

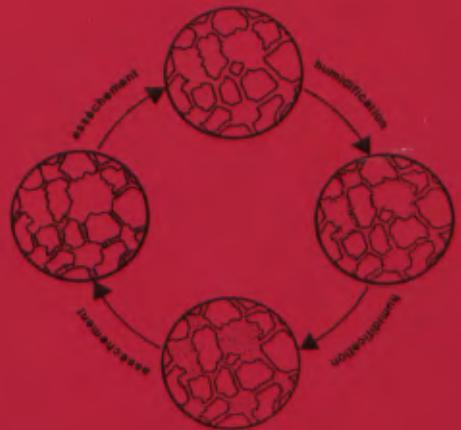


INTERNATIONAL CENTRE FOR THE STUDY OF THE PRESERVATION AND THE RESTORATION OF CULTURAL PROPERTY  
CENTRE INTERNATIONAL D'ETUDES POUR LA CONSERVATION ET LA RESTAURATION DES BIENS CULTURELS

**ICCROM**

# MATERIAUX DE CONSTRUCTION POREUX,

science des matériaux pour la conservation architecturale



Giorgio Torraca





ICCROM TECHNICAL NOTES / NOTES TECHNIQUES DE L'ICCROM

- CARBONNELI, Maurice. Photogrammétrie appliquée aux relevés des monuments et des centres historiques. En cours de préparation.  
Photogrammetry Applied to the Survey of Monuments and Historic Centres. To be published shortly.
- DE ANGELIS d'OSSAT, Guglielmo. Guide to the Methodical Study of Monuments and Causes of Their Deterioration.  
Guida allo studio metodico dei monumenti e delle loro cause di deterioramento. 2nd ed., 1982.
- FORAMITTI, Hans. Mesures de sécurité et d'urgence pour la protection des biens culturels. 1972.
- GALLO, Fausta. Biological Factors in Deterioration of Paper.  
Facteurs biologiques de détérioration du papier. 1985.
- GAZZOLA, Pietro. The Past in the Future. 2nd ed., 1975.
- MARASOVIC, Tomislav. Methodological Proceedings for the Protection and Revitalization of Historic Sites (Experiences of Split). 1975.
- MASSARI, Giovanni. Humidity in Monuments. 2nd ed., 1977.
- MASSCHELEIN-KLEINER, Liliane. Ancient Binding Media, Varnishes and Adhesives. 1985.
- STAMBOLOV, T. - VAN ASPEREN DE BOER, J.R.J. The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments. 1976.
- TORRACA, Giorgio. Porous Building Materials. 2nd ed. rev., 1982.
- Solubilidad y Disolventes en los Problemas de Conservación. 1981.
- Solubilité et solvants utilisés pour la conservation des biens culturels. 1980.
- Solubility and Solvents for Conservation Problems. 1975. 3rd ed. rev., 1984.

# MATERIAUX DE CONSTRUCTION POREUX,

science des matériaux pour la conservation architecturale

Giorgio Torraca

Traduction de l'original anglais  
par Colette di Matteo



**ICCROM**

Rome 1986

# MATERIAUX DE CONSTRUCTION POREUX

ISBN 92-9077-071-6

© 1986 ICCROM

Via di San Michele 13

00153 Rome RM, Italy

Printed in Italy

Sintesi Grafica s.r.l.



## TABLE DES MATIERES

	Page
INTRODUCTION	ix
CHAPITRE I - MOUVEMENTS DE L'EAU DANS LES SOLIDES POREUX	1
1.1. Surfaces hydrophiles	1
1.2. Distribution de l'eau dans les pores hydrophiles	6
1.3. Déplacement de l'eau à l'état liquide	11
1.4. Déplacement de l'eau à l'état vapeur	12
1.5. Montée capillaire dans les maçonneries poreuses	15
1.6. Surfaces hydrophobes	16
CHAPITRE II - DETERIORATION DES MATERIAUX POREUX	
CONTRAINTES MECANQUES	19
2.1. Comportement sous contrainte et déformation des matériaux fragiles	19
2.2. Contraintes externes	24
2.3. Contraintes internes	31
CHAPITRE III - DETERIORATION DES MATERIAUX POREUX	
REACTIONS CHIMIQUES. CORROSION	39
3.1. Attaque par l'eau de pluie	39
3.2. Attaque dans une atmosphère polluée	40
3.3. Cycles d'humidification-assèchement	42
3.4. Climatologie de la pollution atmosphérique	44
CHAPITRE IV - BIODETERIORATION DES MATERIAUX POREUX	49
4.1. Bactéries et champignons	49
4.2. Algues	50
4.3. Lichens	50
4.4. Mousse	51
4.5. Plantes supérieures	51
CHAPITRE V - VIBRATIONS	53
5.1. Introduction	53
5.2. Définitions et mesures	54
5.3. Fréquence naturelle et résonance des édifices	56
5.4. Amplitude	57

5.5.	Vitesse de pointe	57
5.6.	Accélération	59
5.7.	Vibrations dues au trafic et leurs effets sur les constructions	59
5.8.	Bangs supersoniques	63
CHAPITRE VI - LIANTS		65
6.1.	Plâtre	65
6.2.	Chaux	67
6.3.	Mortiers hydrauliques	71
6.4.	Ciment Portland	75
6.5.	Béton moderne	78
6.6.	Défauts du ciment Portland	79
6.7.	Mortiers chaux-ciment et autres mélanges	80
6.8.	Altération du béton et du béton armé	81
CHAPITRE VII - CONSERVATION DE LA PIERRE		83
7.1.	Diagnostic	83
7.2.	Nettoyage	84
7.3.	Consolidation	87
7.4.	Protection	93
CHAPITRE VIII - ARGILE, BRIQUE CRUE, BRIQUE CUITE		97
8.1.	Minéraux argileux	97
8.2.	Terre	99
8.3.	La terre comme matériau de construction	100
8.4.	Détérioration des structures de brique crue	102
8.5.	Protection des murs de brique crue	103
8.6.	Brique cuite - Terre cuite - Porcelaine	106
CHAPITRE IX - DETERIORATION ET CONSERVATION DES MAÇONNERIES		109
9.1.	L'humidité dans les maçonneries	109
9.2.	Sels solubles dans les maçonneries	110
9.3.	Les enduits comme couche de protection sacrificielle	111
9.4.	Assèchement des maçonneries	112
9.5.	Méthodes incorrectes dans la restauration des maçonneries	118
9.6.	Traitement hydrofuge de solides hydrophiles	119

CHAPITRE X - RESINES SYNTHETIQUES	123
10.1. Résines thermoplastiques	123
10.2. Résines thermodurcissables	129
10.3. Vieillissement des résines synthétiques	131

CHAPITRE XI - SILICATES ET SILICONES	133
11.1. Silice et silicates	133
11.2. Silicones	136
11.3. Effet hydrofuge des silicones	137

BIBLIOGRAPHIE TECHNIQUE	141
-------------------------	-----

TABLEAUX

I	38
II	60
III	74

FIGURES

1	2
2	3
3	5
4	10
5	20
6	36
7	43
8	68
9	113
10	116



## INTRODUCTION

La brique, les mortiers et la pierre poreuse subissent une détérioration lorsqu'ils sont exposés aux agressions de l'environnement. La vitesse et les symptômes de détérioration sont déterminés par l'action d'un ou de plusieurs facteurs combinés, dépendant d'une part de la nature du matériau, d'autre part des caractéristiques de l'environnement et agissant séparément ou conjointement, selon des combinaisons diverses.

En conséquence, vitesse et symptômes de détérioration montrent des variations considérables, et il n'est pas facile de mettre en évidence des relations de cause à effet. Si on parvient toutefois, à arranger dans un schéma général les données provenant de diverses disciplines scientifiques et techniques, le modèle théorique ainsi obtenu pourra fournir une première interprétation des processus de détérioration et, à partir d'une telle interprétation, l'élaboration d'une politique de conservation. Grâce à l'application pratique, les faiblesses de la théorie pourront être mises en évidence et il sera ainsi possible d'affiner progressivement le schéma directeur.

La présente brochure est un essai de récapitulation des données disponibles aujourd'hui. Elle les expose en termes descriptifs en excluant les formules et en évitant toute discussion spécialisée des détails techniques.

Ce travail a un double but: d'une part, stimuler les spécialistes des différentes matières concernées, pour les aider à comprendre la position de leur domaine vis-à-vis des autres et les inciter à la critique; d'autre part, permettre aux responsables de la conservation d'apprécier la portée pratique de la théorie et de tenter d'en faire une application.

A court terme, l'objectif de ce livre est de fournir les bases d'un bref cours sur la technologie des matériaux de construction, à inclure dans un enseignement plus général de la conservation architecturale, comme celui qui est dispensé actuellement par l'ICCROM et la Faculté d'Architecture de l'Université de Rome.

Schématiquement, la détérioration est ici présentée comme dérivant de l'action conjointe de processus chimiques (corrosion) et de contraintes mécaniques. Pour les matériaux poreux, par "contraintes mécaniques" on entend non seulement les contraintes imposées au matériau par le milieu extérieur (contraintes externes) mais aussi les contraintes apparaissant à l'intérieur du matériau dans certaines situations (contraintes internes).

On peut donc définir dans son ensemble le phénomène de détérioration des matériaux poreux comme un type particulier de corrosion sous contrainte, dans lequel à la fois contraintes externes et internes se combinent aux processus chimiques.

L'eau entre en jeu non seulement dans toute réaction chimique mais aussi dans la création des contraintes internes. C'est pourquoi on a choisi de commencer l'exposé des processus de détérioration par la description des mouvements de l'eau à l'intérieur des corps poreux (chapitre 1) avant de passer à la discussion des contraintes mécaniques externes et internes (chapitre 2) et de la corrosion chimique (chapitre 3). Les facteurs biologiques font l'objet du chapitre 4, tandis que l'action des vibrations mécaniques, en tant que cause supplémentaire de détérioration des structures, est étudiée au chapitre 5. Les problèmes concernant plus particulièrement certains matériaux comme la brique crue (chapitre 6), les mortiers (chapitre 7), la pierre (chapitre 8) et la maçonnerie en général (chapitre 9) sont exposés dans la seconde partie de l'ouvrage. Suit une brève revue de quelques matériaux utilisés en restauration, tels que les résines synthétiques (chapitre 10), les silicates et les silicones (chapitre 11).

MOUVEMENTS DE L'EAU DANS LES SOLIDES POREUX

1.1. SURFACES HYDROPHILES

Les briques, les pierres et les mortiers sont constitués de cristaux de carbonates, silicates, aluminates ou oxydes. Des silicates vitreux (c'est-à-dire non cristallisés) peuvent aussi être présents.

La surface de ces cristaux ou de ces verres est riche en atomes d'oxygène porteurs de charges électriques négatives. Ceci parce que l'oxygène étant l'élément le plus électronégatif (c'est-à-dire attirant les électrons), lorsqu'il forme des liaisons par mise en commun d'électrons avec d'autres atomes (carbone, silicium, aluminium ...), il tend à attirer vers lui le couple d'électrons mis en commun.

Souvent, l'oxygène superficiel est lié d'un côté à un atome d'hydrogène et forme ainsi un groupe -O-H, appelé groupe hydroxyle. Ce groupe porte des charges (ou pôles) électriques: négative sur l'oxygène et positive sur l'hydrogène, car l'oxygène est aussi plus électronégatif que l'hydrogène.

Les surfaces qui présentent des pôles électriques dus aux atomes d'oxygène ou aux groupe hydroxyles sont dites polaires. On les appelle aussi "hydrophiles" (du grec: qui aiment l'eau) parce qu'elles attirent les molécules d'eau.

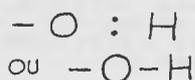
La force d'attraction électrique (ou champ électrique) créée par l'atome d'hydrogène, dans la direction opposée à celle de sa liaison avec l'oxygène, provoque l'attraction de molécules d'eau par les groupes hydroxyles, ou de molécules d'eau par d'autres molécules d'eau. Cette attraction est appelée liaison, parce qu'elle est orientée dans une direction particulière, et reçoit le nom de liaison hydrogène. La formation de la liaison hydrogène et l'attraction des molécules d'eau sont représentées sur les figures 1 et 2. Chaque atome d'oxygène peut former deux liaisons hydrogène, en plus des deux liaisons chimiques qu'il forme normalement. Les quatre liaisons forment un tétraèdre autour de l'oxygène. Chaque atome d'hydrogène ne peut former qu'une liaison hydrogène, dans la direction opposée à celle de la liaison chimique.

La liaison hydrogène est au moins dix fois plus faible qu'une liaison chimique ordinaire; elle est toutefois assez forte pour qu'une quantité d'énergie appréciable soit nécessaire pour la briser. Cette énergie est d'environ 60.000 joules par 18 grammes d'eau, chaque molécule d'eau formant deux liaisons hydrogène. Ce chiffre correspond à 1 watt-heure par gramme d'eau.

## FIGURE 1. LA LIAISON HYDROGÈNE



1. LES ATOMES D'HYDROGÈNE ET D'OXYGÈNE SE RAPPROCHENT L'UN DE L'AUTRE



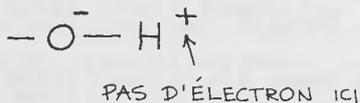
2. L'OXYGÈNE ET L'HYDROGÈNE FORMENT UNE LIAISON COVALENTE. DEUX ÉLECTRONS SONT MIS EN COMMUN



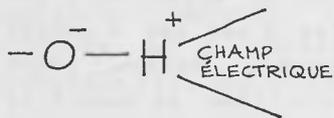
3. LES ÉLECTRONS MIS EN COMMUN SONT ATTIRÉS PAR L'OXYGÈNE PLUS QUE PAR L'HYDROGÈNE



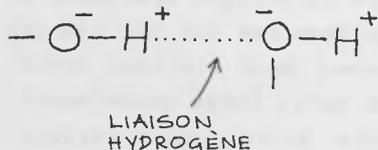
4. UNE CHARGE NÉGATIVE APPARAÎT SUR L'OXYGÈNE ET UNE CHARGE POSITIVE SUR L'HYDROGÈNE



5. COMME L'ATOME D'HYDROGÈNE NE POSSÈDE QU'UN ÉLECTRON, LE CÔTÉ LE PLUS ÉLOIGNÉ DE L'OXYGÈNE EST LIBRE D'ÉLECTRONS (SANS ÉCRAN ÉLECTRIQUE)

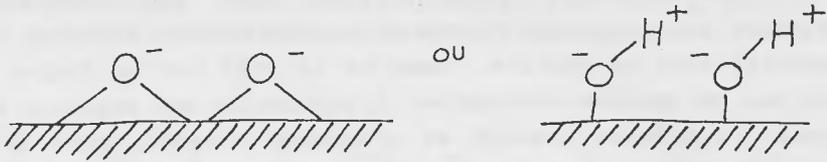


6. CECI DONNE LIEU À UNE FORTE ATTRACTION POUR LES CHARGES NÉGATIVES DANS CETTE RÉGION

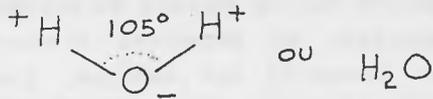


7. UNE LIAISON HYDROGÈNE SE FORME AVEC UN AUTRE GROUP HYDROXYLE

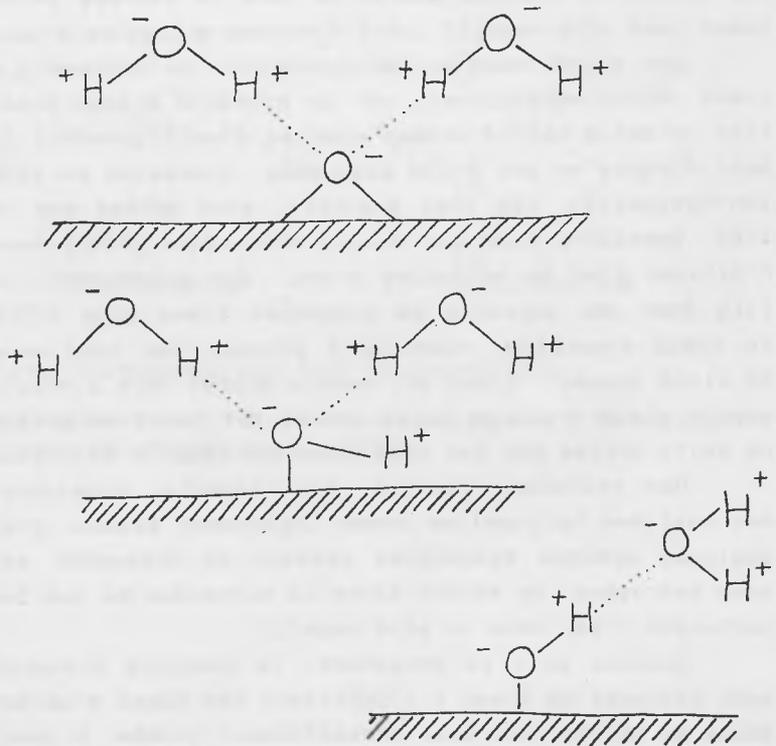
FIGURE 2. LA SURFACE HYDROPHILE



LA MOLÉCULE D'EAU



ATTRACTION DE L'EAU PAR UNE SURFACE HYDROPHILE



Les molécules d'eau attirées vers (ou adsorbées à) la surface par un atome d'oxygène ont tendance à orienter leur côté positif vers la surface, comme on le voit sur la figure 2. Dans le cas de groupes hydroxyles, l'attraction est possible à la fois vers l'hydrogène positif et l'oxygène négatif, mais le lien du côté positif de la molécule d'eau prévaut, même dans ce cas, parce que l'oxygène peut former deux liaisons hydrogène, alors que l'hydrogène ne peut en former qu'une.

Dans de telles conditions, une sorte de double couche électrique est formée, avec une couche positive dans l'eau adsorbée, et une couche négative sur la surface du solide.

Si l'on applique un potentiel électrique à un matériau hydrophile poreux lorsqu'il est mouillé, l'eau a tendance à se déplacer vers l'électrode négative. Des quantités mesurables de liquide peuvent ainsi migrer.

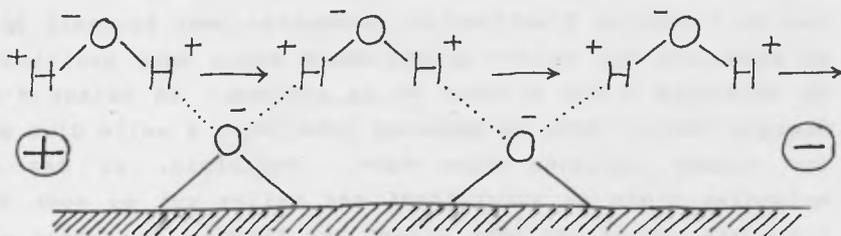
Il n'est pas certain que la double couche elle-même, c'est-à-dire les molécules d'eau adsorbées, puisse se déplacer vers l'électrode négative car, s'il est vrai que ces molécules exposent une couche de charges positives vers la surface solide, elles ont aussi leur côté négatif lié à d'autres molécules d'eau.

Une autre théorie explique aussi le mouvement électrique de l'eau (électrocinétique), par la présence d'ions positifs et négatifs (c'est-à-dire d'atomes chargés électriquement) formés par les sels dissous ou par l'eau elle-même, dissociée en ion hydrogène et ion hydroxyle. Les ions positifs, plus petits que les ions négatifs, possèdent donc une charge électrique plus concentrée capable d'attirer plus de molécules d'eau. Par conséquent, les ions positifs sont des porteurs de molécules d'eau plus efficaces lorsque le champ électrique commence à pousser les ions vers l'électrode de signe opposé. L'eau qui semble migrer vers l'électrode négative serait alors l'eau en excès portée par les ions positifs au-dessus de celle portée par les ions négatifs dans la direction contraire.

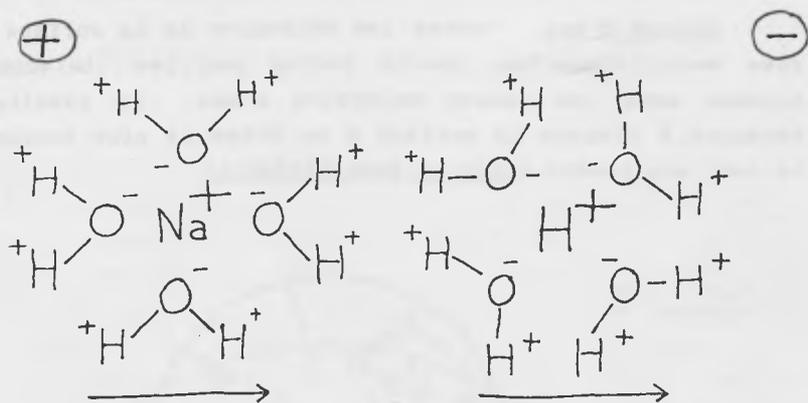
Une troisième théorie, plus récente, considère la majorité des surfaces hydrophiles comme légèrement acides, c'est-à-dire que quelques groupes hydroxyles peuvent se dissocier en formant des ions hydrogène; ce serait alors la migration de ces ions qui transporterait l'eau vers le pôle négatif.

Quelque soit le mécanisme, la quantité d'énergie nécessaire pour déplacer de l'eau à l'intérieur des pores d'un matériau hydrophile ne devrait pas être excessivement grande, à condition que les

FIGURE 3. HYPOTHÈSE DÉCRIVANT LE DÉPLACEMENT DE LA DOUBLE COUCHE D'EAU DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE



DÉPLACEMENT DES IONS POSITIFS DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE



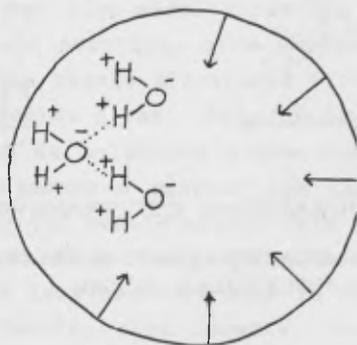
L'EAU D'HYDRATATION EST TRANSPORTÉE

LES IONS NEGATIFS SONT PLUS GROS ET TRANSPORTENT MOINS DE MOLECULES D'EAU

molécules d'eau déplacées soient substituées par de nouvelles molécules. Dans ce cas, deux nouvelles liaisons hydrogène sont formées immédiatement et restituent l'énergie qui a permis de briser les deux premières liaisons. Le mouvement n'aurait besoin que de l'énergie d'activation nécessaire pour franchir la barrière de potentiel qui existe probablement entre deux positions stables de molécules d'eau proches de la surface. La valeur d'une telle énergie devrait être de beaucoup inférieure à celle d'un watt-heure par gramme indiquée plus haut. Toutefois, si des nouvelles molécules d'eau ne substituent pas celles qui se sont déplacées, l'énergie nécessaire pour briser les liaisons hydrogène est effectivement requise dans sa totalité pour assurer le mouvement.

## 1.2. DISTRIBUTION DE L'EAU DANS LES PORES HYDROPHILES

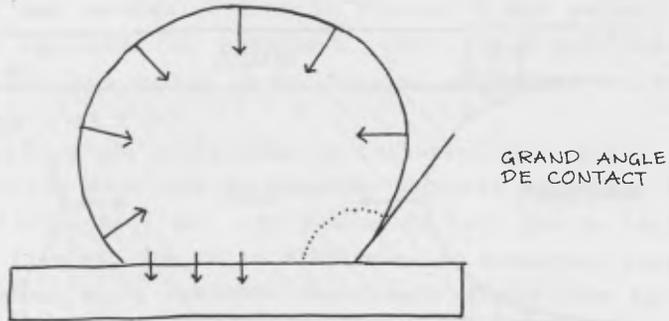
Goutte d'eau. Toutes les molécules de la surface sont attirées vers l'intérieur de la goutte par les liaisons hydrogène formées avec les autres molécules d'eau. Le résultat est une tendance à réduire la surface à sa forme la plus économique, dans ce cas, une sphère (tension superficielle).



