—	0,50	1,05	tr.	tr.	tr.	1,20	0,65						
SO ₄ '	tr.	tr.	tr.	tr.	—	2,07	1,47	tr.	7,20	3,31	0,12	0,14						
HCO ₃ ' + CO ₃ '	45,7	46,1	6,31	4,21	tr.	0,10	0,39	31,5	5,20	12,03	0,06	0,23						
NO ₃	—	—	—	—	—	—	—	tr.	tr.	tr.	—	—						
F'	—	—	—	—	tr.	tr.	tr.	—	—	—	tr.	tr.						
Al ₂ O ₃	0,04	0,01	3,63	1,93	0,09	tr.	tr.	0,06	2,10	0,75	2,15	0,25						
Fe ₂ O ₃	0,05	0,20	0,95	0,45	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.						
CaO	43,7	38,9	8,01	7,08	0,69	0,17	0,23	3,54	8,10	3,20	1,25	0,70						
MgO	5,5	1,2	0,13	0,06	tr.	tr.	0,04	4,60	3,20	1,10	2,10	3,20						
Na+	tr.	6,21	4,2	3,2	tr.	0,44	0,28	tr.	tr.	tr.	1,40	0,50						
K+	tr.	1,01	tr.	tr.	tr.	0,17	1,09	tr.	tr.	tr.	tr.	0,02						
H ₂ O pour 70 % Hr.	0,07	4,21	10,8	4,1	0,05	2,77	1,18	0,09	3,50	4,30	2,10	2,70						
pH	8,1	10,4	9,2	10,5	7,1	7,0	6,8	8,0	6,9	6,4	6,8	6,8						
Porosité, %	36,6		28,		37,4		59,9		36,2		8,6		42,0		37,2		51,3	
Chaleur d'hydrat., cal/g	0,80		7,20		5,7		1,4		3,5		9,3		2,6		4,2			



Fig. Le Palais Górká à Poznań. Les colonnes découvertes; la cou

Fig. 3 b. Le Palais Górká à Poznań. Après la reconstruction.



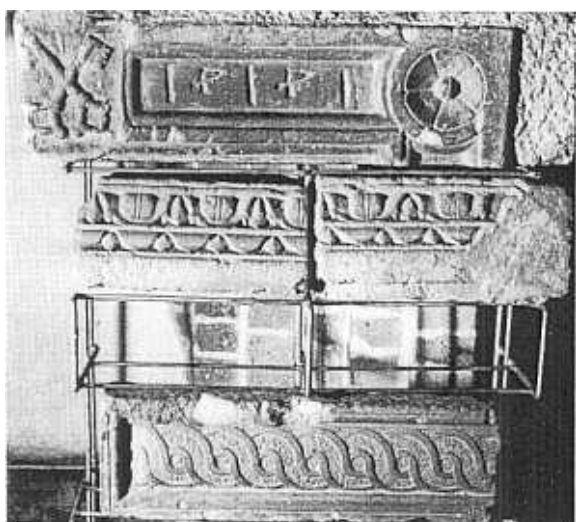
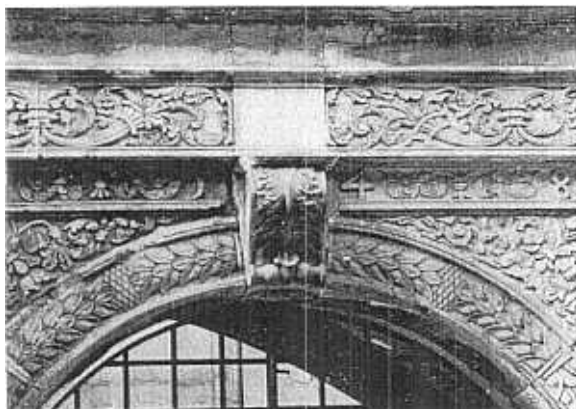


Fig. 3 c. — Le Palais Górkà à Poznań. Détail du portail.

Fig. 3 d. — Le Palais Górkà à Poznań. Détails replacés au musée.

— pierre : grès siliceux;
— symptômes : croûte dure et tendre, efflorescences cristallines et sable sous la croûte;

— échantillons :

1. pierre non traitée,
2. croûte,
3. couche détériorée sous la croûte.

d) *Une pierre soumise à la pollution atmosphérique,*

— monument : sculpture architecturale de Wit Stwosz de l'église Ste-Barbe à Cracovie;

— pierre : calcaire;

— symptômes : croûtes dure et tendre couvertes de crasse et de suie, pierre fragile sous la croûte;

— échantillons :

1. pierre non traitée,
2. croûte,
3. couche détériorée sous la croûte.

e) *Une pierre de Gersheim réparée au moyen de mastic à base de fluosilicates,*

— monument : sculptures architecturales de la chapelle Royale à Gdańsk,

— pierre : grès siliceux,

— symptômes : taches humides entourées de pierre désagrégée;

— échantillons :

1. mastic,
2. pierre désagrégée.

III. RECHERCHES SUR LA CONSOLIDATION DES PIERRES A L'AIDE DE RESINES SYNTHETIQUES

L'application des résines synthétiques à la conservation des monuments couvre actuellement des produits et méthodes très divers.

Les résines peuvent être groupées comme suit :

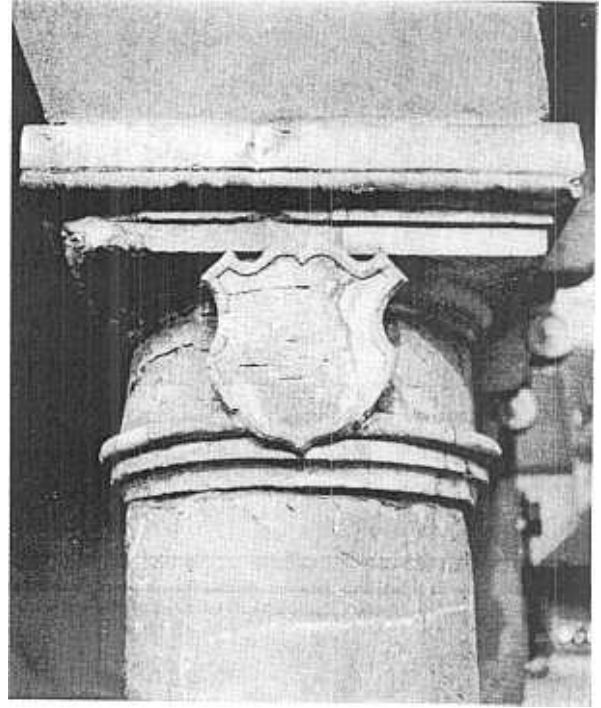
- a) les acrylates et métacrylates polymérisés,
- b) les époxydes,
- c) les polyvinyliques,
- d) les polyesters,
- e) les silicones.

Chaque groupe est représenté sur le marché sous des dénominations commerciales, nombreuses et diverses. Les résines à appliquer doivent remplir les conditions préalables suivantes :

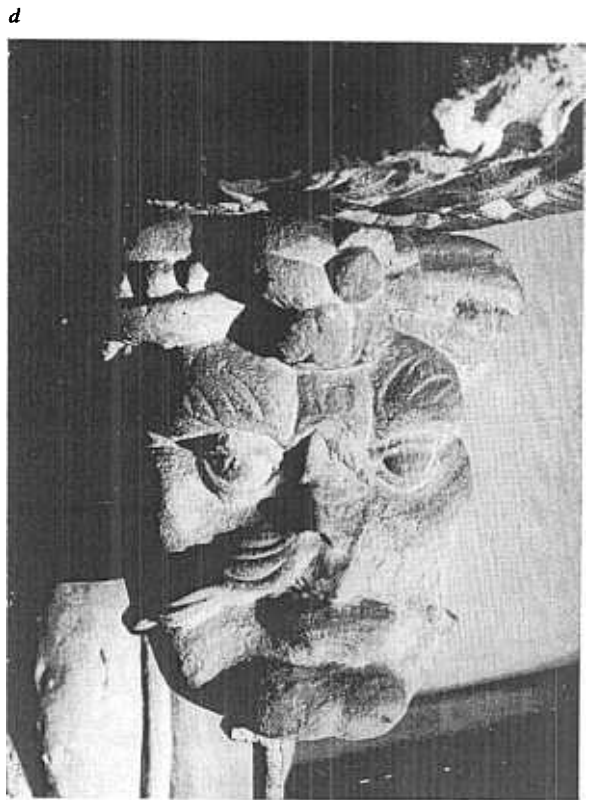
- a) pénétrer facilement dans la pierre et se déposer uniformément dans toute la masse de celle-ci;
- b) augmenter les propriétés hydrofuges de la pierre sans en obstruer les pores;
- c) augmenter les résistances de la pierre sans modifier son apparence.

La préparation de différents monuments à la conservation par imprégnation de résines synthétiques a comporté les recherches de laboratoire suivantes :

1.1. *Mesure des caractéristiques techniques des pierres poreuses polonaises,* les plus utilisées dans les travaux de



b



d

Fig. 4. *a*. — Les maisonnettes de boutiquiers à Poznań. Après la reconstruction.

Fig. 4. *b*. — Les maisonnettes de boutiquiers à Poznań. Pendant les travaux.

Fig. 4. *c*. — Les maisonnettes de boutiquiers à Poznań. Détail.

Fig. 4. *d*. — Les maisonnettes de boutiquiers à Poznań. Détail.

conservation des monuments — grès des carrières de Nietulisko (Kielce), Zerkowice et Rakowice (Basse-Silésie), calcaires de Pińczów et Karsy (Kielce) — cfr tableau 2.

TABLEAU 2

Pierres	Poids vol., g/cm ³	Poids spéc., g/cm ³	Imbibition, % d'eau	Résistance	
				Compression, kg/cm ²	Frottement, cm/cbl/min.
<i>Calcaires</i>					
1. Pińczow	1,70	2,68	14,0	100	1,10
2. Karsy	1,40	2,55	24,0	150	1,50
<i>Grès</i>					
1. Nietulisko	1,95	2,65	12,0	150	1,20
2. Zerkowice	2,10	2,62	7,6	350	0,70
3. Rakowice	2,00	2,68	7,2	250	1,90

1.2 *Contrôle des caractéristiques des résines retenues pour la recherche (cfr tableau 3)*

TABLEAU 3

Résines	Etat	Dissolvant	Concentration, en %
1. Méthacrylate de n-butyle	Monomère	—	
2. Méthacrylate de n-butyle	Polymère-solide	White-spirit	5, 10, 15 et 20
3. Alcool polyvinylique	Solide	Alcool n-butyl.	5, 10, 15 et 20
4. Acétate de polyvinyle	Solide	Acétate de méthylglycol 1:2	5, 10, 15 et 20
5. Epoxy-Epidian 5	Liquide épais	Toluène-méthanol	10 et 20
6. Polyester-Polimal 103	Liquide épais	Xylène	10 et 20
7. Silicone-Ahydrosil K 20	Liquide épais	Eau	1 et 2
8. Silicone-Silak 120	Solide	1:1 Acétone + toluène	2 et 5

1.3. *Choix des procédés d'application de la résine*

a) Pour le méthacrylate de n-butyle, les échantillons ont été immergés dans le monomère additionné de peroxyde isobutyrique et d'o-phényle-diamine. Après une demi-heure d'immersion, on enlève les échantillons de la cuve puis on les emballe dans une feuille plastique afin d'éviter l'évaporation du méthacrylate avant sa polymérisation.

b) Pour les solutions de polymères du méthacrylate de n-butyle, d'alcool polyvinylique, d'acétate de polyvinylique, de résine polyester et de la résine silicone « Silak », les échantillons ont été séchés pendant 2 mois, en atmosphère saturée de vapeur du dissolvant, à température ambiante (environ 20° C), ensuite pendant

2 semaines en atmosphère normale et enfin pendant 2 heures en séchoir à 120° C.

c) Pour les solutions de résine époxyde et de résine silicone « Ahydrosil », les échantillons ont été couverts d'une feuille plastique pendant 4 jours, puis séchés en atmosphère normale. L'uniformité du dépôt de la résine à l'intérieur de la pierre est favorisée par l'emploi de dissolvants peu volatils; le ralentissement de l'évaporation; la concentration appropriée de la résine; la proportion des dissolvants et la quantité de durcisseur.

2. *Contrôle du degré de pénétration des solutions et de dépôt de la résine par examen de fluorescence de coupes transversales, sous lumière ultra-violette, cfr tableaux 4 et 5.*



Fig. 5 a. — La Chapelle Royale à Gdańsk. Marque des prises d'échantillons.