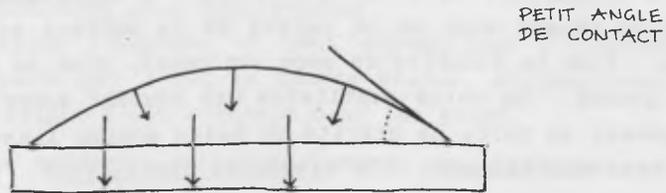
GOUTTE D'EAU

Goutte d'eau à la surface d'un solide hydrophile. La forme de la goutte est déterminée par la force d'attraction des molécules d'eau vers la surface solide. La mesure de l'angle de contact permet l'évaluation de ces forces. Dans les liquides polaires, comme l'eau, un angle de contact grand (c'est-à-dire une goutte

assez haute) indique que la force d'attraction de l'eau vers le solide est faible. Inversement un angle de contact petit (c'est-à-dire une goutte aplatie) indique une grande force d'attraction.



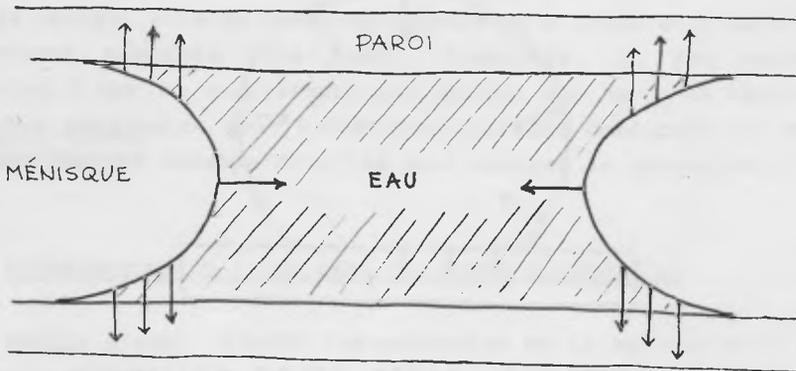
FAIBLE ATTRACTION ENTRE SOLIDE ET LIQUIDE



FORTE ATTRACTION ENTRE SOLIDE ET LIQUIDE

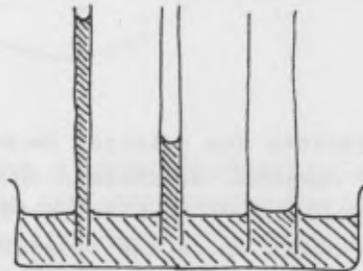
Les liquides non polaires forment toujours de petits angles de contact (gouttes aplaties), non pas à cause de la forte attraction vers la surface du solide, mais à cause de la faible attraction interne entre les molécules du liquide (faible tension superficielle).

Eau à l'intérieur d'un solide poreux hydrophile. La forme typique, en ménisque, de la surface de l'eau à l'intérieur des petits pores est déterminée par l'attraction vers les parois des pores. Le centre de la surface de l'eau est tiré vers l'intérieur (du liquide) par l'attraction des autres molécules d'eau.



Succion capillaire. Les très petits pores sont appelés pores capillaires (du latin : aussi fin que des cheveux). L'eau y est attirée si l'attraction vers les parois des pores est plus forte que l'attraction de l'eau par l'eau. L'amplitude de la force de succion dépend donc de la nature de la surface et du diamètre du pore. Plus le diamètre du pore est petit, plus la force de succion est grande. La force capillaire est souvent assez importante pour compenser la force de gravité et faire monter l'eau dans les pores qui sont suffisamment fins (remontée capillaire).

REMONTÉE  
CAPILLAIRE



Si la succion d'eau n'est pas contrebalancée par d'autres mécanismes comme l'évaporation, la remontée peut atteindre, en dépit de l'action de la force de gravité, une hauteur de plusieurs mètres dans des maçonneries poreuses.

La remontée capillaire est donc un phénomène spontané dû à l'attraction de l'eau par liaison hydrogène vers certaines surfaces. Il n'est pas nécessaire d'avoir recours à des potentiels électriques pour expliquer ce phénomène, bien que l'application d'un potentiel électrique puisse le modifier en provoquant d'autres mouvements des molécules d'eau.

Il a été dit qu'une différence de potentiel par rapport au sol peut être mesurée dans des maçonneries poreuses affectées par la remontée capillaire de l'eau. En dehors du fait que de telles mesures sont peu fiables, une telle différence de potentiel aurait tendance à s'opposer à la remontée capillaire plutôt que de la favoriser, selon le principe de Le Chatelier.

Répartition de l'eau dans un solide poreux hydrophile. Si la quantité d'eau contenue dans les pores d'un solide n'est pas suffisante pour qu'elle les remplisse complètement, l'eau se répartit de façon à atteindre l'état d'énergie le plus bas possible. C'est l'état dans lequel la meilleure exploitation des forces d'attraction peut avoir lieu, sauf pour l'effet de la chaleur, qui favorise les dispositions plus désordonnées.

Pour simplifier l'exposé, on peut schématiser l'occupation progressive des pores par l'eau en quatre stades, correspondant à une quantité croissante d'eau contenue dans les pores.

Stade I Le matériau est complètement sec, tous les pores sont vides.

Stade II Seuls les plus petits pores (capillaires) sont remplis. Les parois des gros pores restent sèches. L'éventualité d'une telle répartition est basée sur l'hypothèse suivante: en dessous d'un diamètre donné les pores ont tendance à se remplir complètement, quitte à laisser sèches les parois voisines des pores plus larges.

Stade III Les capillaires sont pleins et les parois des gros pores sont recouvertes d'un film d'eau.

Stade IV Les capillaires et les gros pores sont pleins.

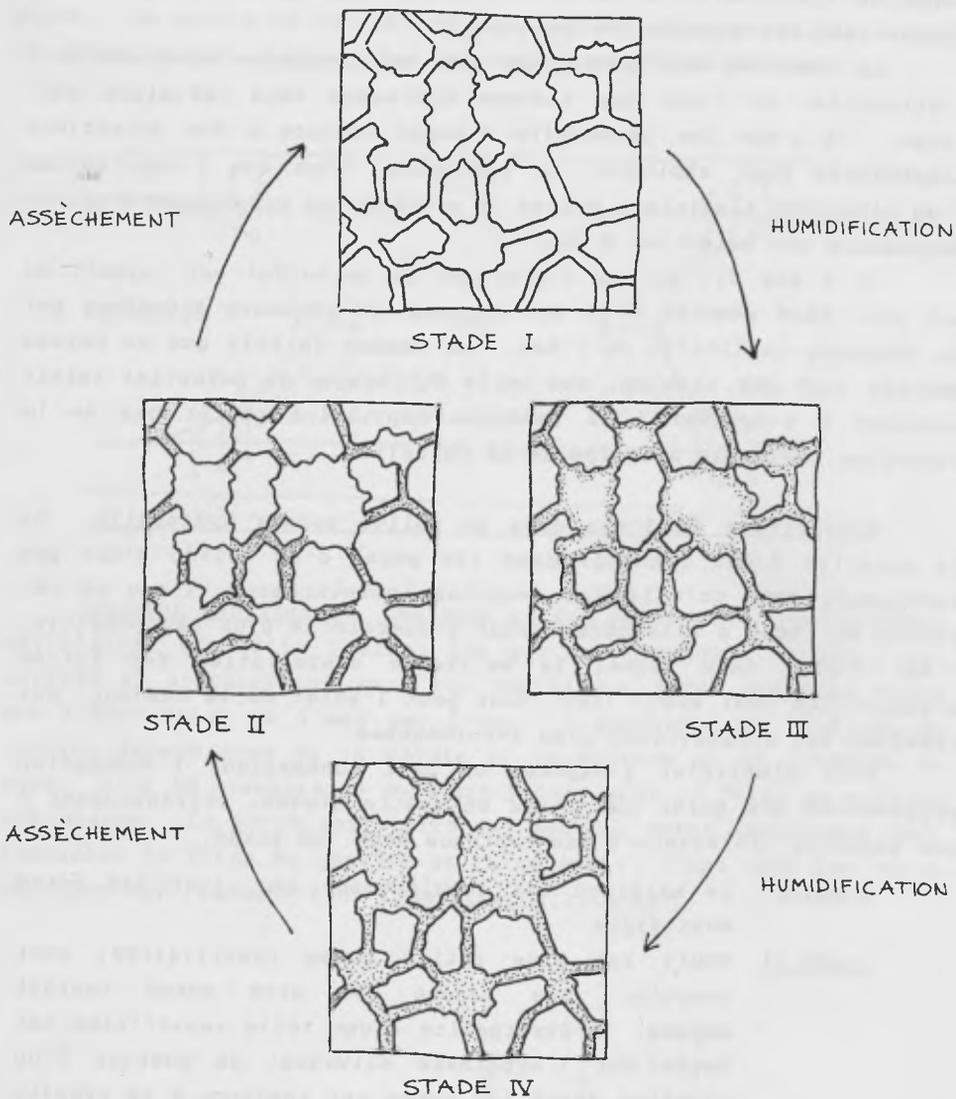


FIGURE 4. DISTRIBUTION DE L'EAU À L'INTÉRIEUR D'UN CORPS POREUX HYDROPHYLE

Des stades intermédiaires sont évidemment possibles.

Les quatre stades sont schématiquement représentés sur la figure 4.

On observe le stade III surtout au cours de l'humidification, et le stade II au cours de l'assèchement.

Toute quantité d'eau supérieure à celle correspondant au stade III devrait permettre le transfert d'eau en phase liquide. Le stade III pourrait donc être considéré comme la "teneur critique en eau", notion décrite par Vos et autres auteurs.

La teneur critique en eau devrait dépendre de la nature du matériau et de la géométrie de son système poreux (en particulier, du nombre de petits pores). Cependant, la présence de sels solubles devrait augmenter considérablement la teneur critique en eau, en raison de l'hydratation et de l'hygroscopicité des ions de sels (voir ci-contre).

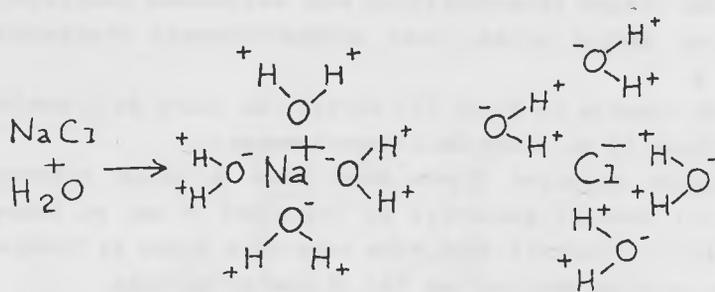
### 1.3. DEPLACEMENT DE L'EAU A L'ETAT LIQUIDE

Plusieurs types de forces peuvent provoquer le mouvement d'eau liquide dans un solide poreux.

a. Succion. Déplacement de l'eau d'une zone où la quantité d'eau est supérieure au stade III (c'est-à-dire les capillaires pleins et la surface des gros pores mouillée) vers une zone où la quantité est inférieure au stade III. Pour donner un exemple, considérons l'humidification d'un solide sec: l'eau s'introduit dans la partie du solide en contact avec un matériau mouillé, et se déplace ensuite vers les zones plus sèches.

b. Diffusion. Elle se produit dans le cas où la quantité d'eau est supérieure au stade III. L'eau se déplace de la zone la plus humide vers la zone la moins humide.

c. Osmose. Les sels solubles dissous dans l'eau se dissocient en ions, c'est-à-dire en atomes porteurs de charges électriques. Tous les ions attirent des molécules d'eau par des forces électriques (hydratation des ions). En conséquence, l'eau se déplace des zones à faible teneur en ions (basse concentration saline) aux zones à forte teneur (haute concentration saline).



### HYDRATATION DES IONS

d. Electrocinétique. Comme on l'a vu précédemment, dans un corps poreux soumis à un champ électrique l'eau migre vers le pôle négatif. Si des ions formés par des sels solubles sont présents, ils migrent vers le pôle dont la charge électrique est opposée à la leur en entraînant l'eau d'hydratation (électro-osmose).

e. Chaleur. Dans un solide poreux mouillé, l'eau se déplace de la zone chaude vers la zone plus froide.

Alors que le mécanisme de succion (a) implique l'existence de zones mouillées et de zones sèches, tous les autres phénomènes décrits ci-dessus, relatifs au transfert d'eau liquide, sont fondés sur la présence d'un film continu d'eau, à travers lequel les molécules d'eau sont transportées. C'est pourquoi les mécanismes de diffusion (b), osmose (c), électrocinétique et électro-osmose (d), chaleur (e), ne peuvent se produire que lorsque la quantité d'eau est supérieure à celle requise pour remplir les capillaires et tapisser la surface des gros pores (stade III ou teneur critique en eau).

#### 1.4. DEPLACEMENT DE L'EAU A L'ETAT VAPEUR

##### a. Condensation et adsorption

Les molécules d'eau peuvent être transportées à l'état gazeux vers la surface d'un solide poreux et pénétrer à l'intérieur de ce dernier.

Condensation. Quand la température d'une surface est inférieure au point de rosée de l'air ambiant, les molécules d'eau contenues dans l'air (vapeur d'eau) se soudent entre elles et forment un film d'eau liquide sur la surface. L'eau liquide peut alors se déplacer selon l'un des mécanismes décrits ci-dessus.

Condensation intersticielle. La température de la surface d'un corps poreux peut être au dessus du point de rosée de l'air environnant, mais elle peut être plus basse à l'intérieur. Dans ce cas, la condensation des molécules d'eau se produit à l'intérieur des pores du matériau.

Diffusion de vapeur. Dans un solide partiellement sec (teneur en eau inférieure à celle du stade III), l'eau peut être transportée des régions où il y a beaucoup de molécules d'eau dans l'air (c'est-à-dire tension de vapeur élevée) vers les régions où il y a moins de molécules d'eau dans l'air (c'est-à-dire tension de vapeur basse). Ceci peut se traduire par l'évaporation d'eau dans un pore suivie de la condensation dans un autre. Un tel déplacement peut se produire quand le transfert du liquide n'est pas possible, mais il est moins efficace.

Hygroscopie. Les surfaces hydrophiles des pores peuvent attirer des molécules d'eau qui sont alors adsorbées sur la surface, même si la température de la surface est supérieure à celle du point de rosée de l'air.

L'adsorption hygroscopique est possible quand l'humidité relative de l'air est au-dessus d'une valeur limite dépendant de la nature du matériau mais aussi du diamètre des pores. Les petits pores favorisent l'adsorption hygroscopique et peuvent se remplir complètement d'eau même si l'humidité relative est inférieure à 100%. Les sels solubles sont particulièrement hygroscopiques et peuvent adsorber des quantités d'eau considérables à une humidité relative elle aussi inférieure à 100%; par exemple le chlorure de sodium adsorbe l'eau de l'air si l'humidité relative est supérieure à 75%.

Par conséquent, même si un matériaux poreux hydrophile n'entre pas en contact avec de l'eau à l'état liquide, son contenu en eau peut augmenter par condensation ou adsorption d'eau à l'état de vapeur.

#### b. Evaporation et désorption

En raison de la force d'attraction qui existe entre les surfaces hydrophiles et les molécules d'eau, il est beaucoup plus facile de faire entrer de l'eau dans des pores hydrophiles que de la faire sortir.

Evaporation. L'évaporation des films d'eau liquide sur la surface des corps poreux se produit, en principe, dans le cas où l'air en contact avec la surface a une humidité relative inférieure à 100%; en réalité, toutefois, le phénomène s'accomplit efficacement à des taux d'humidité bien moindres ou si l'air est constamment en mouvement, emportant les molécules d'eau dès qu'elles passent à l'état vapeur. A l'intérieur des pores, le manque de circulation d'air provoque rapidement une saturation (100% d'humidité relative); on voit donc que la seule surface sur laquelle l'évaporation peut être vraiment efficace est la surface extérieure.

L'eau doit arriver en permanence à la surface afin que l'évaporation ait lieu à une vitesse satisfaisante. Cependant, quand la quantité d'eau à l'état liquide décroît à l'intérieur du solide et atteint un niveau inférieur à la teneur critique en eau (distribution au stade III), le transfert d'eau à l'état liquide vers la surface n'est plus possible et seul subsiste le mécanisme par diffusion de vapeur, qui est moins efficace. La vitesse de séchage diminue à ce stade alors que de considérables quantités d'eau peuvent encore subsister dans le matériau.

L'assèchement complet du matériau est alors très difficile à effectuer.

Désorption. La désorption de l'eau adsorbée est aussi possible quand les matériaux sont en contact avec un air dont l'humidité relative est basse; la circulation d'air favorise, dans ce cas aussi l'extraction de l'eau. Toutefois, un phénomène d'hystérésis, rend la désorption plus difficile que ne le laisseraient supposer les données de l'adsorption. Ceci veut dire que la désorption se produira toujours à une humidité relative inférieure à celle à laquelle l'adsorption peut se produire; par exemple, le chlorure de sodium peut adsorber l'eau à partir de 75% d'humidité relative mais ne commence à la restituer qu'en dessous de 70%.

Le fait que la succion et l'adsorption soient faciles alors que l'assèchement et la désorption sont difficiles permet de supposer que la condition naturelle d'un matériau poreux hydrophile, dans un climat tempéré, est relativement humide, peut-être proche du stade III de notre classification. En d'autres termes, une fois qu'un tel matériau a pris de l'eau de son environnement, il peut être très difficile de l'assécher jusqu'à atteindre un taux inférieur au stade III, étant donné que cela demanderait beaucoup d'énergie et de temps. En outre, à moins que les mesures adéquates soient prises, le matériau asséché, laissé à lui-même, retrouverait plus ou moins vite la quantité d'eau qui le met en équilibre avec le milieu ambiant.

#### 1.5. MONTEE CAPILLAIRE DANS LES MACONNERIES POREUSES

Si les fondations des constructions ne sont pas isolées du sol humide, l'eau s'introduit dans la structure par le mécanisme de succion. La hauteur que l'eau peut en fait atteindre dans une structure dépend principalement de l'équilibre entre l'admission d'eau et l'évaporation à partir des surfaces des murs. Quand l'admission d'eau et l'évaporation sont équivalentes, la montée devrait s'arrêter.

Comme l'admission d'eau dépend aussi de l'épaisseur du mur, plus les murs sont épais, plus l'eau monte haut. L'influence de la force de gravité s'opposant à la montée semble être négligeable par rapport à l'effet de l'évaporation. La circulation d'air près de la surface accélère l'évaporation et provoque une réduction du niveau d'humidité.

A la longue, les sels solubles jouent un rôle eux aussi dans le phénomène de montée capillaire, parce qu'ils s'accumulent dans la maçonnerie sur les surfaces d'évaporation. En plus des détériorations que provoque leur cristallisation, les sels attirent l'eau par osmose et peuvent provoquer une montée supplémentaire du niveau de l'eau. Comme l'accumulation des sels ne s'arrête jamais, il est probable qu'aucun niveau d'équilibre ne soit jamais atteint; si d'autres facteurs n'interviennent pas, la hauteur de la montée devrait s'accroître avec l'âge du mur.

## 1.6. SURFACES HYDROPHOBES

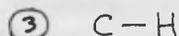
Plusieurs matières organiques telles les huiles minérales, le bitume, les corps gras et de nombreuses résines synthétiques et naturelles, sont principalement composés d'atomes de carbone et d'hydrogène. Comme le carbone et l'hydrogène ont des électro-négativités très voisines, les électrons mis en commun pour former la liaison carbone-hydrogène sont répartis symétriquement entre les deux atomes et il ne se forme pas de pôle électrique. Il en va de même pour la liaison carbone-carbone.



LE CARBONE  
S'APPROCHE DE  
L'HYDROGÈNE



DEUX ÉLECTRONS  
SONT MIS EN  
COMMUN

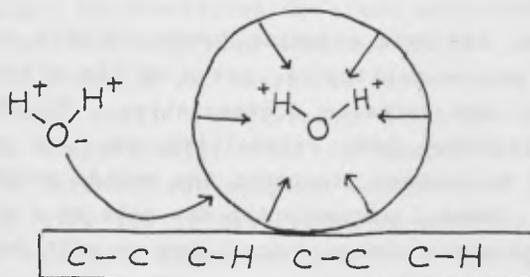


UNE LIAISON SANS  
FORMATION DE POLES  
ÉLECTRIQUES



### LIAISONS NON POLAIRES

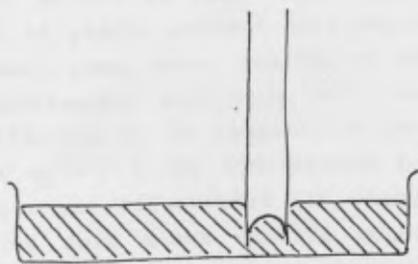
De telles matières sont appelées non polaires, et ne peuvent pas attirer de molécules d'eau puisqu'elles ne sont pas en condition de former des liaisons hydrogène avec elles. Les molécules d'eau qui se trouvent sur de telles surfaces s'attirent entre elles et se rassemblent en gouttes sphériques au lieu de se répandre sur la surface. Il ne se forme aucun film d'eau; l'eau ne mouille pas la surface et l'angle de contact est très grand.



EAU SUR UNE SURFACE SOLIDE NON POLAIRE

Comme l'eau semble être repoussée plutôt qu'attirée par de telles surfaces, on les appelle hydrophobes (en grec: qui détestent l'eau).

Aucune succion capillaire ne peut se produire dans un pore hydrophobe, puisque il n'existe pas de force d'attraction entre l'eau et les parois du pore. Il semble même en réalité que l'eau soit poussée au dehors, rejetée; si l'on fait une expérience de remontée capillaire, on voit que le niveau de l'eau à l'intérieur du tube se maintient au-dessous de la surface de l'eau libre, et prend la forme d'un ménisque inversé.



PAS DE SUCCION  
FORMATION D'UN  
MÉNISQUE INVERSÉ

EAU DANS UN PORE HYDROPHOBE



DETERIORATION DES MATERIAUX POREUX

CONTRAINTES MECANIKES

2.1. COMPORTEMENT SOUS CONTRAINTE ET DEFORMATION  
DES MATERIAUX FRAGILES

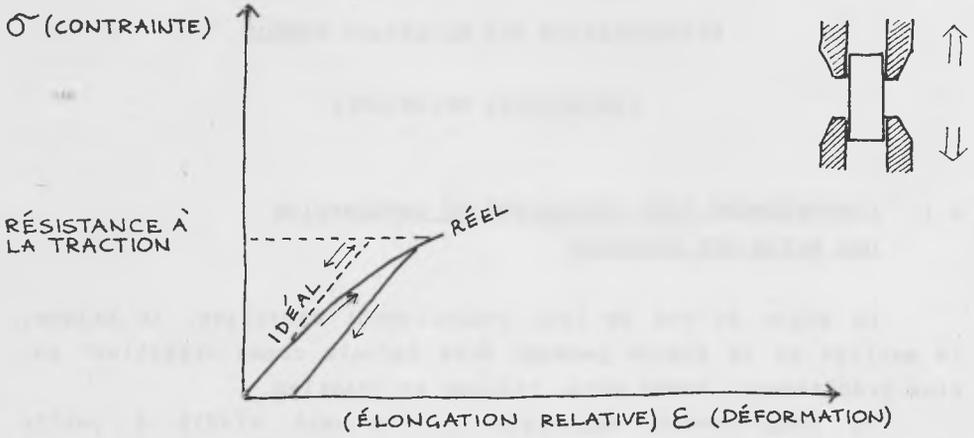
Du point de vue de leur comportement mécanique, la brique, le mortier et la pierre peuvent être définis comme "fragiles" ou, plus précisément, comme durs, rigides et fragiles.