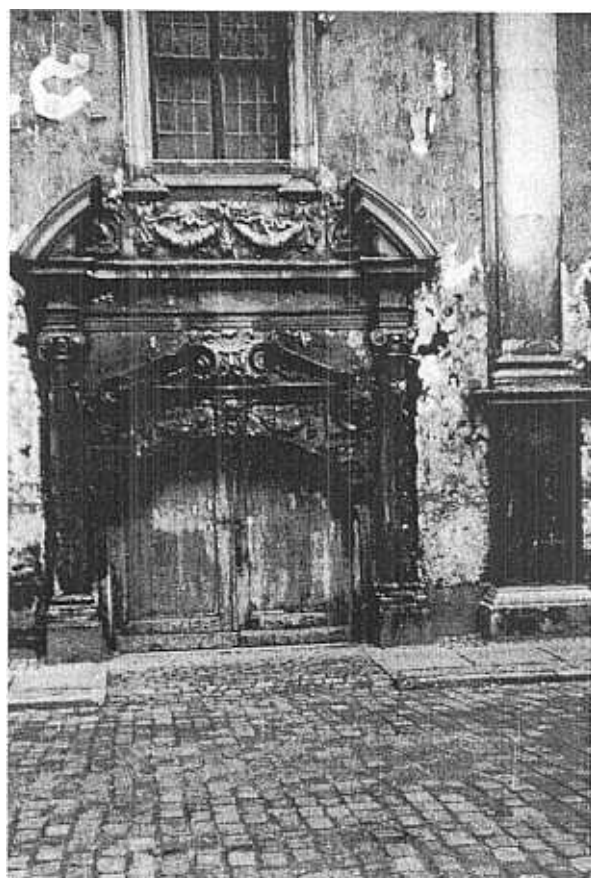


Fig. 5 b. — La Chapelle Royale à Gdańsk. Le portail traité par le fluoro-silicate vers 1930, photo en 1971.

Fig. 5 c. — La Chapelle Royale à Gdańsk. L'aspect général pendant la conservation.



Fig. 5 d. — La Chapelle Royale à Gdańsk. Détail pendant la conservation. Complété plusieurs fois de mortiers.

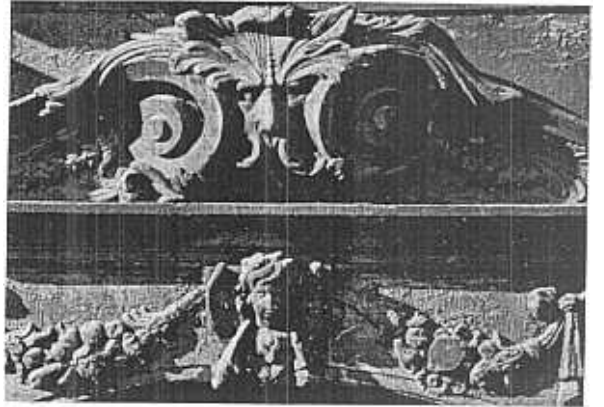




f



g



h

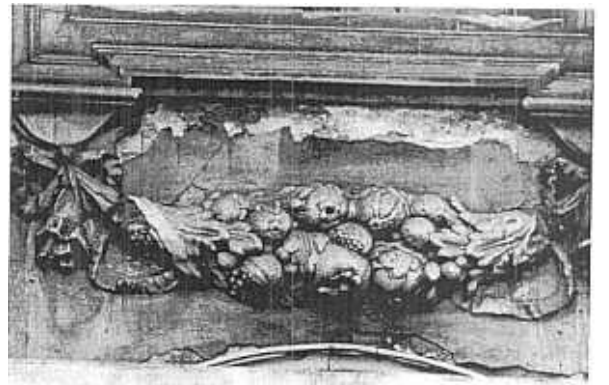


Fig. 5 e. — La Chapelle Royale à Gdańsk. Fragment du portail avant la conservation.

Fig. 5 f. — La Chapelle Royale à Gdańsk. Fragment du portail avant la conservation.

Fig. 5 g. — La Chapelle Royale à Gdańsk. Fragment du portail.

Fig. 5 h. — La Chapelle Royale à Gdańsk. Fragment de la façade.

TABLEAU 4
Fluorescence U-V des matériaux examinés

Matériaux	Couleur	Nuance	Intensité
<i>Pierres :</i>			
Calcaire Pińczów	Brun	Beige	Brumeuse
Calcaire Karsy	Brun	Café	Brumeuse
Grès Nietulisko	Violet	Rougeâtre	Faible
Grès Rakowice	Rouge	Violet	Faible
Grès Żerkowice	Rouge	Violet	Faible
<i>Résines :</i>			
Méthacrylate	Bleu	Violet	Brumeuse
Alcool polyvinylique	Blanc	Violet	Brillante
Acétate de polyvinyle	Blanc	Bleu	Brillante
Epoxy	Blanc	Gris	Forte/Brillante
Polyester	Gris	Bleu	Faible
Silicone Ahydrosil	Blanc	Bleu	Faible
Silicone Silak	Jaune	Vert	Faible

TABLEAU 5
Fluorescence U-V des pierres imprégnées

Pierres traitées	Grès			Calcaires	
	Nietulisko	Rakowice	Zerkowice	Pińczów	Karsy
Consolidants					
Méthacrylate monomère	2 a	2 a	2 a	1 a	1 a
Méthacryl. sol. 5 %	2 c	2 c	2 c	1 c	1 c
10 %	2 b	2 b	2 b	1 b	1 b
15 %	2 a	2 a	2 a	1 a	1 a
20 %	2 b	2 b	2 b	1 b	1 b
Alcool polyvin. 5 %	2 c	2 c	2 c	3 c	3 c
10 %	2 b	2 b	2 b	3 b	3 b
15 %	2 a	2 a	2 a	3 a	3 a
20 %	2 b	2 b	2 b	3 b	3 b
Acétate de polyvin. 5 %	2 c	2 c	2 c	2 c	
10 %	2 c	2 c	2 c	2 c	2 c
15 %	2 b	2 b	2 b	1 a	1 a
20 %	2 b	2 b	2 b	1 b	1 b
Epoxy 10 %	1 a	1 a	1 a	2 b	2 b
20 %	2 a	2 a	2 a	1 a	1 a
Polyester 10 %	2 b	2 b	2 b	1 b	1 b
20 %	2 a	2 a	2 a	2 a	2 a
Silicone Ahydro 1 %	—	—	—	5 d	5 d
2 %				4 c	4 c
Silicone Silak 2 %	4 c	4 c	4 c	—	—
5 %	3 c	3 c	3 c	—	—

Dépôt	1 uniforme	a très abondant
	2 uniforme + bord	b abondant
	3 réduction lente	c moyen
	4 réduction forte	d faible
	5 seulement bord	



Fig. 6 a. — La fontaine de Neptune à Gdańsk. Les décorations sculptées.



Fig. 6 b. — La fontaine de Neptune à Gdańsk. L'échantillonnage.

3. *Détermination de la chaleur d'hydratation* pour vérifier l'effet hydrofuge de la pierre traitée en comparaison avec la pierre non traitée.

L'imprégnation des pierres poreuses affermit leur structure, influence favorablement leur stabilité et augmente leur durabilité.

Des nombreuses observations faites sur l'altération des pierres de construction, il ressort un facteur commun et principal de détérioration : l'humidité, sous toutes ses formes, condensations atmosphériques, pluie, neige, grêle, brouillard et la vapeur d'eau contenue normalement dans l'air et que l'on mesure en pourcents d'humidité relative. Les pierres et les parties de pierre où s'accumule l'humidité se désagrègent plus rapidement. Du point de vue physico-chimique, la tendance à l'altération

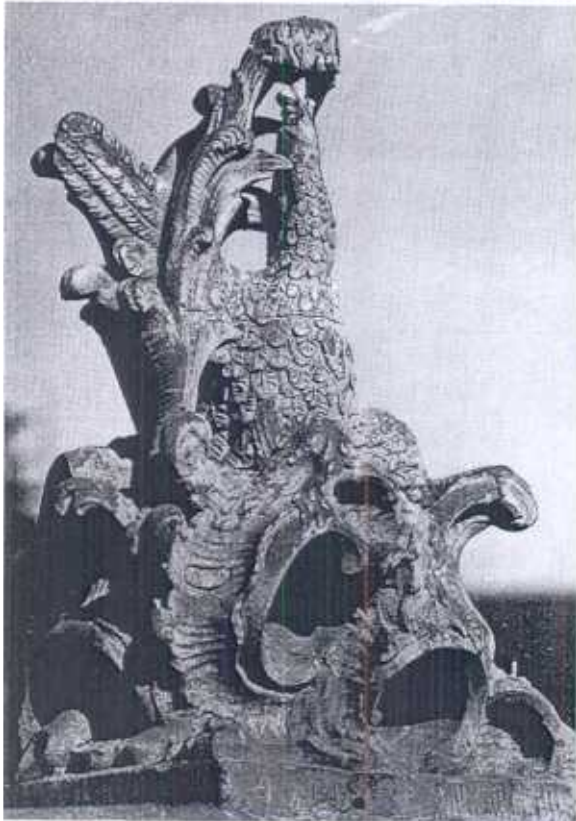
peut être exprimée par la valeur d'énergie produite pendant l'humidification et qui se mesure comme la chaleur d'hydratation.

La détermination de la chaleur d'hydratation repose sur la mesure de la variation de température provoquée par mise en contact de la pierre avec l'eau (4).

L'influence de l'imprégnation par diverses solutions de résines artificielles et naturelles sur la chaleur d'hydratation est présentée au tableau 6.

On constate que les résines réduisent remarquablement la chaleur d'hydratation des pierres et peuvent jouer un rôle protecteur contre l'humidité, ce qui équivaut à protéger contre l'altération. Quelques résines provoquent l'effet hydrofuge. Cet effet est marqué du signe — au tableau 6.

Fig. 6 c à k. — La fontaine de Neptune à Gdańsk : c) Les symptômes d'altération; d) Aspect général; e k) Détails.



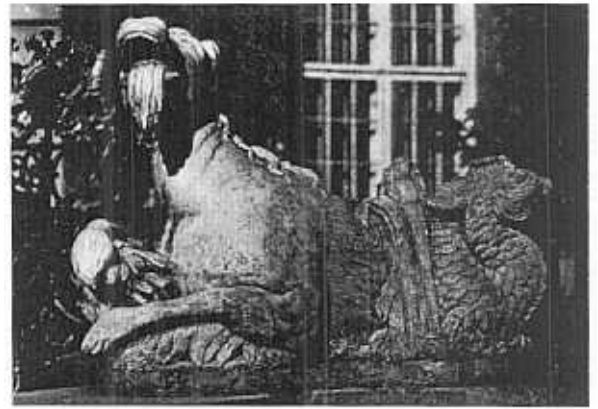
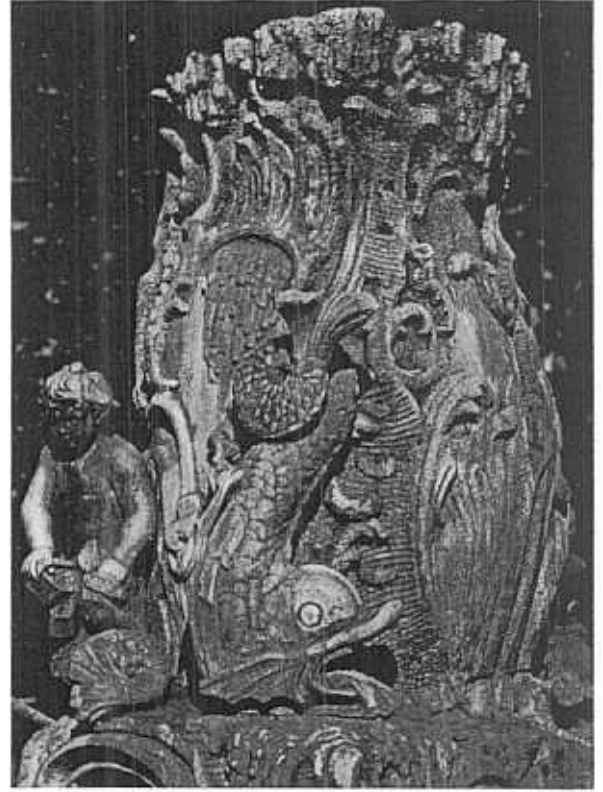