Le comportement mécanique est souvent étudié à partir d'essais de traction et de compression dans lesquels un échantillon connu est soumis à des contraintes (charges) de plus en plus fortes et subit une déformation (ou changement de dimension) qui est enregistrée soit d'une manière continue soit par intermittence. La contrainte à partir de laquelle le matériau se brise est appelée la résistance à la traction (ou à la compression) du matériau.

Le résultat de ces essais est en général représenté sur des diagrammes où les contraintes sont reportées sur l'axe des ordonnées (y) et les déformations correspondantes sur l'axe des abscisses (x).

La figure 5 donne des exemples de diagrammes caractéristiques du comportement de matériaux fragiles. Dans un cas idéal, pour les matériaux fragiles, le diagramme devrait être une ligne rectiligne, indiquant que la déformation est proportionnelle à la contrainte imposée à l'échantillon. Le rapport contrainte/déformation, représenté par la pente de cette ligne droite, serait alors une constante qui donnerait une idée de la capacité du matériau à s'opposer à tout changement de dimension. Cette constante qui ne dépend pas de la forme de l'échantillon mais uniquement de la nature du matériau considéré est appelée "module" (ou module d'élasticité ou module de Young). La valeur du module dépend de la force des liaisons qui relient les atomes et les cristaux à l'intérieur du matériau.

## ESSAI DE TRACTION



## ESSAI DE COMPRESSION

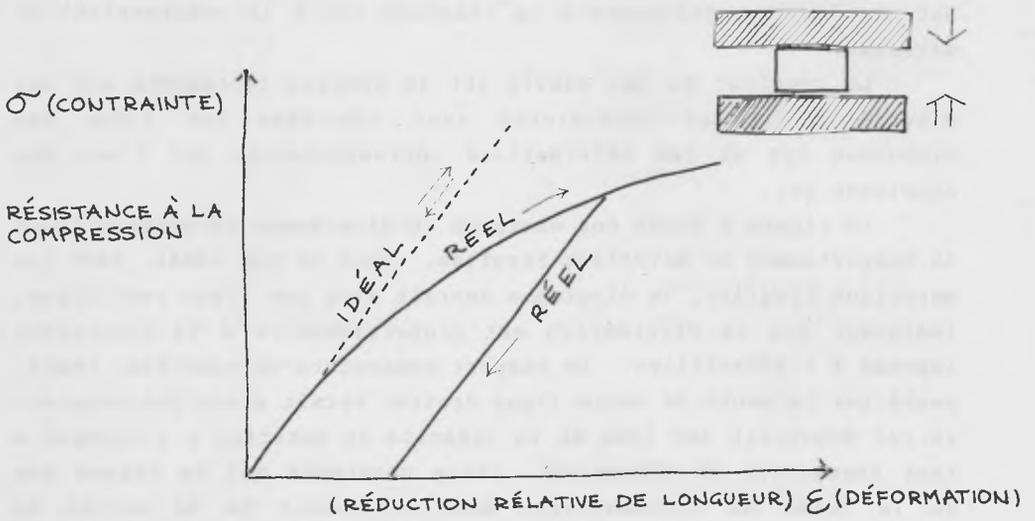


FIGURE 5. DIAGRAMMES CONTRAINTE/DÉFORMATION DES MATÉRIAUX FRAGILES

Toujours dans le cas idéal, quand la contrainte cesse, la déformation devrait retourner à zéro, c'est-à-dire que le matériau devrait retrouver sa forme initiale.

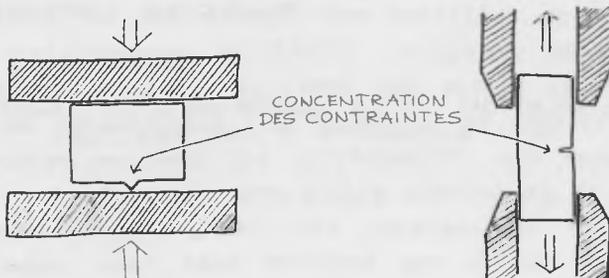
On qualifie un tel comportement d'élastique.

Le matériau parfaitement élastique, qui revient à ses dimensions initiales quand plus aucune contrainte ne lui est appliquée, n'existe pas. Une déformation irréversible, qui subsiste alors que toute contrainte a cessé, s'appelle plastique. Les diagrammes montrent que, dans l'expérience menée sur un matériau de construction réel, la ligne n'est pas droite car la pente change continuellement, le module n'est plus une constante. Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que les vrais matériaux de construction sont hétérogènes. Ils sont composés de nombreux cristaux différents, ou de verres, maintenus solidaires par des joints de force variable. Certains éléments ou joints commencent à se briser avant les autres, provoquant ainsi des déformations irréversibles.

Une autre cause importante de la différence entre le cas réel et le comportement idéal est le fait que la contrainte n'est pas répartie d'une manière homogène sur l'échantillon étudié. Du fait que la contrainte est souvent concentrée en certaines zones (concentration des contraintes) certaines parties du matériau sont soumises à une contrainte plus forte que la moyenne, alors que d'autres subissent des contraintes plus faibles. Les parties surchargées commencent à se briser avant les autres, même si le matériau est parfaitement homogène.

Voici les conditions typiques dans lesquelles on risque d'avoir une concentration des contraintes:

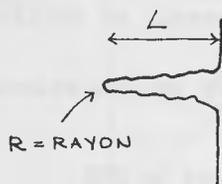
- irrégularités de surface, pour les essais de résistance à la compression,
- fissures de surface, pour les essais de résistance à la traction.



La déformation irréversible des matériaux fragiles n'est sans doute pas à proprement parler "plastique", du moins pas dans le sens où ce terme est appliqué aux métaux, qui sont eux, des matériaux plastiques caractéristiques. Dans le cas des métaux, il y a une déformation plastique parce qu'un glissement se produit à l'intérieur des cristaux, et les couches d'atomes disposées régulièrement se joignent parfaitement après le glissement. Le résultat du glissement est que le matériau devient plus résistant dans les zones déformées que dans les autres.

Dans le cas des matériaux rigides, la déformation irréversible se produit principalement à cause de la formation de fractures localisées (clivage des cristaux, fracture dans les verres, séparation de cristaux) qui ne se referment pas quand la contrainte cesse. La zone déformée est plus faible que le reste du matériau et contient de nombreuses fractures microscopiques.

Les effets de la concentration des contraintes sont particulièrement évidents dans les essais de résistance à la traction. Les formules données pour la concentration des contraintes de déformation montrent que le facteur d'amplification à l'extrémité d'une fracture superficielle est proportionnel à la racine carrée du rapport entre la profondeur et la largeur de la fracture. Donc, une fracture superficielle large comme un cheveu peut produire, à son extrémité, une contrainte de 10 à 100 fois supérieure à la contrainte de traction moyenne appliquée.



$$m = 1 + 2 \sqrt{\frac{L}{R}}$$

$m$  = FACTEUR D'AMPLIFICATION

AMPLIFICATION DE LA CONTRAINTE DE TRACTION  
À L'EXTRÉMITÉ D'UNE FRACTURE

Dans de telles conditions, une fissure se propage facilement dans le matériau et la fracture se produit sous une contrainte dont la valeur est bien inférieure à celle qui est montrée par le même matériau dans des essais de résistance à la compression.

Les matériaux fragiles résistent beaucoup mieux aux contraintes de compression qu'aux contraintes de traction. Leur résistance à la traction dépend considérablement de l'état de leur surface (c'est-à-dire de la présence ou de l'absence de fractures).

Dans le cas des matériaux de constructions fragiles, le module d'élasticité n'est pas constant et on le mesure rarement. Pourtant, il serait souvent utile de connaître ce module, dans le cas des mortiers de maçonnerie par exemple, afin de pouvoir évaluer la déformation qu'un joint peut supporter. Pourtant, pour que ce module soit utilisable, comme il n'est pas constant, il faudrait spécifier sous quelle compression il a été mesuré, afin d'obtenir des résultats comparables. Les mortiers de chaux, par exemple, ont un module d'élasticité très inférieur à celui des mortiers de ciment; ils se déforment beaucoup plus facilement (et ils cassent aussi beaucoup plus facilement).

Quand un matériau fragile a été soumis à une contrainte relativement forte sans se briser, mais en subissant une certaine déformation permanente, il est probable que des craquelures microscopiques se soient formées dans les zones où la contrainte a été excessive. Ces craquelures se comportent comme des pores, en particulier pour la succion d'eau et pour la formation des contraintes internes (voir au paragraphe 2.3).

Le manque de vraie plasticité dans les matériaux de construction fragiles établit donc un lien entre la contrainte mécanique et les processus de détérioration dus à la pénétration d'eau dans les pores.

L'importance de la contrainte mécanique dans la détérioration des matériaux fragiles peut expliquer les divergences rencontrées entre le comportement des matériaux en oeuvre et les essais de vieillissement artificiel, lorsqu'on teste l'efficacité des systèmes de protection. Dans les essais de vieillissement accéléré, les échantillons sont soumis à une alternance de cycles de températures extrêmes qui correspondent aux conditions naturelles mais, du fait de leur taille réduite et de l'absence de toute contrainte mécanique, les déformations qui surviennent pendant l'essai sont bien moindres que celles subies dans la

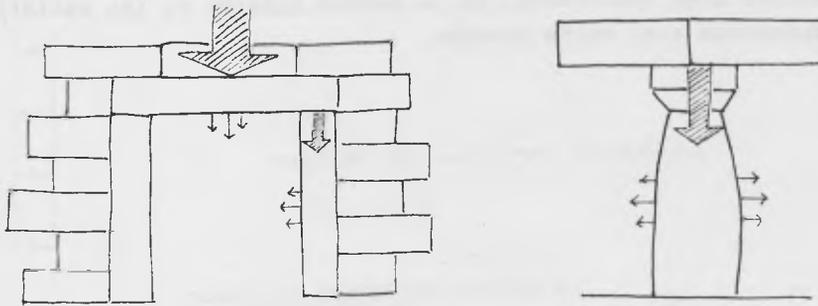
réalité par un morceau de matériau qui se trouve sur une surface exposée d'un édifice.

La résistance à la traction des matériaux de construction poreux dépend aussi des substances qui se trouvent à l'intérieur des pores. Selon la théorie, l'eau devrait provoquer une réduction de la résistance à la traction puisque sa molécule très polaire peut former des liaisons avec la surface des fissures qui viennent de s'ouvrir, facilitant leur formation. De même, les substances non polaires devraient, elles, avoir une bonne influence sur la résistance à la traction. On a pu prouver en laboratoire que la paraffine, qui n'a pas à proprement parler de résistance à la traction, peut provoquer une augmentation de 400% de la résistance à la traction d'une pierre calcaire.

## 2.2. CONSTRAINTES EXTERNES

Les contraintes mécaniques appliquées à un matériau de construction par son environnement peuvent provoquer des dégâts, en particulier dans le cas de forces de traction vis-à-vis desquelles la résistance du matériau est faible. Même s'il ne se produit apparemment aucune fracture macroscopique, la contrainte peut être la cause d'une déformation permanente et de la formation de fissures microscopiques qui provoquent une accélération globale de la vitesse d'altération. Plusieurs mécanismes peuvent être à l'origine de fortes contraintes ponctuelles dans les matériaux de construction.

CHARGE. Dans toute construction, certaines parties reçoivent des contraintes plus fortes que d'autres, par exemple, les colonnes, les linteaux, les piliers. En général, la structure de la construction est conçue pour minimiser les contraintes de traction et permettre aux matériaux de ne travailler pratiquement qu'en compression. Cependant, il existe des sources de contraintes de traction inévitables: systèmes de couverture, asymétrie des charges, poussées latérales, etc. On a souvent noté que, dans les constructions, les parties qui supportent les contraintes les plus importantes sont celles qui s'altèrent le plus rapidement.



LINTEAUX ET COLONNES

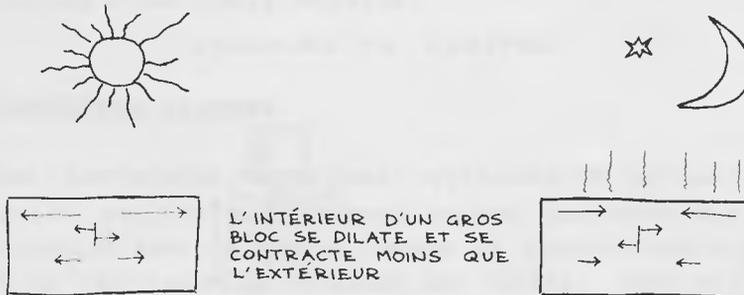


CHARGES  
ASYMÉTRIQUES

EXPANSION THERMIQUE. Dans les constructions, les matériaux sont soumis à des cycles quotidiens et saisonniers de température. De telles alternances sont la source fréquente de contraintes parce que les matériaux se dilatent sous l'effet de la chaleur et se contractent au refroidissement.

Les variations dimensionnelles sont proportionnelles à la longueur des éléments; ainsi, les grands éléments peuvent provoquer des contraintes plus fortes que les petits.

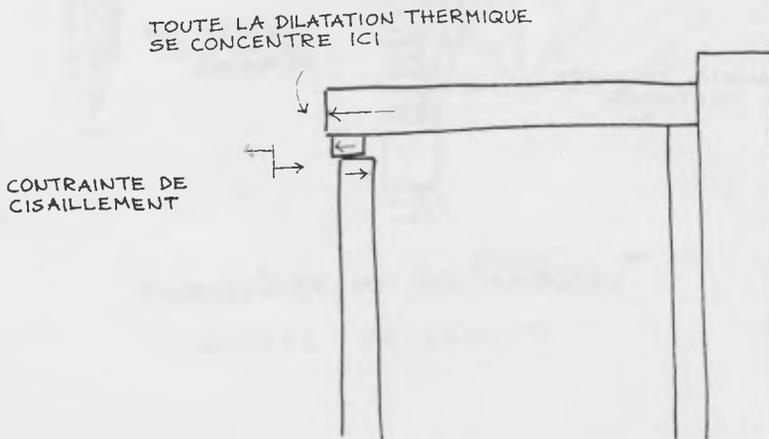
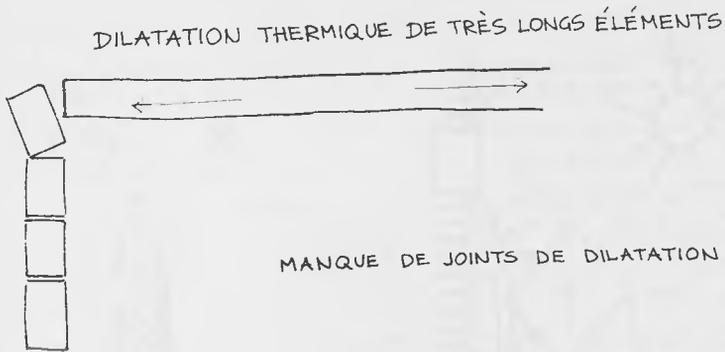
Il peut y avoir des contraintes même à l'intérieur d'un matériau homogène, entre sa surface, qui est directement exposée aux effets de l'environnement et subit donc des changements de température plus importants, et la partie interne où les variations de température sont moins grandes.



IL EN RESULTE UNE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT

La différence de température entre la nuit et le jour est grande par temps clair (dans les zones désertiques, par exemple). Durant la nuit la terre se refroidit par irradiation vers le ciel noir.

Dans la structure des édifices, les mouvements d'expansion thermique sont souvent importants. S'ils sont entravés, ils provoquent des contraintes qui créeront des déformations et des fissures.

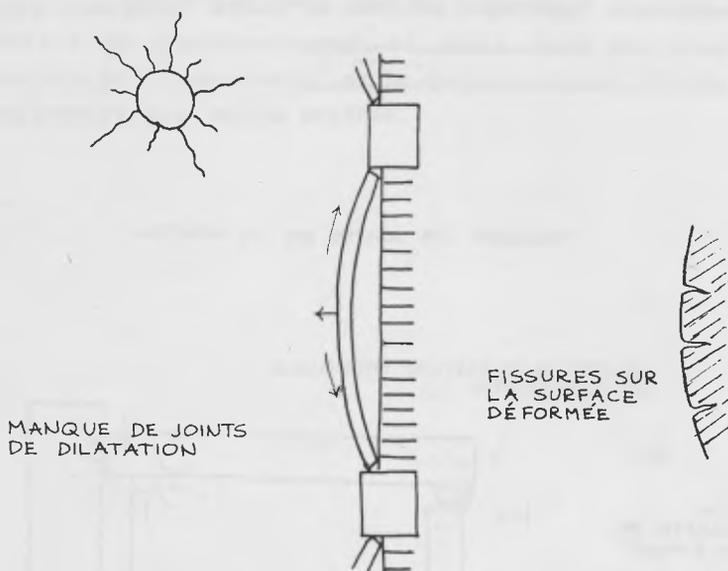


### STRUCTURES SOUMISES À DES CONTRAINTES PAR DILATATION THERMIQUE

Si des joints se sont ouverts, souvent ils ne se refermeront pas complètement au moment de la contraction, parce que des débris s'introduisent dans les fissures. En conséquence, ces fissures ont tendance à s'élargir.

Les matériaux de revêtement subissent des contraintes importantes si l'expansion thermique n'a pas été prévue dans le projet.

L'entrave à l'expansion de la pierre en revêtement provoque un bombement, une contrainte et des micro-fissures sur la surface qui se détériore rapidement. Si plusieurs dalles sont assemblées sans joints de dilatation, elles se comporteront comme un seul bloc.



### DÉFORMATION DU REVÊTEMENT

On a pu calculer qu'une dalle de 6 m pourrait subir un bombement de 25 mm pour une variation de longueur de 0,25 mm (correspondant à une élévation de température d'environ 10°C).

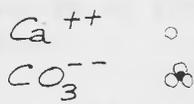
Détérioration du marbre. Le marbre est composé de gros cristaux de calcite (carbonate de calcium). Le coefficient d'expansion thermique change en fonction de la direction dans le cristal.

Les coefficients d'expansion thermique du cristal de calcite sont les suivants:

$25,10^{-6}$  m/m°C dans le sens de l'axe C

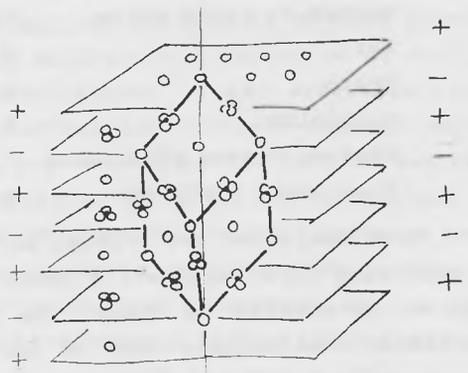
$-5,10^{-6}$  m/m°C perpendiculairement à l'axe C

Lorsque la température s'élève, le cristal se dilate dans la direction de l'axe C et se contracte (!) dans la direction transversale.



EXPANSION PAR  
 ÉCHAUFFEMENT

CONTRACTION PAR  
 ÉCHAUFFEMENT



AXE C

### CRISTAL DE CALCITE

Un tel mouvement provoque soit une contrainte entre deux cristaux (qui se dilatent tous les deux) soit une tendance à se séparer. Les contraintes thermiques ont ainsi pour résultat le clivage interne des cristaux ou le détachement des cristaux.

Ce phénomène provoque la formation d'un réseau de fissures dans lesquelles l'eau peut pénétrer et amorcer un processus d'altération qui peut atteindre le coeur des matériaux.

La porosité du marbre augmente au fur et à mesure de son exposition à l'environnement.

Expansion thermique différentielle. Certains matériaux de construction sont très différents des autres de par leur coefficient d'expansion thermique.

Lorsqu'elles ne sont pas entravées, les variations dimensionnelles provoquées par un changement de température de 30°C sont, pour des pièces d'un mètre de long:

Marbre	0,15 mm
Béton de ciment	0,3 - 0,4 mm
Pierre calcaire	0,15 mm
Granit	0,25 mm
Mortier (sable et chaux)	0,3 - 0,4 mm
Brique et terre cuite	0,15 - 0,2 mm
Fer	0,3 mm
Verre	0,3 mm
Aluminium	0,7 mm
Résines thermo-plastiques	1,5 - 3,0 mm
Plastiques renforcés	0,7 mm

Il faut souligner que l'acier et le béton ont un coefficient à peu près deux fois supérieur à celui de la brique, du calcaire, du grès et du mortier de chaux. De telles caractéristiques ont une incidence considérable dans le cas du renforcement structurel des constructions anciennes avec l'acier ou le béton. Quand deux éléments sont reliés de façon rigide et qu'ils ont une dilatation thermique différente, il se crée une contrainte entre eux, et c'est le plus faible qui devra céder, en se cassant ou en se déformant (c'est-à-dire en formant des fractures microscopiques).

Souvent des éléments de maçonnerie ancienne en contact avec des structures de renforcement modernes subissent une détérioration accélérée, qui peut s'expliquer par la présence de ces fractures microscopiques.

Une liste des coefficients de dilatation thermique des matériaux utilisés le plus couramment dans les constructions est donnée au tableau I (p. 38).

Expansion due à l'humidité. La plupart des matériaux de construction se dilatent quand ils absorbent de l'eau et se rétractent quand ils la perdent.

Le coefficient de dilatation correspondant est souvent faible et les contraintes qui en résultent sont donc négligeables par rapport à celles que provoquent les variations de température.

Cependant, dans les matériaux qui contiennent de l'argile, la dilatation sous l'effet de l'humidité est importante; c'est le cas de certains grès, souvent employés dans les constructions (les "molasses" suisses par exemple) qui, quand ils sont mouillés, se dilatent à peu près autant que s'ils étaient soumis à une élévation de température de 50°C.

Dans ce cas-là, la dilatation sous l'effet de l'humidité peut provoquer des contraintes importantes, notamment entre la surface de la pierre et sa partie interne quand la surface est mouillée.

#### Contraintes provoquées par les techniques de mise en oeuvre.

Au cours de la préparation du matériau à l'emploi ou du nettoyage, certaines opérations non souhaitables, ou mal exécutées, peuvent endommager sa surface. Ce facteur est particulièrement important dans le cas de la pierre qui peut être fissurée lors de son extraction (à la dynamite par exemple) ou de sa taille (au marteau ou au ciseau). Certaines méthodes de nettoyage aussi, comme le sablage ou le broissage, peuvent provoquer des accidents de surface. Une augmentation du nombre de fractures microscopiques entraînera toujours une accélération de la vitesse d'altération des matériaux.

A l'inverse, on sait que les surfaces polies (bien finies), du fait que toute la part du matériau abimé par le travail de préparation a été éliminée, présentent un plan compact à l'environnement et sont plus résistantes aux altérations.

Pour tous les matériaux de construction, la vitesse de détérioration est fortement influencée par l'état de la surface.

### 2.3. CONTRAINTES INTERNES

De fortes contraintes peuvent survenir à l'intérieur d'un matériau poreux quand des cristaux de glace se forment dans ses pores (sous l'effet du gel), ou quand l'eau s'évapore en laissant derrière elle des cristaux de matériaux dissous (cristallisation de sels). Dans les deux cas, les cristaux en grandissant exercent une contrainte à laquelle s'oppose la résistance à la compression du matériau. Toutefois, près de la surface, une mince couche du matériau sera soumise à une poussée venant de l'intérieur, équivalente à une contrainte de traction qui serait exercée de l'extérieur. Dans de telles conditions, un matériau fragile peut facilement se briser.

On a beaucoup discuté sur le mécanisme selon lequel surviennent les contraintes internes. On a maintenant assez d'informations pour donner une explication plausible, même si une part de la recherche de base reste encore à faire.

Gel. Les publications récentes mentionnent essentiellement deux mécanismes. Le premier est celui donné pour expliquer le gonflement des sols gelés. Cette explication est fondée sur la notion que les cristaux ou les lentilles de glaces se développent dans des vides relativement grands (fractures ou grands pores) alors qu'ils ne peuvent se développer dans les petits pores, à moins qu'ils n'y soient contraints par une pression.

L'eau qui se trouve dans les petits pores alimente alors les cristaux en formation par diffusion, au lieu de geler sur place. S'il reste de l'eau dans les petits pores, alors que tous les vides plus grands sont remplis, il se crée une pression qui pourrait permettre aux cristaux de glace de se former dans les petits pores aussi.

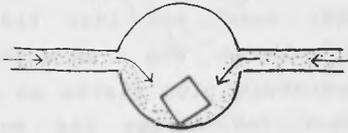
Il est intéressant de noter que la pression de poussée du gel ne dépend pas du fait que l'eau augmente de volume quand elle gèle. Les dégâts provoqués par la poussée du gel semblent se produire dans les matériaux dont la distribution révèle une nette prédominance des petits pores. L'expérience permet même de mettre en évidence que c'est quand les dimensions des pores sont comprises entre 0,1 et 1 micron que les contraintes sont les plus fortes.

Le deuxième processus est celui de l'emprisonnement d'eau qui dépend, cette fois, de l'augmentation de volume associée au phénomène de gel. Dans ce cas, l'eau à l'état liquide, pas encore gelée, reste captive dans des pores entourés de zones déjà gelées, et il ne lui restera plus aucune possibilité d'expansion quand elle gèlera à son tour.

Cristallisation de sels. Pour expliquer ce phénomène, on a aussi proposé deux mécanismes. Le phénomène de poussée, analogue à celui de la poussée du gel, qui dépend du développement de cristaux de sel dans les grands pores et les fractures tandis que la solution liquide provenant des petits pores alimente les cristaux en formation.

Des tensions apparaîtront au moment où les grands pores seront pleins de cristaux, s'il reste de la solution dans les petits pores. Dans ce cas aussi, le rapport du volume des petits pores à celui des grands déterminera l'intensité de la contrainte. Les tensions les plus fortes ont toujours lieu dans les matériaux ayant une proportion importante de petits pores.

UN CRISTAL SE DÉVELOPPE  
DANS UN GRAND PORE. LES  
PETITS PORES ALIMENTENT  
LE CRISTAL EN FORMATION.

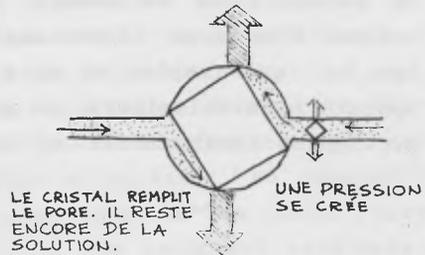


CAS 1. BEAUCOUP DE GRANDS  
PORES.  
(PEU DE PETITS PORES).



LA CROISSANCE DU  
CRISTAL S'ARRÊTE  
PAS DE PRESSION

CAS 2. BEAUCOUP DE PETITS  
PORES.  
(PEU DE GROS PORES).

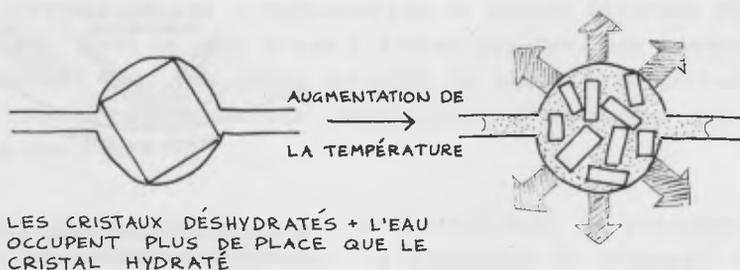


LA SUCCION CAPILLAIRE EST  
LA FORCE DÉTERMINANTE

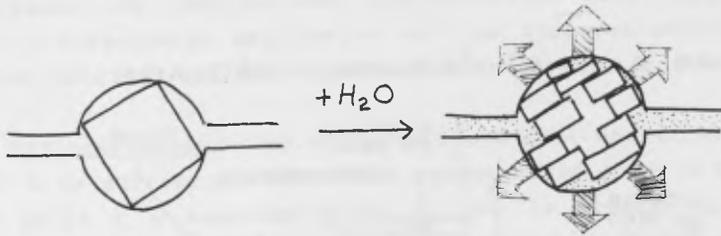
Le second mécanisme avancé concerne les sels qui forment des cristaux hydratés.

Dans la structure de ces cristaux, les molécules d'eau occupent une position bien précise. On peut citer comme exemples le sulfate de sodium, le carbonate de sodium, le sulfate de calcium, mais il y en a beaucoup d'autres. En réalité, le cas d'un sel qui ne forme pas de cristaux hydratés (comme le chlorure de sodium) est beaucoup moins fréquent que les autres.

Des sels hydratés peuvent aussi exister sous forme de cristaux sans eau (anhydres). Ils occupent alors moins de place. Comme les sels hydratés sont très volumineux, ils remplissent plus facilement les grands pores, et provoquent une poussée avec plus d'intensité. Cependant, leur tendance particulière à créer des contraintes importantes peut s'expliquer aussi par leur transformation en cristaux anhydres ou moins hydratés, due à un changement des conditions ambiantes (une température plus élevée ou une humidité relative plus basse favorisent les formes les moins hydratées). Dans de tels cas, il peut y avoir une contrainte quand le cristal hydraté, prisonnier dans un pore, se transforme en un cristal moins hydraté, en libérant quelques molécules d'eau, le volume total du produit final étant plus grand que celui du cristal d'origine. Inversement, un cristal de sel anhydre (ou peu hydraté) qui remplit un gros pore peut se transformer en cristal hydraté plus volumineux, en prenant l'eau des capillaires voisins, provoquant ainsi une contrainte supplémentaire.



DÉSHYDRATION D'UN CRISTAL HYDRATÉ  
(PAR CHAUFFAGE)



HYDRATATION D'UN CRISTAL ANHYDRE  
(PAR REFROIDISSEMENT ET HUMIDIFICATION)

Erosion alvéolaire. L'érosion alvéolaire est un type de détérioration des matériaux poreux dans lequel la cristallisation des sels joue un rôle important. Il est caractérisé par le fait qu'une désagrégation se produit, de préférence dans certaines zones, formant des cavités profondes (ou alvéoles) alors que les surfaces contigües peuvent ne pas être affectées. Ce phénomène se produit fréquemment sur les surfaces exposées aux vents forts où l'évaporation de l'eau circulant dans les pores est accélérée; de ce fait, il ne peut y avoir formation d'un film liquide sur la surface externe, parce que l'évaporation est si rapide que la quantité d'eau qui atteint la surface n'est pas suffisante. Le matériau semble sec, mais l'évaporation se poursuit en fait, juste au dessous de la surface, dans les pores.

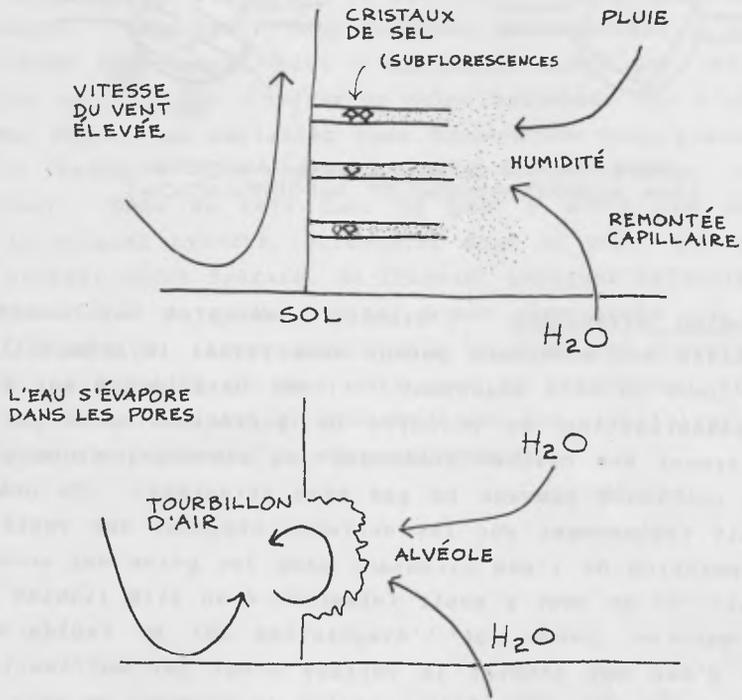
Dans de telles conditions, les dommages causés par la cristallisation étant aggravés, la surface d'évaporation se désagrège très vite. De plus, le processus va en s'accélégrant au fur et à mesure que la cavité se creuse parce que la vitesse du vent augmente à l'intérieur à cause de la formation de tourbillons d'air, déterminant une accélération de l'évaporation dans cette zone particulière.

Ce phénomène est schématisé dans la figure 6.

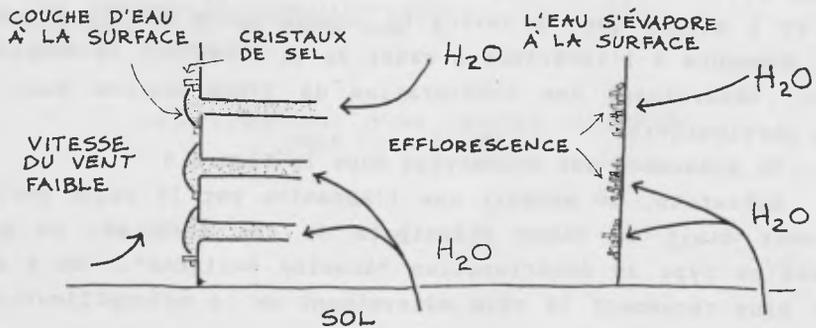
Autrefois, on pensait que l'abrasion par le sable porté par le vent était la cause principale de ces alvéoles; on a donc appelé ce type de détérioration "érosion éolienne". On a découvert plus récemment le rôle déterminant de la cristallisation des sels.

Si l'on néglige l'importance qu'a l'évaporation dans ce processus, et que l'on réalise l'intervention de restauration en

FIGURE 6. a) ÉROSION ALVÉOLAIRE



b) EFFLORESCENCE



remplissant les cavités avec des matériaux durs imperméables à l'eau, l'évaporation est déviée sur les surfaces avoisinantes de matériau original qui vont commencer à se détériorer à leur tour.

Efflorescences. Les efflorescences sont des cristaux de sel formés à la surface des matériaux poreux quand l'eau s'évapore là, parce qu'il y a beaucoup d'eau ou que la vitesse du vent est faible. Dans ce cas, les cristaux se forment principalement hors des pores; il sont très visibles mais les contraintes sont plus faibles. La figure 6 illustre aussi ce processus.

Corrosion des agrafes en fer. La corrosion du fer entraîne une augmentation du volume du métal due au fait que les oxydes (rouilles) plus ou moins hydratés occupent plus d'espace que le matériau d'origine.

Si des éléments de fer sont incorporés dans les matériaux de construction, pour servir d'assemblage ou de renforcement, la corrosion peut être retardée pendant des années parce que l'accès de l'eau et de l'oxygène jusqu'à la surface du métal se fait très lentement.

Cependant, au moment où la corrosion commence, l'augmentation de volume du fer provoque des contraintes internes et la formation de minuscules fractures dans le matériau qui jouxte les éléments de fer; l'accès de l'eau et de l'air vers la surface du métal est alors facilité. C'est pourquoi le processus de détérioration d'abord très lent, s'accélère brutalement et provoque en un laps de temps très court des détériorations catastrophiques.

On connaît de nombreux exemples de détérioration de monuments historiques due aux éléments de renforcement. On pourrait citer l'Acropole d'Athènes et le Panthéon de Paris.

T A B L E A U I

COEFFICIENTS DE DILATATION DES MATERIAUX  
UTILISES DANS LES CONSTRUCTIONS

(Unité : m/m°C)

(E.B. Grunau, B. Diergarten: Rev. Technique du Bâtiment  
et des Constructions Industriels, N°51, p. 75, 1975)

Béton . . . . .	10 10 <sup>-6</sup>
Béton de gravier . . . . .	9 - 12 10 <sup>-6</sup>
Béton d'argile expansée . . . . .	7 - 9 10 <sup>-6</sup>
Mortier de ciment . . . . .	10 - 11 10 <sup>-6</sup>
Mortier de chaux . . . . .	8 - 10 10 <sup>-6</sup>
Pierre calcaire . . . . .	7 10 <sup>-6</sup>
Brique . . . . .	5 10 <sup>-6</sup>
Granit . . . . .	8 10 <sup>-6</sup>
Verre (alcali 10%) . . . . .	4,8 10 <sup>-6</sup>
Fer . . . . .	11,5 10 <sup>-6</sup>
Acier . . . . .	10 - 14 10 <sup>-6</sup>
Cuivre . . . . .	16,8 10 <sup>-6</sup>
Aluminium . . . . .	23,8 10 <sup>-6</sup>
Plomb . . . . .	29,4 10 <sup>-6</sup>
Pin, de fil . . . . .	5,4 10 <sup>-6</sup>
Pin, de bout . . . . .	34,1 10 <sup>-6</sup>
Chêne, de fil . . . . .	3,4 10 <sup>-6</sup>
Chêne, de bout . . . . .	28,4 10 <sup>-6</sup>
Sapin, de bout . . . . .	58,4 10 <sup>-6</sup>
Bois contreplaqué . . . . .	10 - 40 10 <sup>-6</sup>
Résines polyester . . . . .	100 - 150 10 <sup>-6</sup>
Laminés de verre-polyester . . . . .	35 - 45 10 <sup>-6</sup>
Résines époxyde . . . . .	60 10 <sup>-6</sup>
Epoxydes avec charge de silice . . . . .	20 10 <sup>-6</sup>
Résines acryliques . . . . .	70 - 80 10 <sup>-6</sup>
Chlorure de polyvinyle . . . . .	70 - 80 10 <sup>-6</sup>
Nylon 66 . . . . .	70 - 100 10 <sup>-6</sup>

\* \* \* \* \*

DETERIORATION DES MATERIAUX POREUX

REACTIONS CHIMIQUES

CORROSION

Les réactions chimiques ont toujours besoin de la présence d'eau pour pouvoir se produire; c'est pourquoi la corrosion chimique ne peut avoir lieu que lorsque les matériaux sont mouillés.

Quand on parle d'action chimique, il faut faire une distinction entre l'eau qui provient directement de la pluie et le film d'eau qui peut se déposer en surface par suite de condensation.

Toute eau qui atteint les matériaux de construction en traversant d'autres matériaux (remontée capillaire - percolation d'eau de pluie) n'est pas active du point de vue chimique parce qu'elle a déjà été en contact avec des matériaux solides de type semblable. Son pouvoir d'agent chimique ou de solvant a donc déjà été épuisé. Ce type d'eau est dangereux en tant que source possible de contraintes internes, mais en général pas comme agent chimique.

3.1. ATTAQUE PAR L'EAU DE PLUIE

L'eau de pluie est toujours légèrement acide parce que l'air contient du gaz carbonique qui se dissout dans l'eau et forme de l'acide carbonique (qui est un acide très faible).



Dans de telles conditions, les carbonates de calcium ou de magnésium (par exemple, les mortiers de chaux et les enduits, les calcaires, les calcaires dolomitiques, les marbres) peuvent se transformer en bicarbonates et se dissoudre progressivement.

En ce qui concerne les matériaux céramiques (briques et tuiles en particulier), leurs composants principaux sont des silicates de calcium et d'aluminium qui sont très peu solubles dans l'eau. Ils devraient être assez résistants à l'eau de pluie. Mais il faut dire que l'on ne connaît pas bien leur réaction lente à une eau légèrement acide. Par ailleurs, les glaçures des faïences peuvent être riches en oxydes alcalins et donc quelque peu solubles dans l'eau acide et même dans l'eau neutre.

Les grès contiennent des minéraux siliceux (micas, chlorites, feldspaths) qui peuvent à longue échéance être attaqués par l'eau. Quand se produit cette réaction, des ions métalliques sont extraits (calcium, aluminium, potassium, sodium); la plus grande partie du grès demeure insoluble, mais se transforme en minéraux argileux qui sont plus mous et plus volumineux que les minéraux d'origine.

Comme les grès sont normalement très poreux, la pénétration de l'eau de pluie peut être profonde. L'eau peut rester en contact avec les minéraux pendant un temps relativement long, à chaque fois qu'ils sont mouillés par la pluie ou la condensation. C'est pourquoi des couches de surface d'une épaisseur de plusieurs millimètres peuvent être ramollies et se dilater, entraînant une grave détérioration des surfaces exposées.

En général, la vitesse de corrosion dépend beaucoup de la porosité et du type de minéraux présents dans le matériau. Une élévation de température provoque une accélération de la corrosion (cas des climats tropicaux humides).

### 3.2. ATTAQUE DANS UNE ATMOSPHERE POLLUEE

L'atmosphère polluée, dans ou près des centres urbains contient toujours des quantités variables d'anhydride sulfureux, produit par la combustion des fuels qui contiennent du soufre.

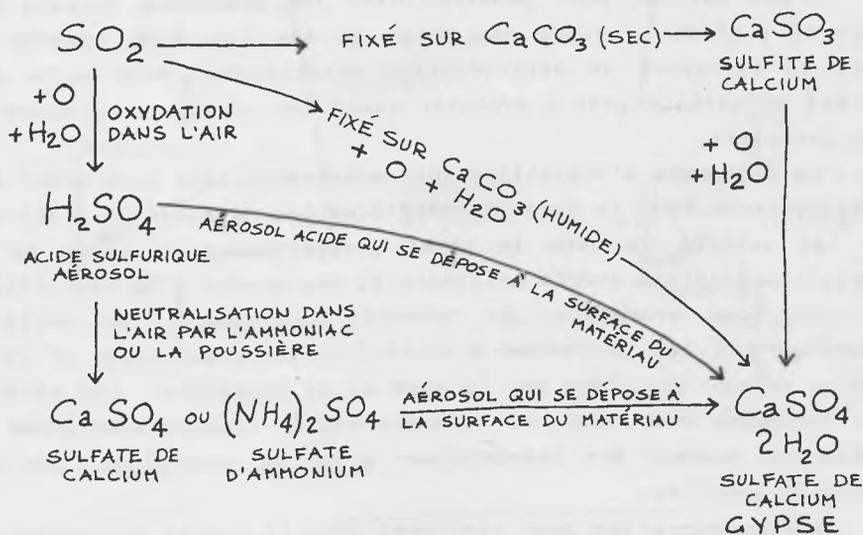


L'oxydation de l'anhydride sulfureux produit de l'acide sulfurique, acide fort, qui peut provoquer la détérioration de nombreux minéraux (carbonates, silicates), à une vitesse plus élevée que l'eau ne contenant que de l'acide carbonique.

Winkler a évalué à 1 mm l'érosion subie en 25 ans par le marbre, en observant les veines de quartz de monuments en marbre.

Pourtant, l'activité chimique de l'air pollué est relativement complexe et reste mal connue. Il y a tout d'abord toujours d'autres agents polluants que l'anhydride sulfureux, et certains d'entre eux peuvent provoquer la formation d'autres acides (acide chlorhydrique, acide nitrique, acide fluorhydrique) qui auront aussi une activité corrosive.

Ensuite, l'attaque des matériaux par l'anhydride sulfureux peut avoir lieu selon des mécanismes différents, comme le montre le schéma suivant.



MÉCANISMES POSSIBLES  
 DE LA FIXATION DU SOUFRE SUR LES MATÉRIAUX CALCAIRES

### 3.3. CYCLES D'HUMIDIFICATION-ASSECHEMENT (CONDENSATION OU DEPOSITION DE BROUILLARD)

Souvent, la face exposée des matériaux de construction est recouverte d'un film d'eau trop mince pour ruisseler sur la surface. En conséquence, le dépôt d'impuretés, provenant de l'atmosphère ou produits par la réaction d'acides avec le matériau lui-même, ne peut être emporté par l'eau.

Les films d'eau peuvent se former par condensation ou par déposition de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air sous forme de brume fine, les jours de pluie ou de brouillard.

L'eau sous cette forme peut provoquer plus de dégâts que l'action directe de la pluie frappant les surfaces exposées, parce qu'elle est normalement acide et porte toutes les particules polluantes de l'atmosphère (suie, poussière, etc...).

L'eau déposée peut pénétrer dans les matériaux jusqu'à une certaine profondeur grâce aux pores ou aux fractures formées au cours de processus de détérioration antérieurs. Mais cette eau revient en surface pour s'évaporer quand les conditions d'assèchement prévalent.

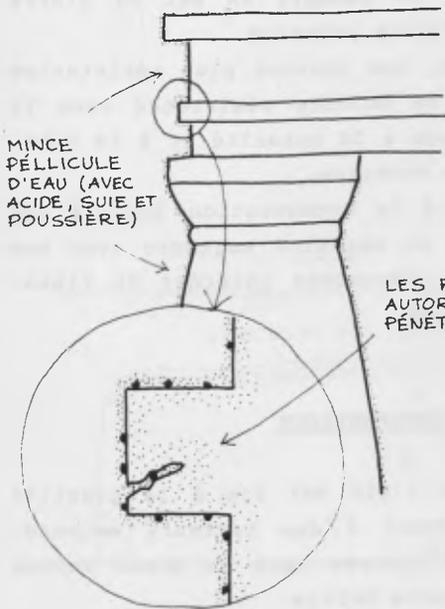
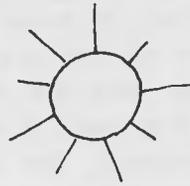
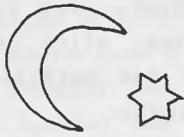
Le phénomène d'humidification-assèchement peut donc créer des détériorations dans la phase d'humidification (à cause de l'attaque par les acides) et dans la phase d'assèchement (à cause de la cristallisation des agents polluants et des produits de réaction).

Sur les monuments, on reconnaît facilement les surfaces affectées par les processus d'humidification-assèchement à leurs croûtes dures, souillées par la suie et la poussière. Ces croûtes sont rarement continues et imperméables à l'eau parce qu'elles présentent souvent des craquelures; elles ne constituent pas une couche protectrice.

La détérioration peut continuer sous la croûte et souvent on trouve sous la surface, qui est très dure, un matériau sans cohésion, désagrégé. Les dégâts provoqués par le processus d'humidification-assèchement peuvent donc évoluer très rapidement, masqués par une apparence trompeuse de surface saine recouverte d'une patine noire. Seul l'inspection très minutieuse (percussion, prise d'échantillon) permettra de déceler les conditions réelles dans lesquelles se trouve le matériau.

La résistance au phénomène d'humidification-assèchement dépend plus de la structure poreuse et de la résistance mécanique des matériaux que de leurs propriétés chimiques. Les matériaux à

FIGURE 7.