TABLEAU 6
Chaleur d'hydratation, cal./g

Pierres traitées	Grès			Calcaire:	
	Nietulisko	Rakowice	Żerkowice	Karsy	Pińczów
Consolidants					
Pierre non traitée	0,84	0,84	0,83	0,86	0,86
Méthacrylate-mono	- 0,08	- 0,16	- 0,16	- 0,33	- 0,58
Poly					
- 5 %	0,08	- 0,16	0,00	- 0,16	- 0,08
10 %	0,00	- 0,16	0,00	- 0,16	- 0,08
15 %	- 0,08	- 0,24	- 0,08	- 0,24	- 0,16
20 %	- 0,08	- 0,24	- 0,08	- 0,24	- 0,16
Alcool polyvin.					
5 %	0,16	0,08	0,08	- 0,16	- 0,16
10 %	0,00	0,08	0,08	- 0,16	- 0,24
15 %	- 0,16	0,00	0,00	- 0,24	- 0,32
20 %	- 0,16	0,00	0,00	- 0,24	- 0,24
Alcool polyvin.					
5 %	0,16	0,16	0,24	- 0,16	- 0,16
10 %	0,00	0,32	0,00	- 0,24	- 0,16
15 %	- 0,16	- 0,08	- 0,16	- 0,40	- 0,24
20 %	- 0,16	0,00	- 0,16	- 0,32	- 0,32
Epoxy					
10 %	0,24	0,16	0,16	0,16	0,16
20 %	0,00	- 0,08	- 0,08	- 0,16	- 0,24
Polyester					
10 %	0,16	0,08	0,00	0,08	0,16
20 %	0,00	- 0,08	- 0,08	- 0,16	- 0,16
Silicone					
Ahydrosil K 20					
1 %				0,00	0,00
2 %				0,08	0,08
Silicone					
Silak					
2 %	0,00	0,84	0,08		
5 %	0,08	0,48	0,32		

mono monomère
poly polymère
alc. polyvin. alcool polyvinylique
ac. polyvin. acétate de polyvinyl

4. Comme l'imprégnation d'une pierre dépose les résines dans les pores, en réduisant le volume de ceux-ci, la mesure de la porosité s'impose et doit être étudiée plus particulièrement à propos des phénomènes du gel et de la circulation interne de l'humidité.

Nous avons déterminé la porosité par mesure de la densité apparente (5).

Le tableau 7 donne ces mesures prises sur des pierres non traitées et sur des pierres imprégnées de résines.

5. Les apports d'eau liquide et les changements de l'humidité de l'air jouent un rôle essentiel dans la destruction des matériaux pierreux. La répétition des cycles d'hydratation et de dissolution des composants de la pierre finit, en effet, par compromettre la solidité des matériaux les plus résistants. L'accélération de l'altération de la pierre dans l'air est proportionnelle, entre autres facteurs, au degré d'hygroscopicité de la pierre, à la fréquence des cycles d'hydratation et de la réaction de la pierre au contact de l'humidité.

L'imprégnation par les solutions des résines organiques diminue l'hygroscopicité, consolide la pierre et améliore sa résistance ainsi que sa stabilité.

Le tableau 8 relève les déterminations de l'influence de l'imprégnation des grès de Nietulisko et de Żerkowice par les solutions du méthacrylate de n-butyle dans le white-spirit sur l'absorption de l'humidité dans diverses conditions de l'environnement.

IV. CONCLUSIONS

A. Les recherches physico-chimiques ont approfondi la connaissance des causes de l'altération et des principes de la protection des pierres contre l'action nuisible de l'environnement.

B. Des critères d'évaluation de l'efficacité de la consolidation des pierres altérées dans les monuments furent découverts. Ils peuvent servir à déterminer les facteurs et le mécanisme d'altération des pierres consolidées dans le passé; ils permettent de prévoir la durabilité de l'affermissement des pierres traitées par les solutions de résines synthétiques.

C. On a déterminé les valeurs définies des données caractéristiques pour les différents cas d'altération et pour les diverses méthodes d'application des résines synthétiques de consolidation.

TABEAU 7
Porosité, % (d'après Herbst)

Pierres traitées	Grès			Calcaires	
	Nietulisko	Rakowice	Zerkowice	Karsy	Pińczów
Consolidants					
Non traitées	26,4	25,4	19,9	45,1	36,6
Méthacrylate - monoc	17,3	18,1	14,9	28,3	25,2
Poly					
5 %	25,1	24,6	18,9	42,3	35,1
10 %	23,3	22,1	18,3	40,5	33,1
15 %	20,7	20,6	14,5	37,2	29,8
20 %	20,5	20,3	13,7	36,7	29,6
Alc. polyvin.					
5 %	24,3	23,9	18,2	44,1	35,6
10 %	22,4	21,9	17,5	42,2	34,1
15 %	20,9	21,0	14,0	40,5	31,2
20 %	20,3	20,2	13,5	38,1	29,6
Ac. polyvin.					
5 %	25,7	24,3	18,9	41,5	34,5
10 %	24,0	22,7	18,4	40,1	32,6
15 %	21,9	21,9	15,6	37,0	29,2
20 %	21,2	21,1	14,9	36,2	28,3
Epoxy					
10 %	8,7	12,2	7,9	26,2	19,4
20 %	8,5	11,9	7,1	17,7	10,3
Polyester					
10 %	12,3	14,5	15,1	19,3	17,7
20 %	10,2	10,2	9,3	16,2	14,3
Silicone					
Ahydrosil K 20					
1 %				45,3	37,3
2 %				44,2	35,4
Silicone					
Silak					
2 %	25,1	23,3	19,1		
5 %	26,2	22,1	17,3		
mono poly alc. polyvin. ac. polyvin.	monomère polymère alcool polyvinylique acétate polyvinylique				

TABEAU 8
mg d'eau par cm³ de pierre

Echantillons	Solution de résine.	Humidité relative de l'air			Immersion
	%	30 %	60 %	99 %	100 %
I.	5	1,13	1,25	1,88	8,75
II.	10	1,50	1,90	2,05	7,70
III.	15	0,62	2,23	2,69	5,23
IV.	20	1,00	4,75	5,00	5,67
	5	0,56	1,56	1,81	5,19
3.	10	1,81	4,46	4,75	7,50
	15	1,07	2,13	3,33	6,93
4.	20	0,65	3,10	3,50	4,10

Chiffres romains : grès de Nietulisko
Chiffres arabes : grès de Zerkowice.

Janusz LEHMANN
(Poznań)

Fig. 7 a. — Le château de Lańcut. Aspect général.