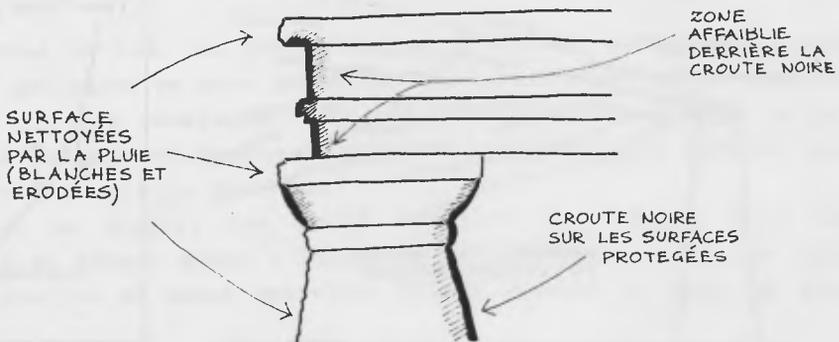
1. HUMIDIFICATION

LES FISSURES AUTORISENT LA PÉNÉTRATION

CRISTAUX POUSSIÈRE ET SUIE

ZONE AFFAIBLIE

2. ASSÈCHEMENT



3. VIEILLISSEMENT (PLUSIEURS CYCLES)

porosité faible et résistance à la traction satisfaisante sont ceux qui résistent le mieux à ce type de détérioration. Les briques bien cuites et les tuiles sont plutôt résistantes; elles peuvent être salies mais pas désagrégées. Par contre, les matériaux en terre cuite de qualité inférieure peuvent se dégrader.

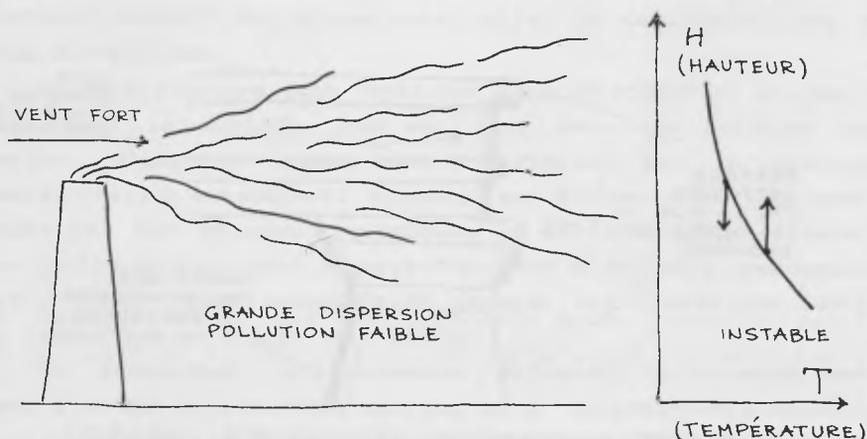
La plupart des calcaires et des grès, de même que les mortiers de chaux, sont attaqués en profondeur. Cependant, les matériaux à faible porosité appartenant à ces groupes peuvent très bien opposer une bonne résistance: un exemple en est la pierre d'Istrie, un calcaire cristallin à faible porosité.

Pour tous les types de pierre, des couches plus résistantes peuvent alterner avec des couches de moindre résistance dans la même carrière. Ceci est lié davantage à la porosité et à la cohésion de la roche qu'à sa composition chimique.

Le marbre blanc est sensible à la condensation jusqu'à des profondeurs surprenantes, parce que sa porosité augmente avec son âge; ceci est en rapport avec les phénomènes internes de fissuration causés par les cycles thermiques.

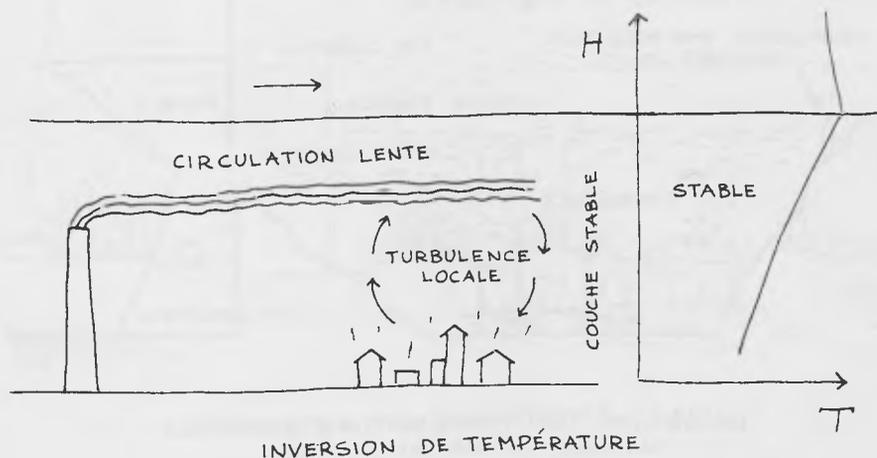
### 3.4. CLIMATOLOGIE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Le niveau de la pollution de l'air est lié à la quantité d'agents polluants produite mais aussi à des facteurs météorologiques. Si les polluants sont dispersés dans un grand volume d'air, la pollution qui en résulte reste faible.



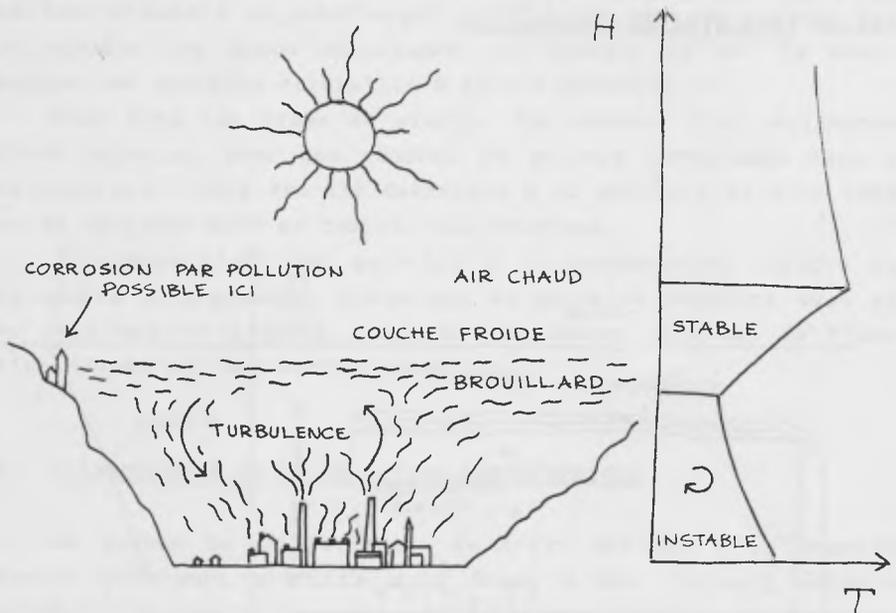
Dans l'atmosphère, normalement, la température décroît quand l'altitude s'accroît. Dans ce cas l'air est instable, parce que l'air chaud tend à monter au-dessus de l'air froid.

Pendant les nuits d'hiver, cependant, près du sol, il se forme souvent une couche dans laquelle la température croît avec l'altitude. Dans cette éventualité, l'air est plus stable parce que l'air froid tend à rester en bas. Cette disposition est appelée inversion de température.



Dans ce cas, la circulation de l'air est normalement lente et les polluants ne sont pas dispersés. Ils tendent à se répandre à une altitude constante, mais peuvent être poussés vers le sol par des turbulences locales causées par des surfaces chaudes (par exemple, les maisons chauffées).

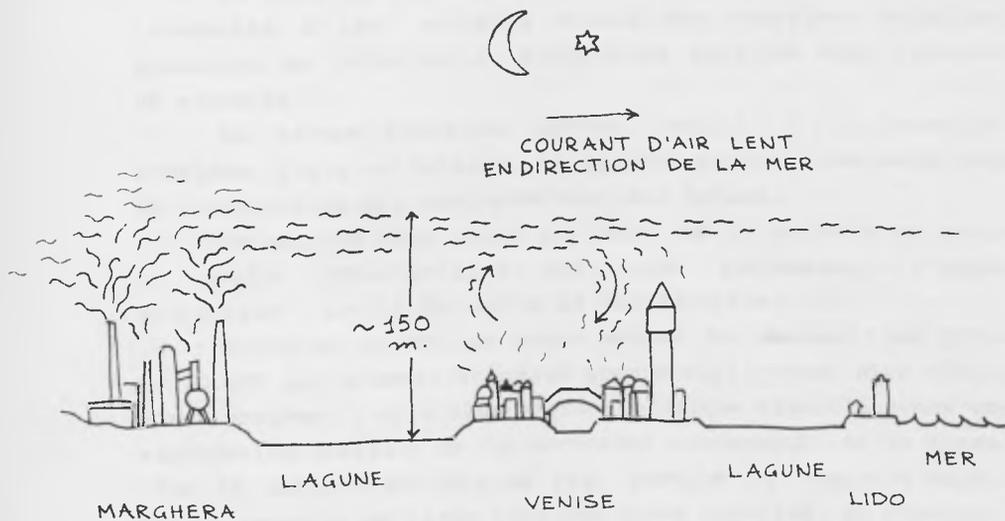
Il se produit une forte pollution par exemple dans les vallées en hiver, quand l'inversion de température se forme dans une situation de haute pression, faible vitesse du vent, et beau temps.



INVERSION DE TEMPÉRATURE DANS UNE VALLÉE UN MATIN D'HIVER

Un cas particulier est celui de Venise où la pollution est due à deux sources: localement, les installations de chauffage; à distance, la zone industrielle de Marghera. Une inversion de température, le plus souvent en automne et en hiver, peut causer l'accumulation des polluants.

Les phénomènes locaux de turbulence au dessus de la ville, sont dus au fait qu'en hiver, celle-ci est plus chaude que la lagune.



VENISE PAR UNE NUIT D'HIVER CLAIRE



## BIODETERIORATION DES MATERIAUX POREUX

### 4.1. BACTERIES ET CHAMPIGNONS

De nombreux types de bactéries tirent l'énergie qui est nécessaire à leur activité vitale des réactions chimiques minérales de réduction et d'oxydation qu'elles sont capables de produire.

De telles réactions peuvent aboutir à la formation d'acides, forts et faibles, et peuvent corroder les matériaux de construction qui sont sensibles aux acides.

Un exemple bien connu est celui de la bactérie du cycle du soufre (Thiobacille) qui peut synthétiser l'acide sulfurique à partir du soufre et des sulfites.

Quand on trouve un grand nombre de thiobacilles (plus de 10.000 par gramme) et quand aucune explication plus simple n'est trouvée, l'hypothèse micro-biologique apparaît comme une explication possible de la corrosion accompagnée de la formation de sulfate de calcium (par exemple le temple d'Angkor Vat et certains édifices loin des zones urbaines, en France).

Une hypothèse analogue a été avancée pour les bactéries du cycle de l'azote, produisant de l'acide nitrique; elle n'est pas confirmée par des résultats positifs dans des cas réels de détérioration.

D'autres types de bactéries et de champignons tirent leur énergie de l'oxydation des matériaux organiques et leur réaction a pour produit final des acides organiques. L'un de ces acides est l'acide oxalique et ce processus peut expliquer la présence fréquente d'oxalate de calcium dans les couches de couleur variables que l'on trouve fréquemment sur des pierres très anciennes.

Il n'est en général pas facile d'évaluer l'importance de tels processus microbiologiques par rapport à la détérioration chimique et physique. Probablement, il existe une relation entre ces deux types de processus de détérioration: celui physico-chimique permettant souvent la colonisation

biologique, tandis que celle-ci, par ses productions d'acides réactifs renforce l'action du premier.

#### 4.2. ALGUES

L'attaque par les algues des matériaux de maçonneries est fréquente en atmosphère humide, par exemple dans les climats tropicaux (Borobudur, Java) ou dans les grottes (Lascaux, Domus Aurea à Rome).

La désagrégation en profondeur des matériaux est rare, bien qu'il y en ait une illustration à Borobudur, où les algues introduites dans l'andésite ont provoqué le gonflement et l'éclatement de la roche.

Plus souvent, la croissance d'algues provoque une altération superficielle, particulièrement nuisible dans le cas de surfaces peintes ou sculptées.

Des produits nettoyants et désinfectants permettent de contrôler les infections par les algues, mais leur effet ne dure qu'un temps limité et une attention continue est donc indispensable sous les climats humides. On doit aussi tenir compte du fait que certains produits préconisés pour le traitement sont alcalins et peuvent former des sels solubles ou provoquer un changement de couleur de la surface.

#### 4.3. LICHENS

Les lichens sont formés par l'association (symbiose) de champignons et d'algues.

Le développement de lichens sur les matériaux de maçonneries est très fréquent à l'extérieur; cependant, beaucoup d'entre eux ne peuvent pas vivre dans les atmosphères polluées.

Des lichens blancs "crustacés" étendent leur croissance sur plusieurs millimètres à l'intérieur du matériau et le décomposent sur une certaine épaisseur grâce à la production d'acides organiques (par exemple, acide oxalique).

D'autres lichens présentent un pouvoir de pénétration moins fort. En général, la détérioration engendrée par les

lichens évolue lentement mais l'effet défigurant sur les surfaces décoratives (peintures ou décoration sculptée) peut être très spectaculaire.

Le nettoyage des surfaces envahies de lichens n'est pas facile et la prévention de l'attaque requiert un soin continu. On a récemment réussi assez bien à retirer les concrétions "crustacées" à l'aide de gelées basiques (cf. Chapitre VIII. Nettoyage de la pierre).

#### 4.4. MOUSSE

La mousse peut exercer une action particulièrement désagrégeante sur la surface des matériaux de construction et sur une profondeur de 1 centimètre ou plus.

Il semble que son développement soit favorisé par les surfaces alcalines, comme les bétons de ciment et les mortiers de chaux, et on a parfois noté sa présence sur des surfaces en pierre proches de zones où du béton de ciment avait été utilisé pour la consolidation.

#### 4.5. PLANTES SUPERIEURES

Les racines des herbes, des buissons ou des arbres peuvent provoquer la rupture des matériaux de maçonnerie, même à une certaine distance de la plante.

Le contrôle de tels processus relève pourtant du domaine de la routine normale de l'entretien des bâtiments et ils ne doivent devenir importants que dans le cas d'édifices semi-abandonnés.



VIBRATIONS

5.1. INTRODUCTION

Les vibrations dues au trafic, aux trains, aux machines ou aux bangs supersoniques provoquent rapidement une alternance de contraintes de traction et de compression sur les bâtiments. L'effet de telles contraintes sur des structures complexes n'est pas facile à analyser.

Dans la littérature technique, sont mentionnés de nombreux cas dans lesquels les vibrations ont provoqué d'importants dégâts, voire l'effondrement d'édifices.

Les expériences menées au cours de ces 70 dernières années ont permis de calculer les contraintes dues aux vibrations et d'évaluer les limites de sécurité pour les édifices. Dans la plupart des cas, les contraintes causées par la plus fréquente des vibrations (c'est-à-dire le trafic) ne peuvent pas, seules, endommager un édifice.

Pourtant, lorsqu'elles s'ajoutent à d'autres types de contraintes, agissant sur les structures et les matériaux (contraintes de charge ou provenant de l'environnement), on doit admettre que les vibrations peuvent augmenter la vitesse de détérioration.

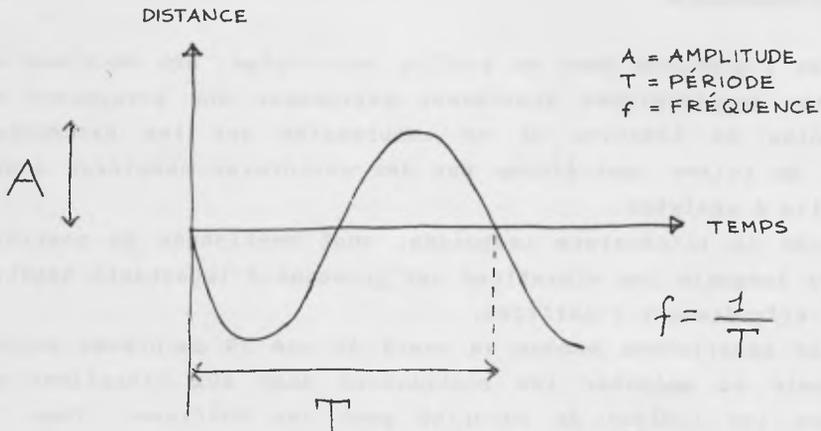
Comme l'accélération des processus de détérioration est très difficile à mesurer, le problème de l'évaluation des limites admissibles à la vibration n'est pas facile à résoudre, particulièrement dans le cas d'édifices anciens de grande valeur.

La limite maximale admissible de vibrations devrait être telle que les vibrations superposées aux autres contraintes agissant sur le bâtiment aient pour résultat une vitesse de détérioration tolérable (cette dernière étant définie comme celle pouvant être contrôlée par le service d'entretien prévu pour le bâtiment en question).

Cette notion implique une relation entre la limite maximale autorisée pour la vibration, l'état de conservation de l'édifice, et le système d'entretien qu'on peut prévoir pour celui-ci.

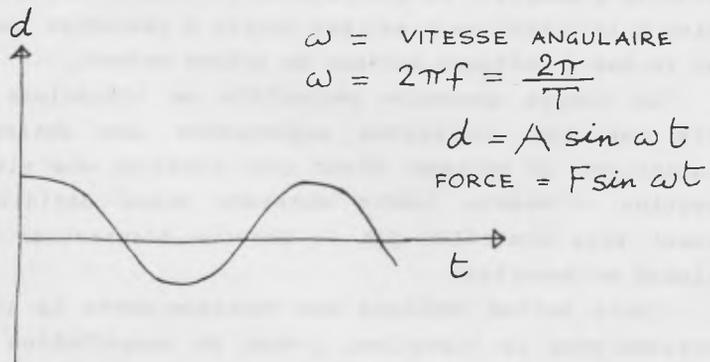
## 5.2. DEFINITIONS ET MESURES

La vibration est le mouvement alternatif d'un corps autour d'une position d'équilibre.



On peut décrire par approximation, la plupart des vibrations, comme une courbe sinusoïdale ou une combinaison de plusieurs courbes sinusoïdales.

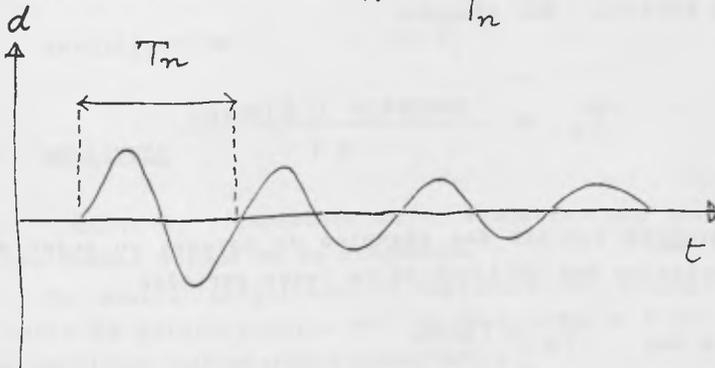
La position du corps et la force qui agit sur lui peuvent alors être données sous forme d'équations.



Les vibrations peuvent être provoquées par des impulsions isolées (explosion, battage de pieux de fondation) qui amènent les objets à vibrer selon leur fréquence naturelle (c'est-à-dire l'inverse de leur période naturelle).

$T_n$  = PÉRIODE NATURELLE

$f_n = \frac{1}{T_n}$  = FRÉQUENCE NATURELLE



Toutes les vibrations dissipent de l'énergie et sont étouffées plus ou moins rapidement.

Au contraire, une vibration continue est provoquée, par exemple, par des machines en fonction. La vibration excitante contraint les objets, à vibrer à sa propre fréquence.

Si la fréquence naturelle de l'objet est voisine de celle de la vibration excitante, la réponse de l'objet à l'excitation sera beaucoup plus forte (résonance).

Les vibrations sont mesurées au moyen d'accéléromètres qui transforment les impulsions mécaniques en impulsions électriques. Elles sont enregistrées et analysées pour fournir les données de la fréquence, de l'amplitude, de la vitesse (ou de l'accélération) de la vibration.

### 5.3. FREQUENCE NATURELLE ET RESONANCE DES EDIFICES

Une impulsion isolée excite la fréquence naturelle d'un édifice. Si  $T_N$  est la période naturelle d'oscillation d'un édifice et  $f_N$  sa fréquence naturelle, on aura:

$$f_N = \frac{1}{T_N}$$

Des règles empiriques permettent de calculer la période naturelle d'un édifice. Par exemple:

$$T_N = \frac{\text{NOMBRES D'ÉTAGES}}{11}$$

La littérature fournit des exemples de données au sujet des fréquences naturelles des édifices et de leurs périodes.

- édifice bas  $f_N \sim 10 \text{ Hz}$
- tours 30 - 40 m  $f_N$  (EN FLEXION) 1,64-2,86 Hz
- gratte-ciel  $f_N = 0,2-0,5 \text{ Hz}$   $T_N = 5-2 \text{ sec}$
- l'Empire State Building  $T_N = 8,25 \text{ sec}$
- New Severn Bridge (à oscillation verticale, en flexion)  $T_N = 7 \text{ sec}$   $f_N = 0,14 \text{ sec}$
- Long Creek Bridge (Canada)  $f_N = 0,6 \text{ Hz}$   $A = 200 \text{ mm}$

La fréquence naturelle d'un grand nombre de planchers et de dallages se situe entre 10 et 30 Hz.

Une vibration continue impose sa propre fréquence à un édifice et provoque une résonance quand la fréquence de la vibration émise ( $f$ ) est proche de la fréquence naturelle de l'édifice, ( $f_N$ ).

L'amplification due à la résonance dépend des "facteurs d'amortissement" (D) de l'édifice. Pour la plupart des structures et des matériaux de construction, on peut supposer que l'amplification est égale à 1/2 de D.

On peut mesurer l'amplification par résonance en stimulant artificiellement la structure et en calculant le nombre de cycles nécessaires pour obtenir une réduction de l'amplitude de la moitié d'une valeur donnée initiale. Si N est ce nombre, on aura:

$$\text{AMPLIFICATION} = 4,35 N$$

Il y a une méthode plus précise pour déterminer l'amplification par résonance; elle consiste à calculer le nombre de cycles ( $N_1$ ) nécessaire pour diminuer l'amplitude de 1/10 de la valeur initiale. Dans ce cas, on a:

$$\text{AMPLIFICATION} = 1\,365 N_1$$

#### 5.4. AMPLITUDE

L'effet de l'amplitude de la vibration sur les constructions ou les hommes dépend de sa fréquence.

On mesure normalement l'amplitude en microns  $\mu$  ( $10^{-3}$  mm). Le seuil de perceptibilité est de 10 microns à 5 Hz. A 50 Hz, la même amplitude est vraiment désagréable.

A 5 Hz, une amplitude de 400 microns provoque une gêne alors qu'à 50 Hz, une amplitude de 150 microns est considérée comme "pénible".

Le trafic routier provoque une vibration d'une amplitude de 5 à 25 microns de 10 à 30 Hz.

Des expériences menées autrefois avec des charges d'explosifs ont permis de déterminer les limites inférieures des dommages subis par les édifices récents (400 microns) et les édifices anciens (200 microns). Dans des textes plus récents (Teichmann et Westwater - 1957), on cite la limite de 100 microns pour les "structures de grande valeur et fragiles ou pour les biens en mauvais état".

#### 5.5. VITESSE DE POINTE

La vitesse ou, plus correctement, la "vitesse de pointe" d'un objet vibrant peut être calculée d'après les données de

l'accéléromètre et c'est le meilleur guide pour estimer le risque de dégradation des bâtiments.