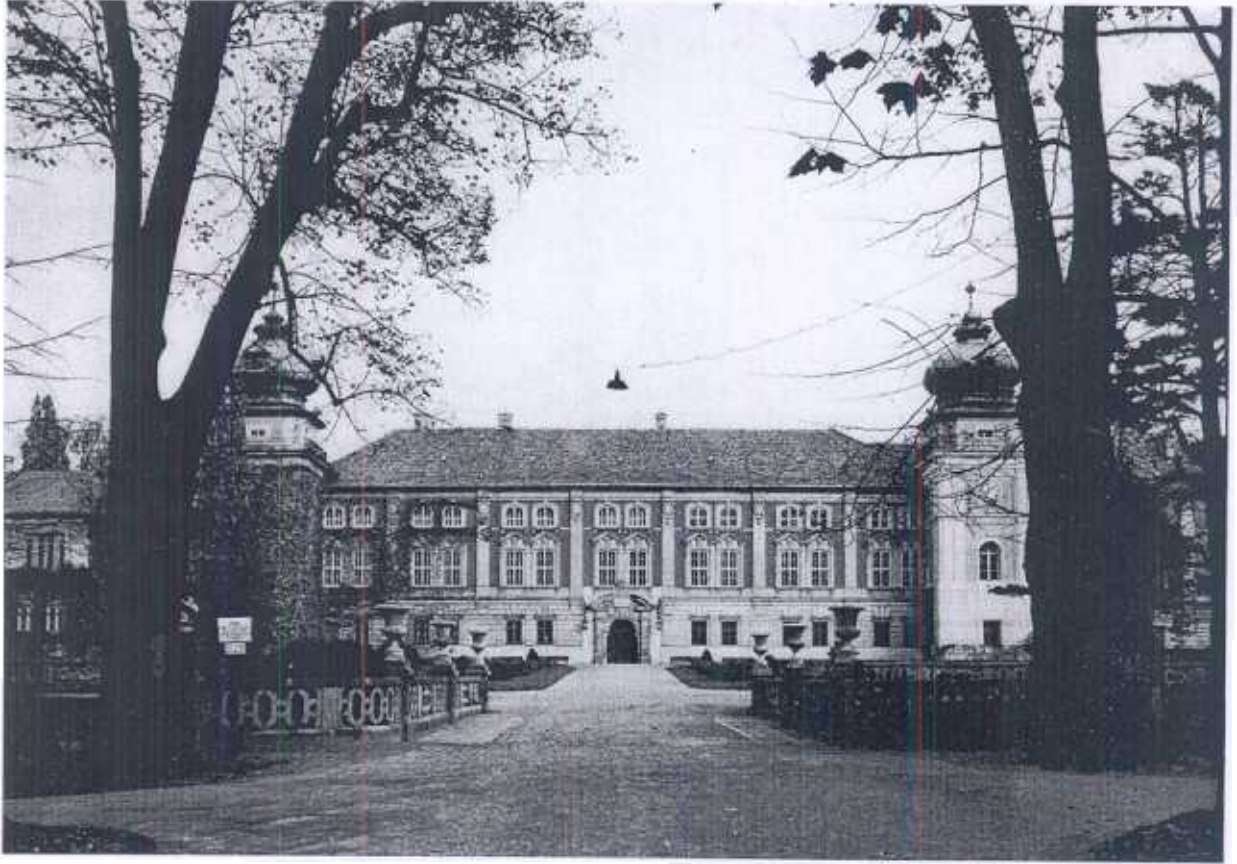
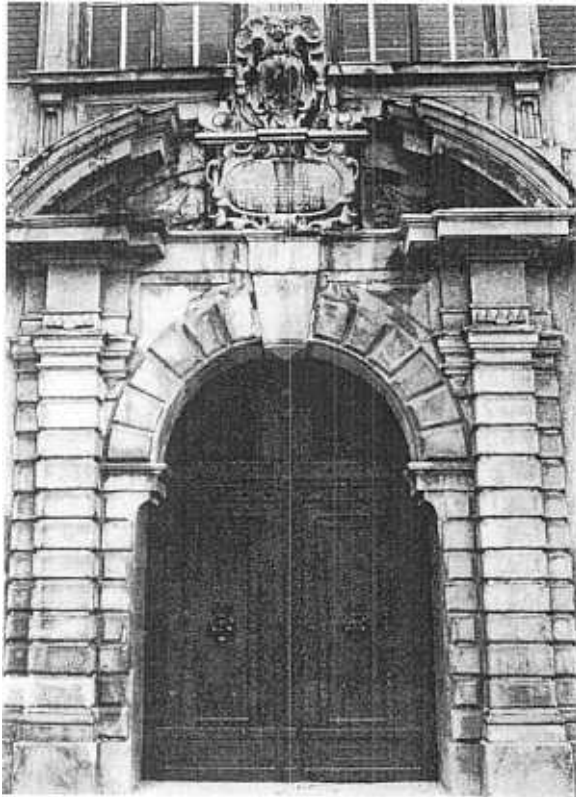


Fig. 7 b. — Le château de Lańcut. Le portail avant conservation.
Fig. 7 c. — Le château de Lańcut. Le portail après conservation.



a

b

c

Fig. 7 d. — Le château de Łańcut. Le portail avant conservation. Détail.

Fig. 7 e. — Le château de Łańcut. La statue de Diane. Aspect général.

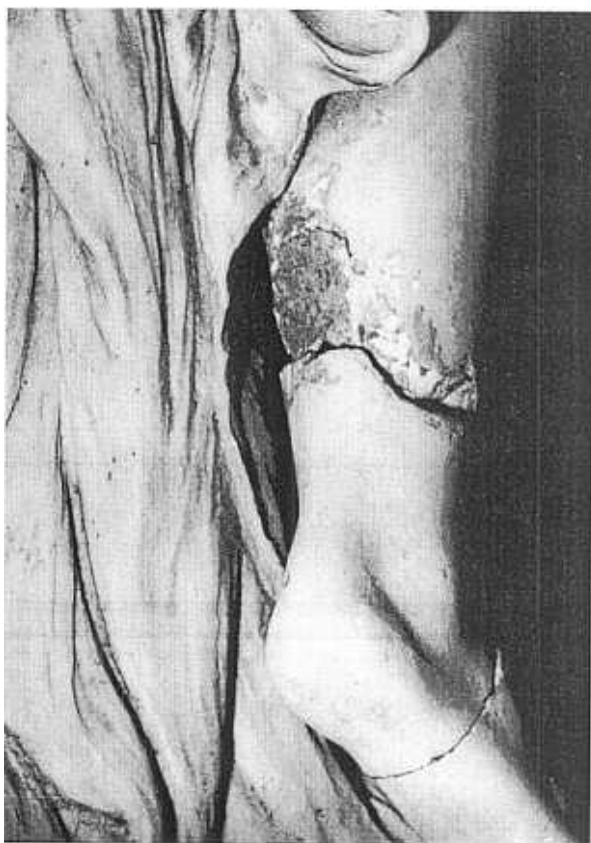
d



Fig. 7 f et g. — Le château de Łańcut. La statue de Diane. Détail avant réparation.