La formule: 
$$V = 2\pi Af$$

est valable pour les vibrations sinusoïdales et on l'utilise comme une approximation dans la plupart des cas.

Le seuil de perception par l'homme est d'environ 0,3 mm/sec. Une vitesse de 2,5 mm/sec est "gênante".

D'après quelques expériences sur l'effet des explosions sur les bâtiments (1949-1965), des valeurs limites pour le déclenchement de dégâts mineurs ont été établies par différents auteurs. Elles se situent entre 50 et 120 mm/sec.

Cependant, des études récentes tendent à abaisser considérablement ces valeurs.

La norme DIN 4150 (édition de 1970) donne les valeurs indiquées ci-dessous comme vitesses maximales autorisées pour les vibrations passagères (chocs soudains). Pour les vibrations répétées, les valeurs spécifiées doivent être réduites d'un tiers.

DIN 4150 (édition de 1970) valable 8 - 80 Hz

<u>Classe</u>	<u>Description</u>	<u>Vitesse maximale autorisée</u>
1	Ruines et constructions de grande valeur historique	2 mm/sec
2	Constructions comportant des défauts	5 mm/sec
3	Constructions en bon état (ne souffrant que d'altérations mineures comme de fissures dans l'enduit)	10 mm/sec
4	Constructions "fortes"	10 - 40 mm/sec

Le seuil de perceptibilité est de 0,12 à 0,16 mm/sec. DIN 4150 requiert que les mesures des vibrations soient prises sur la fondation extérieure au niveau du sol. Les composants vectoriels combinés des vibrations doivent être mesurés dans la direction verticale et dans les deux directions horizontales.

Pour les vitesses de vibration mesurées sur les planchers et les plafonds, la valeur maximale admissible est de 20 mm/sec. On donne au tableau II les valeurs correspondant aux spécifications plus récentes.

#### 5.6. ACCELERATION

On exprime souvent les résultats de la mesure des vibrations sous la forme d'"accélération"; l'accélération est liée à l'amplitude et à la fréquence par l'équation:

$$a = 4\pi^2 A f^2$$

qui est valable pour les vibrations sinusoïdales mais utilisée dans la plupart des cas comme approximation.

On mesure habituellement l'accélération en unités g (g = accélération de gravité, d'une valeur d'environ 10 m/sec<sup>2</sup>).

L'accélération minimale qui cause un effet perceptible sur l'homme est de 0,01 g. Un effet désagréable se décèle à 0,04 - 0,05 g et un effet pénible au-dessus de 0,1 g.

Les données des expériences du jet d'air comprimé (Thoenen et Windes, 1942) mettent en évidence que des dégâts se produisent sur les constructions à 1 g. Les auteurs supposent que la limite de sécurité pour les constructions est à 0,1 g.

Il est probable qu'une telle valeur devrait être réduite considérablement dans le cas des constructions anciennes soumises à des vibrations et si l'on considère l'effet des autres contraintes auxquelles est soumis le bâtiment considéré.

#### 5.7. VIBRATIONS DUES AU TRAFIC ET LEURS EFFETS SUR LES CONSTRUCTIONS

Le trafic routier provoque des vibrations du sol et des constructions. La littérature sur ce sujet cite des amplitudes de 2 à 25 microns à des fréquences de 10 à 30 Hz. Des amplitudes plus grandes et des fréquences plus faibles peuvent être engendrées

T A B L E A U    I I

DEGATS CAUSES PAR LES VIBRATIONS DANS LES CONSTRUCTIONS

Vitesse de pointe 
$$\underline{v}_{r \text{ MAX}} = \sqrt{v_{X \text{ MAX}}^2 + v_{Y \text{ MAX}}^2 + v_{Z \text{ MAX}}^2}$$

DIN 4150 (texte provisoire 1978)

$\underline{v}_{r \text{ MAX}}$	<u>Dégât</u>
< 2.5	aucun
de 2.5 à 6	très improbable
de 6 à 10	improbable
/ 10	possible

ISO/TC 108/SC-2

$\underline{v}_{r \text{ MAX}}$	<u>Dégâts</u>
de 3 à 5	Fissures visibles dans les éléments secondaires: cloisons, enduits.
de 5 à 30	Fissures visibles dans les éléments principaux: maçonneries, poutres, piles, planchers.
> 100	Grandes fissures définitives avec réduction de la capacité de soutenir les charges.

\* \* \* \* \*

par des véhicules plus gros; on trouve citées des amplitudes de 5 à 50 microns pour les autobus chargés, les tracteurs et les camions.

Ce sont les irrégularités de surface des chaussées qui sont la principale cause de vibration. Dans l'un des exemples cités dans la littérature consacrée au sujet, une irrégularité de 20 mm d'amplitude a provoqué une vibration d'une vitesse de 5 mm/sec, bien au-dessus de la limite admise par la norme DIN 4150 pour les constructions anciennes.

Des expériences menées avec des obstacles aménagés, épais de 4 à 38 mm, ont permis de mesurer des amplitudes de 76 microns à 8 Hz (environ 4 mm/sec).

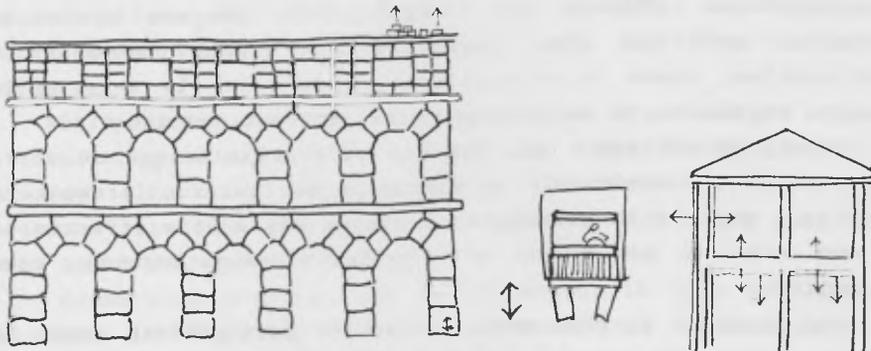
La distance entre l'édifice et l'irrégularité de la surface de la chaussée est bien sûr un facteur important. On a pu déterminer qu'en général, quand on double la distance, l'amplitude diminue par un facteur 2, et même un peu plus.

Les vibrations du trafic, seules, peuvent rarement être considérées comme l'unique cause de défaillance des structures des édifices. Il faut plutôt les envisager par rapport aux autres processus de détérioration qu'elles peuvent accélérer. Ceci n'est pas facile à évaluer en termes quantitatifs.

On peut toutefois donner quelques règles générales:

- (a) L'effet des vibrations dues au trafic est plus important sur les petits éléments que sur les grands.

Comme la fréquence naturelle des bâtiments est normalement beaucoup plus faible que celle des vibrations dues au trafic,



il est peu probable qu'il puisse se produire une résonance dans les structures du bâtiment. Cependant, des éléments légers isolés comme les planchers, les plafonds et les fenêtres sont plus sujets à l'amplification de la résonance puisque les petits éléments ont des fréquences de résonance plus élevées.

(b) Les éléments des structures manifestent des amplitudes maximales de vibration là où ils sont le plus éloignés des points de liaison avec d'autres éléments (par exemple, le centre des planchers).

On peut donner comme conclusion générale que les éléments des constructions les plus vulnérables aux détériorations sont:

- Les enduits, particulièrement s'ils n'adhèrent pas bien.
- Les maçonneries fissurées.
- Les petits éléments des maçonneries qui ne sont pas bien rattachés à la structure (par exemple, parement et blocage interne, briques isolées). Leur vibration peut même éroder le mortier.

Sior, en 1961, note que, quand la vibration est proche de la valeur limite de détérioration, elle peut jouer le rôle d'initiateur d'une dégradation en fait attribuable à d'autres causes (par exemple, la faiblesse des fondations).

La contrainte par vibration peut aussi agir en interférence avec des processus physico-chimiques de détérioration et provoquer une augmentation des vitesses de détérioration.

Les fissures peuvent s'agrandir pendant les cycles de vibration et permettre la pénétration de poussières qui empêchera le rétablissement de l'état initial. L'accès de l'eau par les micro-fractures, formées ou élargies par une contrainte par vibration, peut lui aussi permettre à d'autres phénomènes de détérioration, comme la cristallisation de sels, le gel, ou les attaques chimiques, de se propager vers le coeur des matériaux.

Pour les bâtiments qui ont une valeur historique ou artistique, le niveau admissible de vibration est particulièrement bas parce que, même si la structure ne risque pas d'être affectée, on ne peut admettre que soient altérés des éléments mineurs, comme les enduits.

Le problème se pose avec une acuité particulière quand les enduits portent des peintures murales. On en trouve un bon exemple

à la Villa Farnesina à Rome où les peintures murales de Raphaël et ses élèves ont été altérées par les vibrations dues au trafic, et menacées d'une destruction totale.

On a tenté de résoudre le problème en reconstruisant la route qui longe la Villa Farnesina (le Lungotevere della Farnesina), en 1970, et en la faisant reposer sur des blocs de caoutchouc sur une longueur de 60 mètres.

D'autres mesures préventives moins importantes sont la régularisation de la surface de la route et l'éloignement du trafic lourd. Dans des cas exceptionnels, des édifices entiers ont été montés sur des suspensions à ressorts.

#### 5.8. BANGS SUPERSONIQUES

Les ondes soniques engendrées par les avions quand ils passent le mur du son ont pour résultat d'exercer une surpression sur les constructions, ce qui peut provoquer des dégâts.

La plus grande surpression que l'on ait enregistrée est de  $2000 \text{ N/m}^2$  (au Nouveau Mexique, en 1962). Les études menées pour le Concorde ont mis en évidence que la surpression provoquée par cet avion devrait toujours être inférieure à  $100 \text{ N/m}^2$ .

La plus forte probabilité de détérioration concerne les objets de surface importante et de masse réduite, qui ne sont pas soumis à des charges importantes et qui ont une résistance à la traction relativement faible. Ceci s'applique donc en premier lieu aux enduits, particulièrement ceux qui ont une mauvaise adhérence, puis au verre, enfin aux toits.

Les dégâts devraient être rares quand les surpressions se situent en dessous de  $500 \text{ N/m}^2$ , mais un effet de "résonance" avec l'onde sonique peut provoquer une amplification de la vibration.

La période des ondes soniques, que l'on appelle souvent l'"intervalle de signature", dépend des types d'avions: pour le Concorde, elle est de 0,35 secondes. Les structures qui ont une fréquence naturelle proche de 3 Hz peuvent donc subir des vibrations amplifiées par la résonance.

Comme dans d'autres cas de vibration, le type d'édifice et son état de conservation ont une importance déterminante sur l'effet que produiront les ondes soniques.

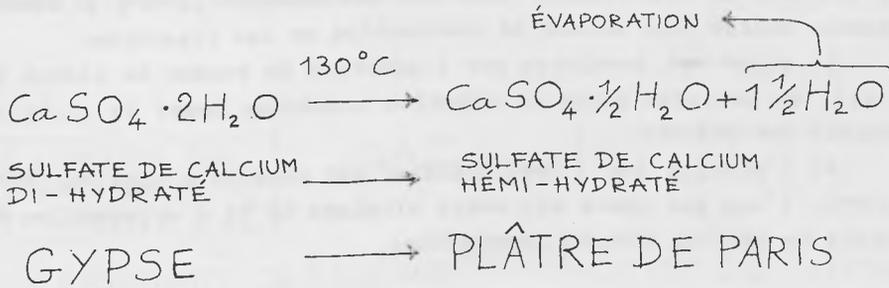


LIANTS

6.1. PLÂTRE

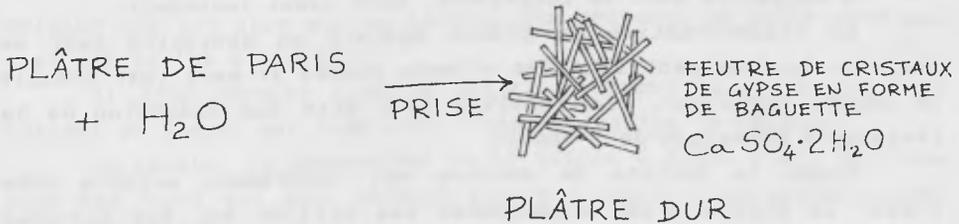
Le plâtre a été utilisé en Egypte à la fois comme mortier entre les blocs de pierre (dans les pyramides) et comme enduit dès le début du troisième millénaire avant J.-C. En Mésopotamie, son utilisation remonte aussi aux époques les plus anciennes.

Les enduits et les mortiers de plâtre se préparent en chauffant le gypse (pierre à plâtre ou roches sélénites, toutes deux composées de sulfate de calcium hydraté) à température modérée.



L'hémi-hydrate est le principal composant du plâtre de Paris que l'on prépare en chauffant l'hydrate à 150-160°C.

Le plâtre de Paris prend vite quand on le mélange à l'eau.



La vitesse de prise est influencée par les conditions dans lesquelles le chauffage a été réalisé. En réalité, il y a deux formes d'hémi-hydrates connues qui ont des formes cristallines différentes, et des vitesses de réaction avec l'eau différentes.

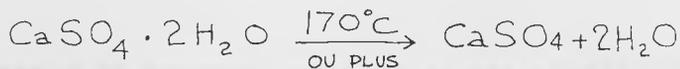
Le  $\alpha$ -hémi-hydrate que l'on appelle hémi-hydrate cristallin. Il est préparé par chauffage en présence de vapeur d'eau à haute pression dans une autoclave. Il est bien cristallisé et pas très poreux. Il réagit plus lentement avec l'eau que :

le  $\beta$ -hémi-hydrate, appelé hémi-hydrate microporeux qui est préparé en atmosphère sèche; ses cristaux sont plus petits et contiennent des pores de relativement grandes dimensions. Il réagit plus rapidement avec l'eau.

Durant la réaction de prise, le matériau s'échauffe et perd un peu d'eau par évaporation; pourtant, cette réduction de volume est compensée par l'expansion des cristaux provoquée par l'hydratation, donc la prise du plâtre se produit avec une légère expansion (ce qui est pratique pour faire des moulages). Il n'y a besoin d'aucune charge pour éviter la contraction et les fractures.

La prise est accélérée par l'addition de poudre de plâtre ou de sel, et retardée quand un matériau organique comme la colle ou l'amidon est présent.

Si l'hydrate (ou l'hémi-hydrate) est chauffé à plus de 165°C - 170°C, l'eau qui reste est aussi éliminée et il y a formation de sulfate de calcium anhydre (anhydrite).



PLÂTRE

ANHYDRITE

L'anhydrite peut se réhydrater, mais assez lentement.

La transformation de plâtre hydraté en anhydrite peut se produire spontanément sous des climats chauds et secs (par exemple le désert égyptien). Le résultat peut être une réduction de la résistance mécanique de l'enduit.

Comme le sulfate de calcium est légèrement soluble dans l'eau, le plâtre n'est normalement pas utilisé sur des surfaces exposées aux intempéries sous des climats humides.

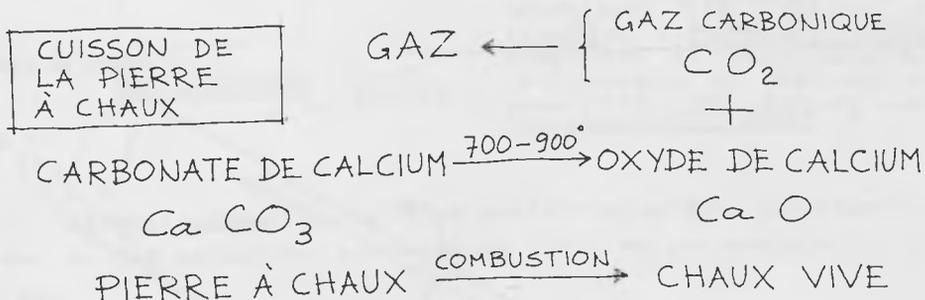
## 6.2. CHAUX

L'utilisation de la chaux à l'âge néolithique est prouvée par la découverte de quelques enduits de chaux.

Aux époques historiques, les enduits de chaux apparaissent avec les civilisations mycénienne et minoenne (Palais de Knossos, 1700 av. J.-C.).

L'utilisation de la chaux en Egypte commence assez tard (époque des Ptolémées, 300 av. J.-C.). Certains enduits plus anciens contiennent à la fois du carbonate de calcium et du sulfate de calcium, probablement préparés à partir de mélange de minéraux pouvant donner soit de la chaux, soit du plâtre. Cependant, la chaux doit être préparée à des températures bien plus élevées que le plâtre de Paris. Par conséquent, l'éventualité d'une technologie de la chaux est peu probable dans ces cas là.

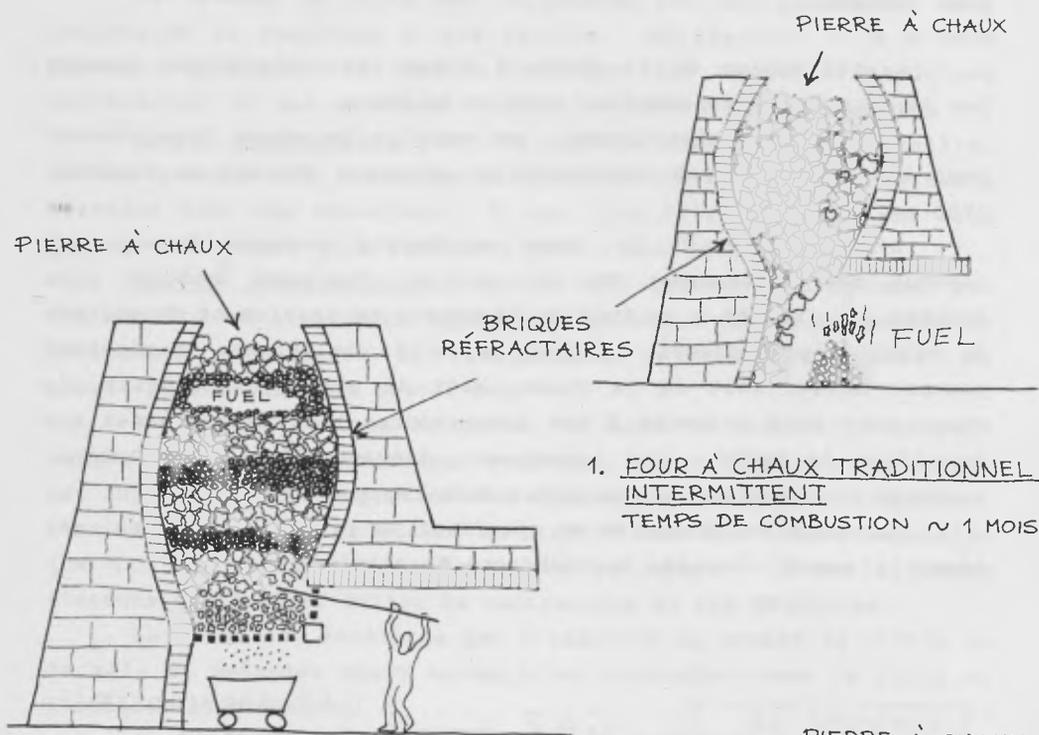
La chaux est préparée en chauffant la pierre à chaux qui est essentiellement composée de carbonate de calcium.



Le marbre ne convient pas comme source de carbonate de calcium car ses gros grains forment des grumeaux de chaux vive qui sont difficiles à éteindre.

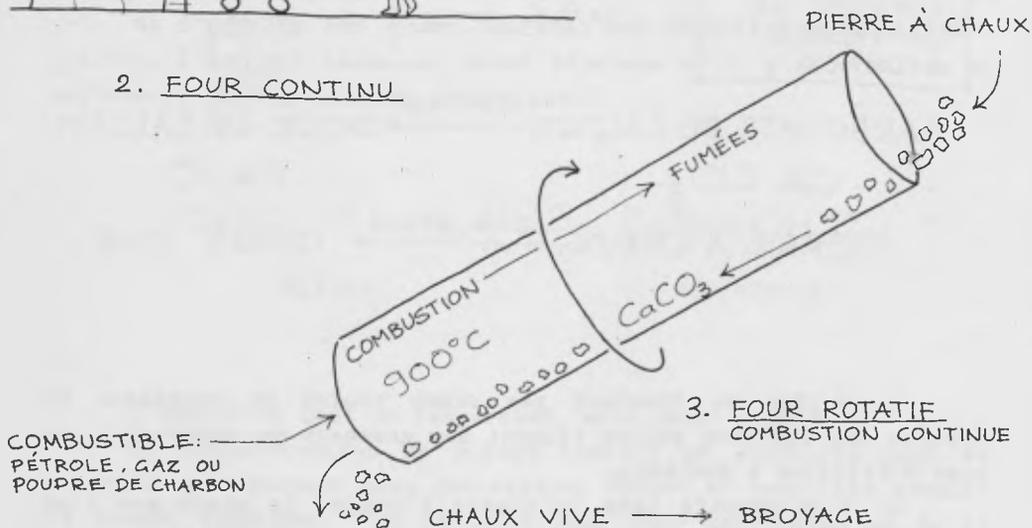
Si l'on chauffe trop la pierre à chaux, la chaux que l'on obtient ne réagit pas bien avec l'eau (formation de pétards).

Autrefois, la combustion de la pierre à chaux était réalisée dans des fours qui sont devenus progressivement plus perfectionnés (cf. Figure 8).



1. FOUR À CHAUX TRADITIONNEL INTERMITTENT  
 TEMPS DE COMBUSTION ~ 1 MOIS

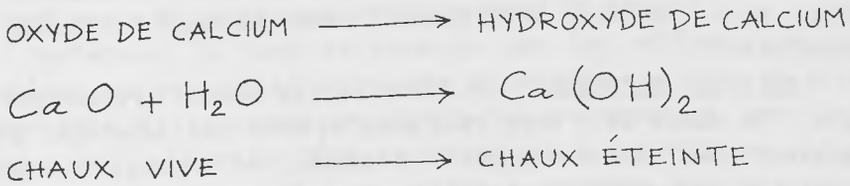
2. FOUR CONTINU



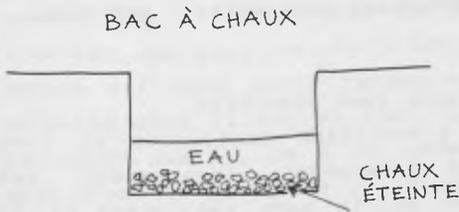
3. FOUR ROTATIF  
 COMBUSTION CONTINUE

FIGURE 8. FOURS À CHAUX

La chaux éteinte est produite par la réaction de la chaux avec l'eau.

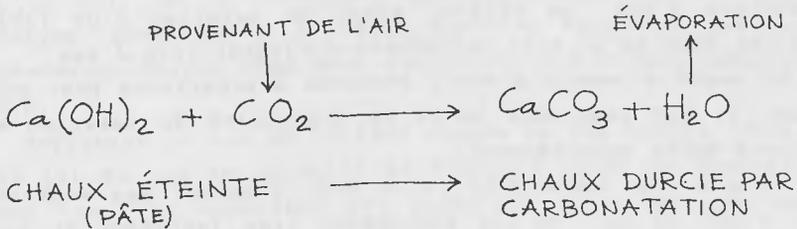


La réaction dégage de la chaleur. La qualité du produit dépend de l'attention mise dans la réalisation de cette opération. Si l'on utilise la quantité d'eau équivalente à la quantité de chaux vive, on obtient une poudre d'hydroxyde de calcium (poudre de chaux hydratée). Si on utilise un excédent d'eau, on obtient une masse grasseuse et plastique (pâte de chaux).