Fig. 7 h. — Le château de Łańcut. La statue de Diane. Détail après réparation au moyen de résine polyester.

g



h

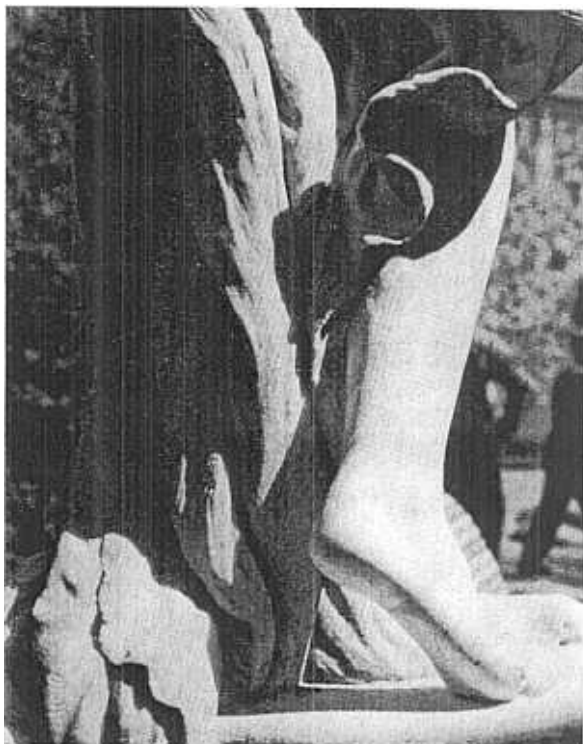




Fig. 7 i. — Le château de Łańcut. Tête de Méduse. Avant conservation.



Fig. 7 j. — Le château de Łańcut. Tête de Méduse. Après conservation.

NOTES

1. Dr. Werner Schade de l'Institut für Denkmalpflege à Berlin a trouvé dans les archives que les pierres de décoration architectonique étaient importées de carrières proches de Bolestawiec en Basse-Silésie.

2. On a examiné, à Poznań : les éléments architectoniques de l'Hôtel de Ville, du Palais Przemysław, du Palais Górka, du Palais Działyński, des maisonnettes de boutiquiers, de la Grande Garde; à Cracovie : les éléments architectoniques de l'église romane St-André, de l'église baroque St-Pierre, de l'église St-Stanislas et les sculptures de l'église Ste-Barbe; à Gdańsk : les Portes Basses, les Portes Royales, la décoration sculptée en pierre de la Chapelle Royale et quelques portails; à Przemysł : les sculptures baroques des églises franciscaines et du carmel, le monument du roi Jean Sobieski, le monument de A. Mickiewicz; à Wrocław : le portail roman d'Ołbin; à Łańcut : les portails du Château et l'ensemble des sculptures en pierre. En outre les ensembles des décorations sculptées et des sculptures en pierre du palais à Rogalin et du Château Gołuchów. Grâce à l'Institut f. Denkmalpflege on a examiné les pierres altérées des sculptures et des décorations architectoniques de l'ancien Musée à Berlin, de l'église Marie-Madeleine à Muehlhausen, de la Cathédrale à Halberstadt et de la Cathédrale à Quedlinburg, de l'église à Salzwedel, de la Cathédrale à Magdeburg, de Châteaux Meissen, Merseburg, Torgau et Karl-Marxstadt, les décorations sculptées en pierre du monastère de Schulpforta et de l'église de Freiberg.

3. En examinant particulièrement l'action des sels dans l'altération on a trouvé deux sortes de salinité : les unes provenant de la pierre elle-même ou de l'influence de l'humidité, les autres étant la conséquence de travaux ou de traitements de conservation.

Le premier groupe compte :

a) L'altération naturelle des constituants de la pierre accompagnée d'efflorescences salines.

b) La pollution atmosphérique produisant des sels comme les sulfates.

c) L'influence de l'eau de mer, de l'eau souterraine et de la végétation.

d) La surchauffe et les fumées produites pendant un incendie. Au deuxième groupe appartiennent :

a) Les imprégnations et les isolations effectuées pour durcir la pierre au moyen de sels solubles ou de matières produisant des sels solubles.

b) Les traitements de conservation qui mettent en œuvre des produits contenant des sels solubles.

On peut aussi distinguer la salinité par identification du sel.

Nous avons rencontré les sels suivants :

a) Les sulfates provenant soit de la désintégration des constituants de la pierre, soit d'efflorescences de substances accumulées dans la pierre par la pollution atmosphérique.

b) Les hydroxydes et les carbonates, surtout de sodium et de potassium, consécutifs à l'application des silicates solubles comme consolidant ou comme isolant, et à l'application d'hydroxyde et de carbonate pour le nettoyage de la pierre.

c) Les chlorures provenant de l'eau de mer, de la décomposition des minerais ou de l'emploi d'antigel.

d) Les nitrates provenant de la putréfaction des substances organiques.

4. La mesure de la variation de température s'opère dans des conditions adiabatiques, et les réactifs étant maintenus à température constante.

Le dispositif comprend un vase Dewar, une capsule qui libère automatiquement l'échantillon examiné et un thermomètre Beckmann. Celui-ci fut remplacé récemment par un thermistor. Les équipements auxiliaires à mentionner sont : une chauffeferette permettant d'évaluer l'évolution de l'effet thermique en fonction de la quantité du courant (I) consommée; un agitateur magnétique et un pont de Wheatstone accouplé à un galvanomètre. Quelques perfectionnements ont automatisé ce dispositif. Moyennant certaines précautions ce microcalorimètre permet d'atteindre une sensibilité ultime de 0,01 calorie dans le domaine de température de 20 à 40° C environ, en réalisant l'homogénéité de la température à $2 \cdot 10^{-3}$ °C près.

5. On obtient la porosité en effectuant le calcul suivant :

$$p = \frac{100 (d-s)}{d}$$

p = porosité; d = densité apparente; s = densité.

La densité apparente fut mesurée dans un dispositif construit d'après Herbst. Ce dispositif comprend une cellule avec carotte contenant l'échantillon, une pompe à vide, et un réservoir à mercure. La cellule peut être détachée et pesée. On détermine les poids : g_1 = poids de la cellule remplie de mercure; g_2 = poids de la cellule + échantillon + mercure et g_3 = poids de l'échantillon. La cellule est soumise à une pression de 18 mm de mercure.