La chaux était éteinte dans des fosses à chaux, où on pouvait la garder pendant plusieurs mois ou plusieurs années. Une longue permanence dans l'eau favorise la formation de grands cristaux tabulaires de chaux hydratée (Portlandite) et améliore la plasticité du mortier de chaux.

Le durcissement de la chaux éteinte se produit par réaction avec du gaz carbonique provenant de l'air et par évaporation de l'eau.



La chaux a donc besoin du contact avec l'air et d'un assèchement progressif pour son durcissement. La perte d'eau entraîne une contraction du volume. La chaux éteinte n'est jamais utilisée seule, mais toujours additionnée d'une charge qui évite les craquelures.

Mortiers de chaux - Le sable est la charge typique pour la chaux. Le sable doit être lavé pour enlever les sels (qui provoqueraient des efflorescences), l'argile ou d'autres matériaux organiques (qui retarderaient le processus de durcissement).

Voici quelques formules typiques.

	Parts en volume	Parts en poids
chaux éteinte	1	15
sable	2 - 3	100
eau	quantité nécessaire pour obtenir une pâte	

Il faut mélanger les ingrédients avec précision.

Les mortiers de chaux se travaillent facilement si l'on ajoute une quantité d'eau assez généreuse. Inversement, les propriétés mécaniques des mortiers durcis sont améliorées si la quantité d'eau est réduite.

On peut pourtant obtenir une chaux qui se travaillera plus facilement, sans perte de résistance trop sensible, si l'on utilise des fluidifiants (que l'on appelle aussi réducteurs d'eau parce qu'ils permettent de réduire la quantité d'eau sans réduire la plasticité du matériau).

Si l'on mélange énergiquement, ce qui entraîne une meilleure introduction d'air, on obtient aussi un matériau plus facile à travailler sans qu'il soit nécessaire d'ajouter trop d'eau.

Un maçon a besoin d'avoir beaucoup d'expérience pour pouvoir réaliser un bon compromis entre la plasticité du matériau et sa résistance après durcissement.

Il y a une autre difficulté dans l'emploi des mortiers de chaux; c'est le fait qu'ils durcissent très lentement et peuvent même ne pas durcir du tout en atmosphère très humide (l'assèchement est nécessaire au durcissement).

Ces difficultés limitent de nos jours l'utilisation des mortiers de chaux purs et encouragent l'adjonction de composants hydrauliques qui permettent une prise rapide même en milieu humide (mélange chaux et pouzzolane, mélange chaux et ciment).

Toutefois, il faut se rappeler que les mortiers de chaux présentent des propriétés mécaniques et physiques proches de celles des mortiers utilisés dans les maçonneries anciennes et, pour cette raison, leur utilisation dans la restauration des édifices anciens est très souhaitable, si l'on arrive à résoudre les difficultés inhérentes à leur technologie.

### 6.3. MORTIERS HYDRAULIQUES

Les mortiers hydrauliques durcissent par réaction chimique avec l'eau. La réaction ne nécessite pas la présence d'air. Les mortiers préparés avec des composants hydrauliques durcissent même sous l'eau et, une fois qu'ils sont durcis, ils résistent à l'action destructrice de l'eau et même de l'eau de mer. Leur emploi est pour cette raison adapté aux travaux qui ont à être exécutés dans la mer et dans toute sorte de masses d'eau (ports, barrages, quais), ou à la technique du béton, quand on coule de gros blocs et qu'il est peu probable que l'air puisse rejoindre le coeur du bloc.

La chaux ne peut former de mortiers hydrauliques que par réaction avec la silice ( $\text{SiO}_2$ ) ou l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Cette réaction n'est possible qu'à haute température (ciments modernes) ou, à température ambiante, si on utilise des formes de silice ou d'alumine très réactives (béton romain antique).

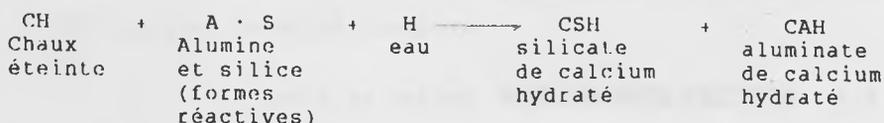
A l'époque hellénistique, (aux environs du IV<sup>e</sup> siècle avant J.-C.), on a découvert que certaines terres, d'origine volcanique, mélangées à la chaux éteinte, formaient des mortiers qui pouvaient durcir même dans des conditions climatologiques très humides.

Reprenant le nom de la plus connue de ces terres (Pozzolana, dérivé lui du nom de la ville de Pozzuoli, près de Naples), on a désigné tous les matériaux qui pouvaient provoquer une réaction hydraulique avec la chaux sous le terme de matériaux pouzzolaniques.

Les matériaux pouzzolaniques naturels utilisés aux époques classiques étaient : la pouzzolane, le tuff de Santorin (îles égéennes), la pierre ponce, le trass (de la région du Rhin).

Ces matériaux contiennent de la silice et de l'alumine sous forme réactive parce qu'ils ont été fondus dans les volcans puis éjectés dans l'air où ils ont été vite refroidis. En conséquence ils ont une structure vitreuse, parsemée de bulles de gaz, qui est amorphe et instable et présente une grande surface spécifique.

La réaction entre la chaux éteinte et les matériaux pouzzolaniques peut se résumer comme suit, en utilisant des formules abrégées comme on fait habituellement dans la chimie des ciments (une liste de ces abréviations est donnée au tableau III).



Les silicates de calcium hydratés forment un réseau de cristaux fibreux ou un matériau amorphe et gélatineux (gel) qui peut être considéré comme la cause principale du phénomène de durcissement du mortier (voir aussi, au paragraphe 6.4., l'illustration des phénomènes de durcissement du ciment moderne).

Des matériaux pouzzolaniques artificiels étaient aussi utilisés aux époques classiques, en particulier les scories de fer et les fragments de briques ou d'autres objets en terre cuite broyées (matériau toutefois moins réactif). Il faut noter que ces matériaux ont aussi été soumis à de très fortes températures et sont donc en partie vitrifiés.

Les matériaux pouzzolaniques sont toujours utilisés dans le domaine de la technologie moderne; les "cendres volantes" sont une addition récente à la liste des matériaux traditionnels. Parfois, des matériaux pouzzolaniques sont ajoutés au ciment moderne pour renforcer sa résistance à l'attaque de l'eau chargée de sulfates en réagissant avec la chaux formée lors de la prise.

L'utilisation de composants hydrauliques a permis d'exécuter des ouvrages immergés dès l'époque romaine et d'adopter la technique du béton coulé dans des coffrages en bois.

B E T O N	R O M A I N	chaux
(mélange très soigné com-		pouzzolane
primé dans les coffrages)		brique fragments de ou tuile

On pouvait produire du béton léger en utilisant un agrégat de pierre ponce à la place des morceaux de terre cuite; on en trouve un très bon exemple au Panthéon de Rome.

Une technologie très élaborée a permis d'obtenir un matériau résistant et durable.

Au Moyen Age, il semble que la technologie des bétons et des mortiers hydrauliques ait été très rarement employée (ou même pas du tout), bien que la technique de construction à parements appareillés et blocage de moellons aurait pu impliquer l'utilisation de matériaux hydrauliques.

Néanmoins, l'information technique sur les mortiers hydrauliques avait été transmise par les oeuvres de Vitruve et se retrouve dans les traités du XV<sup>e</sup> siècle. Au début de la Révolution industrielle, quand le développement des ponts, des routes et des aqueducs a nécessité l'emploi à grande échelle des bétons hydrauliques coulés, les connaissances techniques étaient toujours disponibles mais le matériau était rare.

Lors de la construction, par un architecte anglais, d'un nouveau quai dans le port de Tanger, en 1669, le matériau (pouzzolane) et les consultants ont été importés d'Italie.

Dans les régions du Nord, le trass et les scories de fer étaient employés à la place de la pouzzolane.

La deuxième manière de produire des matériaux hydrauliques est celle basée sur la réaction de la chaux (ou de la pierre à chaux) avec la silice et l'alumine à haute température. On a sans doute dès le Moyen Age que de la pierre à chaux impure provenant de certaines carrières pouvait produire, après combustion, une chaux vive qui devait être mélangée à de l'eau au moment de son utilisation et qui durcissait très vite, même sous l'eau. Il est fait explicitement mention d'une telle pierre à chaux (provenant des Colli Euganei, dans la région de Padoue) de couleur gris-noir, par Palladio (XVI<sup>e</sup> siècle).

L'étude des chaux hydrauliques fit des progrès spectaculaires au cours de la deuxième moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle.

En 1796, Parker breveta un Ciment romain produit par la combustion à une température d'environ 800°C d'un calcaire argileux spécial appelé "Septaria".

Frost (1811) et Vicat (1818) ont produit des matériaux hydrauliques en brûlant des marnes (calcaire contenant des silicates) ou des mélanges d'argile et de craie. Ce produit était appelé chaux hydraulique.

T A B L E A U    I I I

ABBREVIATIONS UTILISEES DANS L'INDUSTRIE DU CIMENT

<u>Nom du composant</u>	<u>Formule chimique</u>	<u>Abbréviation</u>
alumine	$Al_2O_3$	A
oxyde de fer	$Fe_2O_3$	F
chaux vive	Ca O	C
chaux éteinte	$Ca(OH)_2$	CH
silice	$Si O_2$	S
eau	$H_2O$	H
gaz carbonique	$CO_2$	$\bar{C}$
anhydride sulphurique	$SO_3$	$\bar{S}$
silicate tri-calcique	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$
silicate di-calcique	$3CaO SiO_2$	$C_2S$
aluminat tri-calcique	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$
aluminat de calcium et fer	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$
silicate de calcium hydraté*	$CaO SiO_2 \cdot nH_2O$	CSH
aluminat de calcium hydraté**	$CaO Al_2O_3 \cdot nH_2O$	CAH

\* \* \* \* \*

\* Famille de composants avec des rapports C/S et des teneurs en eau variables. Exemple:



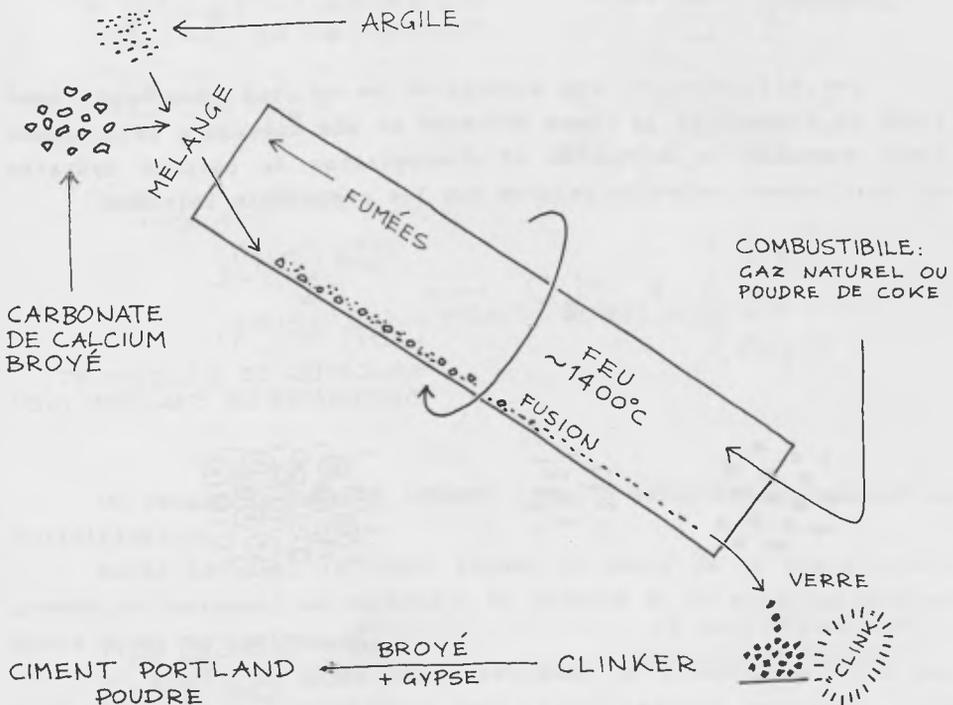
\*\* Famille de composants avec des rapports C/A et des teneurs en eau variables.

#### 6.4. CIMENT PORTLAND

Aspdin (1824, Angleterre) breveta le ciment Portland, préparé en cuisant du calcaire, en l'écrasant, en le mélangeant à de l'argile, et en cuisant de nouveau le mélange à une température qui devait se situer entre 1000°C et 1200°C. Le produit a été appelé ciment Portland parce que ses propriétés étaient censées être semblables à celles de la pierre de Portland. Toutefois, il était encore de qualité inférieure par rapport aux critères modernes.

La découverte technologique qui amena à la mise au point d'un ciment à très haute résistance a été faite par Johnson, un ancien assistant d'Aspdin, qui, en 1838, découvrit que la combustion à beaucoup plus haute température (1400°C à 1500°C) provoquait une fusion partielle des silicates et une vitrification lors du refroidissement.

La fabrication moderne des ciments s'effectue dans des fours rotatifs.

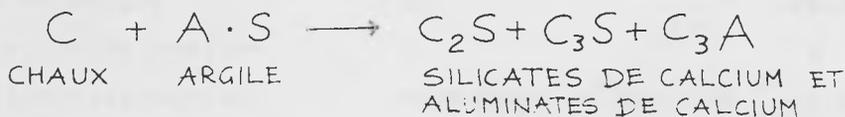


FABRICATION DU CIMENT DANS UN FOUR ROTATIF

Le produit qui sort du four est une masse vitrifiée que l'on appelle "clinker", à cause du son cristallin qu'elle fait en tombant; quand on le broye finement, il réagit rapidement avec l'eau pour former une masse plastique qui devient en peu de temps un matériau dur et cassant.

Bien qu'au bout de quelques jours, le matériau soit déjà tout à fait dur, les réactions de prise continuent à l'intérieur, et les propriétés mécaniques ne cessent de se renforcer; on fait normalement un contrôle au bout d'un mois (bien que l'on puisse aussi faire un contrôle sous six jours, en appliquant ensuite un coefficient de correction).

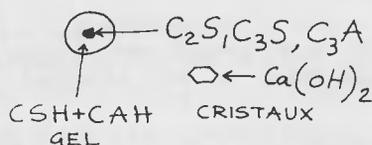
Selon une théorie, maintenant couramment admise, la prise du ciment serait expliquée par la formation dans le four de silicates et d'aluminates de calcium, produits de la réaction de la chaux, résultant de la décomposition des calcaires, avec la silice et l'alumine que contenait l'argile. On abrège la formule ainsi:



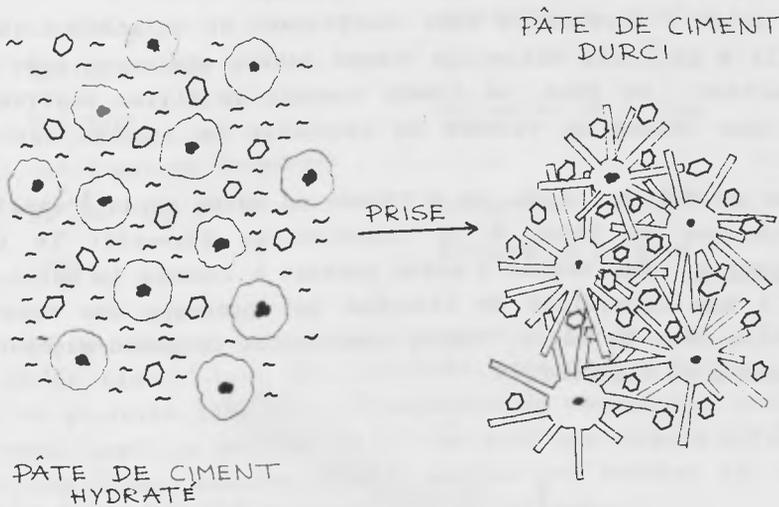
Les silicates et les aluminates de calcium réagissent avec l'eau et forment de la chaux hydratée et une substance gélatineuse (gel) composée de silicates et d'aluminates de calcium hydratés qui contiennent moins de calcium que les composants initiaux.



HYDRATATION DU  
CIMENT PORTLAND



Au cours du durcissement du ciment Portland durcit, l'eau devient très basique (pH de 12 à 13) à cause de la présence de chaux libre. Dans un deuxième temps, l'eau peut pénétrer à travers la couche de gel formée autour des particules solides et la réaction continue à l'intérieur, amenant à la formation de structures fibreuses (composées essentiellement de CSH).



### PRISE DU CIMENT PORTLAND

Un réseau se forme à travers tout le matériau, provoquant sa solidification.

Après séchage, la chaux formée au cours de la réaction est convertie lentement en carbonate de calcium et le matériau atteint alors toute sa résistance.

On ajoute du gypse pour contrôler la vitesse de prise qui peut être trop imprévisible pour l'utilisation courante. Les critères actuels autorisent une addition de gypse hydraté jusqu'à 6 - 7%.

## 6.5. BETON MODERNE

Le béton moderne est fabriqué en additionnant du sable et du gravier (ou de la roche pilée) à du ciment et en mélangeant la masse très soigneusement.

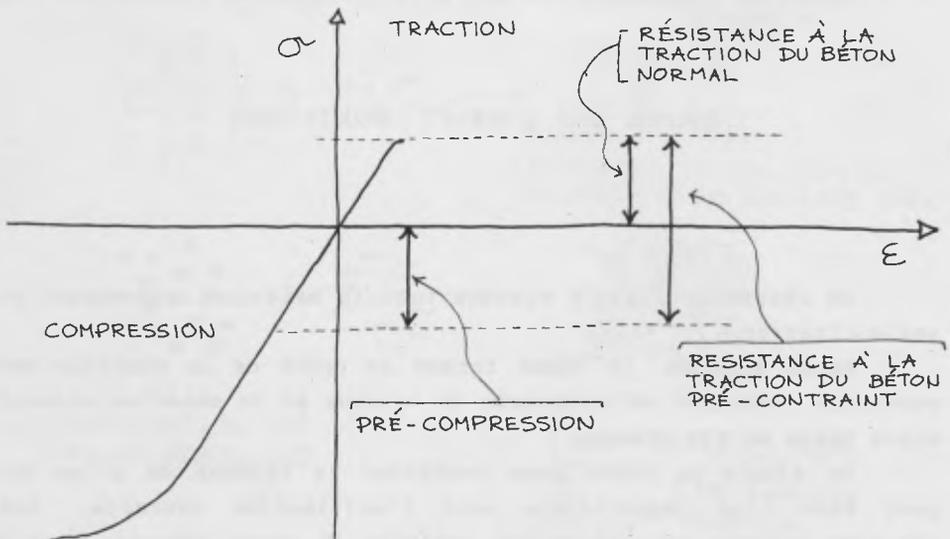
Matériau dur et fragile, le béton peut supporter très bien la compression, mais résiste très mal aux contraintes de traction.

On pallie cette faiblesse en associant de l'acier (matériau très résistant à la traction).

Le béton armé (composé de béton et d'acier) a été inventé en France dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle.

L'acier a presque le même coefficient de dilatation que le béton ( $12 \times 10^{-6}$  par °C) et le ciment adhère également très bien à sa surface. De plus, le ciment fournit un milieu basique (pH élevé) dans lequel la vitesse de corrosion de l'acier est très faible.

Un siècle plus tard, on a trouvé un autre moyen d'améliorer la résistance du béton à la traction en inventant le béton pré-contraint. Des cables d'acier passant à travers le béton sont soumis à une contrainte de traction qui provoque une force de compression dans le béton. Cette compression du béton augmente sa résistance à la traction.



## 6.6. DEFAUTS DU CIMENT PORTLAND

Le ciment Portland ne contient pas seulement des silicates de calcium et d'aluminium, mais aussi du sulfate de calcium (comme on l'a vu) et des sels alcalins provenant des argiles ou des cendres des combustibles utilisés pendant l'opération de combustion (la teneur en alcali du ciment normal peut aller jusqu'à 2%).

En conséquence, un grand nombre de matériaux solubles (ou partiellement solubles) se forment lors de la prise.

$\text{Ca (OH)}_2$	hydroxide de calcium
$\text{Na (OH)}$	hydroxide de sodium
$\text{Na}_2 \text{SiO}_3$	silicates de sodium
(et d'autres formules)	
$\text{Na}_2 \text{SO}_4$	sulfate de sodium
$\text{CaSO}_4$	sulfate de calcium

Si le liquide dans lequel la réaction se produit a la possibilité de migrer dans des matériaux poreux environnants (ce qui peut se produire lors des restaurations de maçonneries anciennes), des détériorations peuvent avoir lieu pour les raisons suivantes:

- (i) des tâches sombres peuvent apparaître, causées par l'action de l'alcali sur certains grès et calcaires;
- (ii) des efflorescences semi-insolubles de carbonate de calcium et de silice peuvent se former (cas de Karnak et Borobudur). Ces efflorescences, inesthétiques et difficiles à enlever, peuvent aussi altérer localement la surface des pierres et des briques (contrainte de cristallisation);
- (iii) des contraintes de cristallisation plus fortes peuvent être provoquées par le sulfate de sodium, sel très soluble.

Des ciments à faible teneur en alcali et en sulfates devraient être préconisés pour la préparation du béton destiné à être en contact avec les matériaux anciens, mais ils ne sont pas toujours faciles à trouver sur le marché. On devrait aussi avoir recours aux hydrofuges pour protéger les matériaux anciens de l'eau du ciment.

Les enduits et les mortiers de ciment sont dangereux si on les applique sur des maçonneries anciennes, pour les raisons suivantes:

- (i) ils peuvent fournir des sels solubles aux maçonneries anciennes;
- (ii) ils ont une porosité faible et n'autorisent que difficilement l'évaporation de l'eau. C'est pourquoi, comme l'eau de pluie finit par pénétrer sous l'enduit grâce aux fissures, une tension peut se créer derrière l'enduit de ciment, soit à basse température (gel) soit à haute température (évaporation). Résultat: l'enduit se détachera facilement du mur ou l'humidité interne de la maçonnerie augmentera;
- (iii) le béton de ciment, matériau à haute densité et à haute conductivité thermique, a aussi tendance à favoriser la condensation. On devrait donc, dans le domaine de la restauration des monuments anciens humides, préférer l'utilisation de bétons à faible densité.

Il faut aussi noter que le béton de ciment pour la consolidation des structures des bâtiments anciens doit être utilisé avec précaution.

En premier lieu, on doit rappeler que le coefficient d'expansion du béton de ciment peut être deux fois plus grand que celui de certaines pierres (marbre, calcaire) ou des briques. Des tensions peuvent donc survenir facilement si l'on ne tient pas suffisamment compte de cette propriété quand on utilise des éléments de béton pour consolider des structures anciennes.

Autre remarque importante, le béton de ciment est un matériau à haute résistance mécanique avec très haut module d'élasticité. Lorsque les monuments anciens subissent une déformation (causée par le tassement du sol, les cycles thermiques, etc.), le béton décharge toutes les contraintes sur les matériaux voisins plus faibles (briques, mortiers, pierres) qui en reçoivent ainsi plus que leur lot habituel. La conséquence peut être une accélération de leur détérioration.

#### 6.7. MORTIERS CHAUX-CIMENT ET AUTRES MELANGES

On peut obtenir des mortiers qui présentent le comportement spécifique des mortiers hydrauliques et une résistance mécanique

suffisante en additionnant une relativement petite quantité de ciment à de la chaux hydratée (par exemple, 1/4 du volume).

Les mortiers constitués d'un mélange chaux-ciment permettent d'éviter les défauts des mortiers de ciment alors que leur utilisation est plus facile et plus fiable que celle des mortiers de chaux pure.