NOTES BIBLIOGRAPHIQUES

1. *Konserwacja zabytków z kamienia naturalnego*. J. LEHMANN, *Biuletyn CZMiOZ*. Ministerstwo Kultury i Sztuki, Nr. 31, Warszawa 1960, / *La conservation des monuments en pierre naturelle*.
2. J. LEHMANN, *Badania i prace nad metodyka konserwacji zabytków etnograficznych i archeologicznych*. / *Les études et les recherches sur la méthode de conservation des monuments ethnographiques et archéologiques* / *Ochrona Zabytków*, XV, / 1962 / No. 1.
3. M. KRANZ et J. LEHMANN, *Badania nad zabezpieczeniem relikwów architektury romańskiej w krypcie pod Katedra w Poznaniu* / *Les recherches sur la conservation des vestiges d'architecture romane dans la crypte de la Cathédrale de Poznań* / *Ochrona Zabytków* XVI / 1963 /, No. 4.
4. J. LEHMANN, *Przykłady zasolenia i odsolenia kamienia* / *Les exemples de la salinité des pierres et les méthodes d'extraction des sels* / *Biblioteka Muzealnictwa i Ochrony Zabytków*, vol. XIX, / 1967 / Warszawa, Ministerstwo Kultury i Sztuki.
5. J. LEHMANN, *L'étude des pierres en Pologne*, Colloques sur l'altération des pierres, ICOMOS, Paris 1968.
6. J. LEHMANN, *Zagadnienie soli rozpuszczalnych w procesie niszczenia i konserwacji zabytków kamiennych*. / *Le problème des sels solubles dans l'altération et dans la conservation des monuments en pierre* / *Ochrona Zabytków* XXII / 1969.
7. J. LEHMANN, M. VUNJAK, *Les sels solubles dans l'eau et les monuments historiques*. Rapport pour la conférence du Comité pour la Conservation de l'ICOM, Amsterdam 1969.
8. J. GILEWICZ, M. KRANZ, J. LEHMANN, *Zywice organiczne w konserwacji kamienia* / *Les résines organiques dans la conservation des pierres* / *Biblioteka Muzealnictwa i Ochrony Zabytków*, vol. XXV, Warszawa 1969, Ministerstwo Kultury i Sztuki.
9. J. LEHMANN, *Konserwacja zabytków kamiennych ...* / *La conservation des objets en pierre* / *Studia Muzealne*, Poznań, 1970.
10. J. LEHMANN, *Damage by accumulation of soluble salts in stonework*. IIC - New York Conference on Conservation of Stone and Wooden Objects, New York 1970.

SUMMARY

Following research in the chemical laboratory of the National Museum at Poznan, a few criteria have been established for determining the degree of weathering suffered by stones and verifying the effectiveness of conservation methods.

The first part of the account published here contains examples of observations, tests and experiments made for the purpose of determining the effects of consolidation work done earlier on. Connections have been observed between symptoms, causes, weathering factors and weathering speeds. A table shows the results of

analysis and physico-chemical tests carried out on five Polish monuments.

The second part of the article describes the results of research on the use of synthetic resins to reinforce stone. The laboratory examinations involved inspection of the resin deposits inside the stones submitted to the treatment, by ultra-violet luminescence through cross-sections. Hydration heat, porosity and hygroscopicity were likewise determined. 7 tables of data give the results of the inspections and the physico-chemical tests.

Fig. 1 a. — Poznan Town Hall. The Fountain. Town Hall built 1948-1955, fountain built 1968. Impregnation with epoxy resin solution.

Fig. 1 b. — Poznan Town Hall. Fragment of facade.

Fig. 1 c. — Poznan Town Hall. Fragment of fountain.

Fig. 1 d. — Poznan Town Hall. Fragment of fountain.

Fig. 1 e. — Poznan Town Hall. Fragment from interior.

Fig. 1 f. — Poznan Town Hall. Painted carved stone doorway.

Fig. 2 a. — Poznan, the Great Armoury. After restoration.

Fig. 2 b. — Poznan, the Great Armoury. Detail.

Fig. 2 c. — Poznan, the Great Armoury. Detail (repaired with polyester resin putties).

Fig. 3 a. — Poznan, Gorka Palace. Courtyard with columns, original state.

Fig. 3 b. — Poznan, Gorka Palace. After reconstruction.

Fig. 3 c. — Poznan, Gorka Palace. Doorway, detail.

Fig. 3 d. — Poznan, Gorka Palace. Details after repair in museum.

Fig. 4 a. — Shopkeepers' houses, Poznan. After reconstruction.

Fig. 4 b. — Shopkeepers' houses, Poznan. During reconstruction.

Fig. 4 c. — Shopkeepers' houses, Poznan. Detail.

Fig. 4 d. — Shopkeepers' houses, Poznan. Detail.

Fig. 5 a. — Gdansk, royal chapel. Points where samples were taken.

Fig. 5 b. — Gdansk, royal chapel. Doorway treated with fluorosilicate around 1930 (photo taken in 1971).

Fig. 5 c. — The Royal Chapel, Gdansk. General appearance during conservation work.

Fig. 5 d. — The Royal Chapel, Gdansk. Detail, during conservation work. Mortars used in several places to fill gaps.

Fig. 5 e. — The Royal Chapel, Gdansk. A section of the doorway before work started.

Fig. 5 f. — The Royal Chapel, Gdansk. A section of the doorway before work started.

Fig. 5 g. — The Royal Chapel, Gdansk. A part of the doorway.

Fig. 5 h. — The Royal Chapel, Gdansk. A part of the facade.

Fig. 6 a. — Gdansk, Fountain of Neptune. Decorative carvings.

Fig. 6 b. — Gdansk, Fountain of Neptune. Sampler.

Fig. 6 c. — Gdansk, Fountain of Neptune. Symptoms of weathering.

Fig. 6 d. — Fountain of Neptune, Gdansk. General appearance.

Fig. 6 e. — Fountain of Neptune, Gdansk. Detail.

Fig. 6 f. — Fountain of Neptune, Gdansk. Detail.

Fig. 6 g. — Fountain of Neptune, Gdansk. Detail.

Fig. 6 h. — Fountain of Neptune, Gdansk. Detail.

Fig. 6 i. — Fountain of Neptune, Gdansk. Detail.

Fig. 6 j. — Fountain of Neptune, Gdansk. Detail.

Fig. 7 a. — Lańcut Castle. General appearance.

Fig. 7 b. — Lańcut Castle. Doorway before work started.

Fig. 7 c. — Lańcut Castle. Doorway, present state.

Fig. 7 d. — Lańcut Castle. Doorway before work started. Detail.

Fig. 7 e. — Lańcut Castle. Statue of Diana, general appearance.

Fig. 7 f and g. — Lańcut Castle. Statue of Diana, detail, before work started.

Fig. 7 h. — Lańcut Castle. Statue of Diana, detail, after repair with polyester resin.

Fig. 7 i. — Lańcut Castle. sculptured head of the Medusa before work started.

Fig. 7 j. — Lańcut Castle. Head of the Medusa, present state.