Afin de réduire au minimum la formation de sels solubles, il faudrait autant que possible utiliser du ciment à faible teneur en alcali dans de tels mélanges.

Il y a un autre moyen de produire des mortiers plus compatibles avec les matériaux anciens, dans la mesure où la résistance mécanique est concernée; c'est celui qui consiste à ajouter du carbonate de calcium au ciment. En fait, certaines des "chaux hydrauliques" modernes sont composées de ciment mélangé à une charge inerte.

#### 6.8. ALTERATION DU BETON ET DU BETON ARME

Son imperméabilité à l'eau et sa haute résistance mécanique ont donné aux premiers utilisateurs du béton l'illusion d'avoir affaire à un matériau indestructible. On a fabriqué des pierres artificielles à partir de pierre broyée mélangée à du ciment Portland, et on les a largement utilisées au XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècle pour la restauration des monuments.

La croix sur le toit de Saint-Paul-dans-les-murs à Rome et les chapiteaux du clocher (qui datent des environs de 1875) présentent toutefois une altération avancée due, soit à la corrosion directe par l'eau de pluie acide, soit à formation de croûtes et à la désagrégation, conséquence de la condensation dans une atmosphère polluée.

Des cas analogues sont cités à d'autres endroits.

Le béton de ciment Portland est généralement attaqué par l'eau qui contient des sulfates (par exemple, l'eau de mer), parce que la chaux qui se forme lors de la prise forme un composé avec l'alumine et les sulfates (sulfate de calcium et d'aluminium appelé Ettringite) dont la cristallisation provoque de fortes contraintes internes.

Le béton armé peut se détériorer rapidement si des fissures permettent à l'eau d'atteindre l'armature d'acier. Autour de la fissure la chaux libre est complètement carbonatée et le pH tombe

à un niveau neutre ou acide après un certain temps. La structure d'acier, qui ne se trouve plus protégée par un environnement basique, est alors corrodée et subit une expansion en volume; les tensions internes qui sont produites peuvent provoquer une fissuration supplémentaire du béton et une accélération du processus de corrosion.

On répare souvent le béton fissuré avec des injections de résines synthétiques qui peuvent être très fluides, mais qui durcissent après un certain temps, sous l'action d'un agent durcisseur mélangé à la résine. On peut même refermer complètement de cette façon des fissures microscopiques, restituant ainsi sa résistance au matériau et arrêtant la corrosion du métal.

CONSERVATION DE LA PIERRE

7.1. DIAGNOSTIC

Il faut, avant d'entreprendre quelque traitement que ce soit sur la pierre, étudier le processus de détérioration. Une telle étude comprend toujours l'identification du type chimique et minéralogique de la pierre (à la fois dans ses parties saines et dans ses parties altérées).

La connaissance du nombre et de la distribution des fissures et des pores à l'intérieur de la pierre est essentielle puisque ce sont eux qui autorisent la pénétration de l'eau et le développement des contraintes internes (cf. Chapitre I).

Comme l'eau est un facteur déterminant dans de nombreux processus de détérioration, sa distribution dans la pierre altérée (et dans les structures voisines) devrait être déterminée et des conclusions devraient être avancées quant aux raisons de sa présence (condensation, remontée capillaire, infiltration d'eau de pluie, etc.).

Une étude des conditions d'environnement (variations de température, niveau de pollution de l'air, salinité du sol, vent, etc.) peut fournir des indices supplémentaires pour l'identification du processus de détérioration (par exemple, la cristallisation des sels, le gel, la condensation en atmosphère polluée, l'attaque des algues etc.) Là où l'on peut suspecter une influence déterminante de facteurs biologiques (algues, bactéries, etc.), ceux-ci devraient être analysés.

En général, les mesures de conservation ne devraient être prises qu'après identification même hypothétique du processus de détérioration, de manière à réduire le risque que l'action entreprise ait un résultat nul ou même nuisible à longue échéance.

Comme on l'a démontré dans le premier chapitre, la combinaison de facteurs de détérioration inhérents à la pierre elle-même ou à l'environnement peut avoir pour résultat un grand nombre de processus de détérioration différents et on ne peut par aucun moyen appliquer les mêmes mesures à tous les cas.

## 7.2. NETTOYAGE

La surface d'une pierre doit être aussi propre que possible quand on lui applique un consolidant ou un produit de protection.

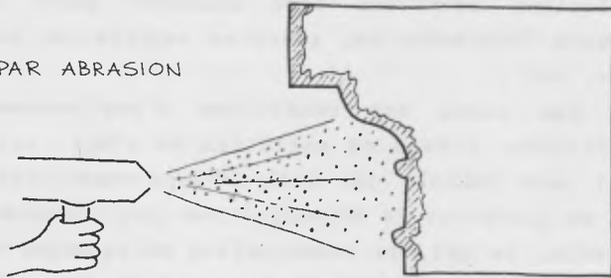
On sait bien aussi que la pierre qui est maintenue propre (par exemple, par la pluie) ne souffre jamais de graves processus de détérioration (bien qu'elle puisse s'éroder lentement).

Malheureusement, de nombreux procédés de nettoyage que l'on utilise largement aujourd'hui provoquent des dégâts sur la surface et constituent des dangers potentiels pour l'avenir. De surcroît, des pertes de matière considérables peuvent survenir si le nettoyage n'est pas réalisé avec la délicatesse nécessaire; ceci est inadmissible si l'on a affaire à des surfaces qui ont une valeur artistique.

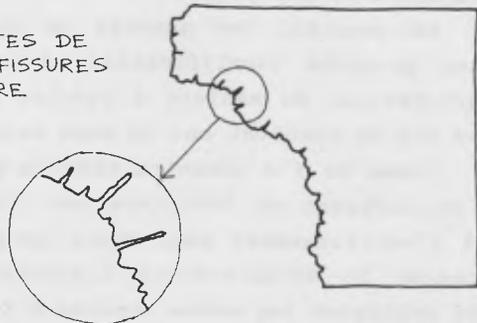
Voici des exemples de méthodes de nettoyage qui peuvent faire des dégâts:

Les acides érodent irrégulièrement la surface de la pierre et provoquent la formation de sels solubles qui peuvent être absorbés par les pores et être sources de contraintes internes.

LE NETTOYAGE PAR ABRASION



PEUT PROVOQUER DES PERTES DE DÉTAILS DE PIERRE OU DES FISSURES À LA SURFACE DE LA PIERRE.



L'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique et l'acide nitrique sont les plus dangereux.

L'acide fluorhydrique et le bifluorure d'ammonium sont moins dangereux pour la pierre (car les sels qu'ils forment sont moins solubles) mais bien plus dangereux pour les opérateurs.

Les substances alcalines (soude caustique ou potasse) provoquent la formation de sels solubles.

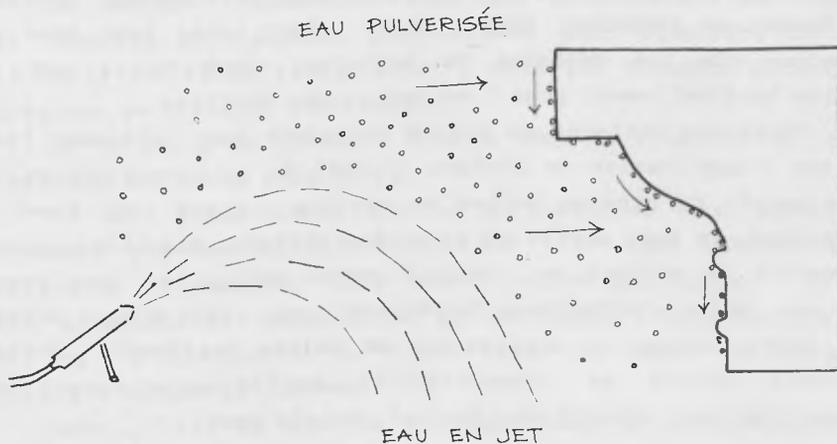
Le nettoyage par abrasion (sablage avec ou sans eau) peut provoquer des pertes de matière et donner de nouvelles surfaces qui, parce qu'elles sont irrégulières et fissurées, ont tendance à se détériorer plus rapidement.

Le ravalement à l'aide d'outils métalliques ou de brosses présente les mêmes inconvénients que l'abrasion, et même à une plus grande échelle.

Les jets d'eau peuvent provoquer une pénétration d'eau en profondeur à l'intérieur de la pierre poreuse, si l'on utilise une grande quantité d'eau. Ceci entraîne une augmentation de l'humidité de la maçonnerie et peut produire ou accélérer un processus de détérioration.

Le nettoyage des pierres d'importance historique ou artistique doit être fait avec grand soin en employant des méthodes qui ont été spécifiquement mises au point pour de tels cas.

Voici des exemples de méthodes applicables aux pierres des monuments.



L'eau nébulisée dissout efficacement les croûtes de suie de la pierre parce que les minuscules gouttes en suspension dans l'air ont une grande surface spécifique et offrent une grande surface de contact quand elles se déposent sur la pierre.

Le micro-sablage est réalisé grâce à un appareil spécial qui envoie un faisceau très fin de particules abrasives avec une force qui peut être modulée en fonction de l'effet désiré. Si on l'emploie convenablement, il peut éliminer les incrustations dures qui résistent aux autres méthodes de nettoyage sans causer de perte de matière ou de dommage mécanique aux surfaces sculptées.

Les compresses d'argile composées d'argiles à très fort pouvoir absorbant, comme l'attapulgite ou la sépiolite, (souvent renforcées avec de courtes fibres de cellulose et mélangées à de l'eau) ont une action lente mais sans danger sur les croûtes de suie et sont particulièrement utiles quand il s'agit d'extraire des sels solubles d'une pierre poreuse.

Les gelées basiques, contenant des bicarbonates et des agents chimiques capables d'enlever les ions calcium et de les maintenir dissous dans l'eau (agents chélateurs ou séquestrants), sont plus actives que les compresses d'argile sur les croûtes très dures. La gelée est composée d'un adhésif soluble dans l'eau (comme le méthylcellulose) ou de gel de silice en particules de la taille d'un micron (silice micronisée); ce qui permet de l'appliquer sur des surfaces verticales ou en surplomb sans risque de voir le liquide couler en dehors de la zone à traiter (effet thixotropique).

Un inconvénient des méthodes délicates de nettoyage applicables aux monuments est qu'elles sont relativement lentes et requièrent un personnel spécialement formé; elles sont donc plus onéreuses que les méthodes de nettoyage commerciales que l'on utilise habituellement pour l'entretien des édifices.

Certaines surfaces de pierre dégradées sont tellement fragiles que l'application de quelque procédé de nettoyage que ce soit entraînerait de grosses pertes de matière. Quand ceci n'est pas admissible, on peut mettre au point des méthodes spéciales au cours desquelles la surface est temporairement consolidée (par exemple avec une résine synthétique thermoplastique) avant d'être nettoyée (par micro-sablage ou application de gelées basiques). Parfois, plusieurs cycles de "consolidation partielle/nettoyage" sont nécessaires pour obtenir un résultat satisfaisant.

### 7.3. CONSOLIDATION

#### 7.3.1 Définition des buts

Par suite de la détérioration, la pierre peut perdre sa cohésion et se désagréger jusqu'à une certaine profondeur. Dans d'autres cas, la pierre peut être fissurée, ce qui facilite le détachement d'éclats ou même d'assez gros morceaux.

Le but de la restauration de la pierre des bâtiments étant d'éviter toute perte de matière, la consolidation (c'est-à-dire la "réinstauration" de la cohésion) est une part essentielle du procédé de conservation lorsque la pierre a perdu sa cohésion et que sa survie est compromise.

Certains procédés de consolidation assurent aussi une certaine protection, car ils améliorent la résistance de la pierre aux agressions de l'environnement. Toutefois, ceci n'est pas toujours vrai et il vaut mieux considérer en général que toute pierre qui subit une intervention de consolidation a encore besoin d'un traitement de protection.

La pierre exposée à un environnement agressif devrait être protégée par une couche protectrice sacrificielle régulièrement renouvelée, afin d'assurer qu'aucune attaque ne puisse affecter la masse du matériau original (ou consolidé).

#### 7.3.2 Imprégnation

Le produit consolidant (qui est généralement un liquide) doit pénétrer suffisamment profondément pour atteindre le noyau sain de la pierre et le rattacher à tous les éléments altérés qui pourraient se détacher facilement.

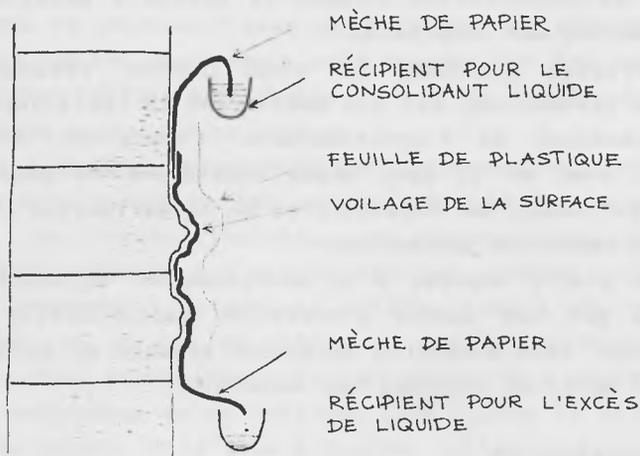
Si la perte de cohésion affecte même le coeur de la pierre, la pénétration devra être totale.

Il est relativement facile de réaliser une pénétration convenable sur des objets isolés que l'on peut transporter en laboratoire et immerger dans une solution appropriée. On peut aussi augmenter la pénétration en réalisant l'imprégnation sous vide, car l'élimination de l'air dans les pores de la pierre facilite l'entrée du liquide.

Dans le cas de pierres qui sont liées à la structure d'un édifice, que l'on ne peut donc ni déposer ni transporter en atelier

pour traitement, il existe quand même des méthodes qui permettent d'obtenir une imprégnation en profondeur avec des consolidants liquides. Par exemple, la technique par voilage au papier, dans laquelle des feuilles de papier sont fixées à la surface de la pierre grâce à un adhésif léger.

Le voile de papier est ensuite humidifié en permanence avec le liquide d'imprégnation, comme le montre le schéma suivant :



Le principe sur lequel sont fondées de telles méthodes d'imprégnation est de garder en permanence la surface mouillée, pendant plusieurs heures, (même pendant plusieurs jours dans certains cas), et d'éviter toute évaporation du liquide avant qu'il ait fini de pénétrer la pierre en profondeur.

On peut faire le vide même autour de très grands objets ou sur des pans entiers de maçonnerie, en enveloppant leur surface d'une feuille de plastique (ou de caoutchouc) et en créant la succion au moyen d'une valve traversant la feuille. Le liquide consolidant est alors aspiré à l'intérieur de la pierre à travers une partie de la surface laissée découverte.

### 7.3.3 Consolidants de la pierre

On peut répartir les consolidants de la pierre en deux groupes: les consolidants minéraux et les consolidants organiques.

Les consolidants minéraux sont des liquides qui, dans des conditions appropriées, forment une substance insoluble, de nature minérale, qui est capable de relier les cristaux séparés de la pierre détériorée.

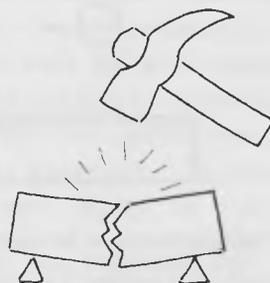
L'action consolidante de ces produits peut être due à la formation de silice hydratée (ce qui est le cas des silicates, cf. Chapitre XI, et des fluosilicates) ou de carbonates de calcium ou de baryum (procédés à la chaux et à la baryte) ou d'alumine (procédé à l'aluminate de potassium).

Certains consolidants minéraux forment des sels solubles qui sont le produit secondaire de la réaction de consolidation; un exemple est celui du silicate de sodium et du silicate de potassium. On ne devrait utiliser de tels consolidants que si l'on prend le plus grand soin d'éliminer tous les sels solubles de la pierre après la consolidation.

#### CONSOLIDANTS MINÉRAUX



BONNE RÉSISTANCE AU  
VIEILLISSEMENT SOUS L'EFFET  
DE LA LUMIÈRE ET DE L'OXYDATION



FAIBLE RÉSISTANCE AUX  
CHOCs MÉCANIQUES

Les consolidants organiques sont souvent composés de résines synthétiques thermodurcissables (cf. Chapitre X) qui sont appliquées à la pierre sous forme d'un liquide mélangé à un durcisseur

qui provoque la prise à l'intérieur des pores et des fissures de la pierre. On utilise dans ce but les résines époxyde et polyester: on les mélange souvent à des solvants qui réduisent la viscosité, retardent la prise, et évitent que les pores de la pierre soient complètement bouchés par la résine (ce qui n'est en général pas souhaitable).

Les consolidants organiques améliorent les propriétés mécaniques de la pierre mais eux-mêmes se détériorent lentement sous l'action de l'oxygène et de la lumière.

### CONSOLIDANTS ORGANIQUES

IMPREGNATION AVEC DES  
RÉSINES THERMO-DURCISSABLES



SANS SOLVANT, REMPLISSANT  
LES PORES ET LES FISSURES  
DE LA PIERRE



AVEC SOLVANT



REVÊTEMENT DE RÉSINE

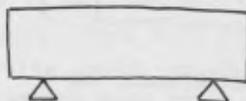
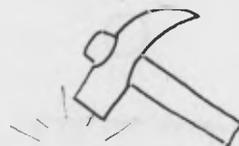
PONT DE RÉSINE

ESPACE VIDE

CAS IDÉAL



DÉTÉRIORATION DE SURFACE PAR  
VIEILLISSEMENT DUE À L'OXYGÈNE  
ET LA LUMIÈRE



BONNE PROPRIÉTÉS  
MÉCANIQUES

Les matériaux organiques à l'intérieur des pores peuvent pourtant durer très longtemps parce qu'ils sont protégés des principaux agents d'altération climatologiques.

Les silicones sont de nature en partie organique et en partie minérale (cf. Chapitre XI) et constituent donc un compromis entre les deux groupes de consolidants.

Leur propriété la plus utile est le pouvoir hydrofuge qu'ils donnent aux matériaux sur lesquels ils sont appliqués.

L'eau entrant en jeu dans la plupart des processus de détérioration, cette propriété hydrofuge est un facteur important pour la réduction de la vitesse de détérioration.

Cependant, les silicones sont eux aussi oxydés par l'oxygène et la lumière, même si leur altération est plus lente que celle des résines thermodurcissables.

Des consolidants provisoires sont utilisés quand on veut réaliser une consolidation urgente, mais que l'on n'a pas encore pris la décision finale quant au type de consolidant à choisir. Ce sont principalement des résines thermoplastiques (cf. Chapitre X) que l'on utilise dans ce cas.

Les résines thermoplastiques ne pénètrent pas facilement dans les petits pores parce que leurs molécules sont très grosses; leurs propriétés mécaniques sont aussi inférieures à celles des résines thermodurcissables. Cependant elles sont réversibles, c'est-à-dire qu'elles restent solubles dans les solvants appropriés, alors que les résines thermodurcissables, les silicones et les consolidants minéraux sont des matériaux irréversibles (c'est-à-dire insolubles). De surcroît, certaines résines thermoplastiques, les résines acryliques en particuliers, sont beaucoup plus résistantes à l'oxydation que les résines thermodurcissables.

Le problème du choix du consolidant qui sera le plus adapté à un cas donné d'altération de pierre n'est pas facile à résoudre.

On fait souvent ce choix en se fondant sur des essais comparatifs de vieillissement menés sur la pierre en question. Au cours de ces essais, on soumet simultanément aux mêmes cycles de vieillissement des échantillons de pierre non traitée et des échantillons de pierre traitée selon différentes méthodes, et on compare les résultats.

Le choix du procédé dépend parfois du type de pierre: on traite souvent les grès avec des consolidants formant de la silice alors que l'on préfère, pour les pierres calcaires, les consolidants qui forment des carbonates de calcium (ou de barium).

Les silicones et les résines thermodurcissables sont, eux, utilisés pour n'importe quel type de pierre.

#### 7.3.4 Adhésifs et mastics

Les procédés de consolidation ne permettent pas de combler des vides qui ont plus de quelques dixièmes de millimètres de largeur; c'est pourquoi ils ne peuvent jamais ni restaurer l'adhésion de gros fragments entre eux, ni empêcher l'eau de pénétrer dans une fissure.

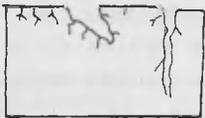
Pourtant, une exigence fondamentale en conservation est que la pierre présente une surface compacte face à l'environnement et que les liquides agressifs ne puissent pas pénétrer.

C'est pourquoi toutes les fissures et autres discontinuités de la surface doivent être comblées avec une substance adhésive appropriée pour améliorer la résistance mécanique et éliminer les éventuelles voies d'accès de l'eau à l'intérieur de la pierre.

Les résines thermodurcissables, à l'état fluide ou modérément additionnées d'une charge pour obtenir une pâte, peuvent servir d'adhésif pour combler des fissures fines (le matériau que l'on a le plus utilisé jusqu'ici sont les résines époxydes).

Pour combler de larges fissures, on emploie des mastics composés d'une charge (souvent la pierre elle-même, broyée) et d'un liant, soit organique (résine synthétique) soit minéral (la chaux, la chaux hydraulique ou le silicate d'éthyle sont les produits préférables).

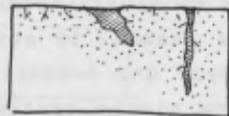
### TRAITEMENT DES FISSURES



PIERRE FISSURÉE  
ET DÉTÉRIORÉE



PIERRE  
CONSOLIDÉE



REMPLISSAGE PAR UN  
MASTIC

## 7.4. PROTECTION

### 7.4.1 Films de surface

L'application de couches de protection sur la pierre était un procédé tout à fait courant dans le passé. On utilisait dans ce but les huiles siccatives (comme l'huile de lin), les graisses animales, les cires et les paraffines.

Un film protecteur ne devrait s'appliquer que sur une pierre propre et en bon état; en fait, le traitement s'applique au mieux sur la pierre non altérée. La pierre altérée doit être préalablement nettoyée, si elle est sale, et consolidée, si elle a perdu sa cohésion.

Les revêtements de surface offrent la meilleure protection aux pierres de faible porosité. Dans le cas de la pierre tendre poreuse, l'eau peut trouver d'autres moyens d'accès dans les maçonneries en contournant la couche de protection. Il peut alors y avoir des contraintes internes, sur les zones de contact entre le revêtement et la pierre.

Aujourd'hui la paraffine, la cire microcristalline (une cire dure dérivée du pétrole) et des résines acryliques sont utilisées comme matériaux de protection de surface.

Les silicones (cf. Chapitre VI) aussi sont parfois utilisés comme protection de surface, en raison de leur bonne résistance à l'eau.

Compte tenu des différences de performance montrées par des produits appartenant à la même famille chimique, il est essentiel de tester les agents de protection de surface avant de choisir celui qui conviendra pour chaque application spécifique. Dans ce cas aussi, les essais comparatifs de vieillissement artificiel sont de la plus grande utilité.

On doit bien comprendre que le revêtement de surface est un matériau protecteur sacrificiel qui a une durée limitée. C'est pourquoi il faut prévoir de répéter le traitement avant l'échéance à laquelle on peut supposer que la défaillance se produira.

### 7.4.2 Contrôle de l'environnement

Le contrôle des propriétés agressives de l'environnement est bien évidemment la meilleure garantie de protection de la pierre.

La manière la plus simple d'y parvenir est de déposer la pierre dans un milieu au climat contrôlé qui, dans le plus simple des cas, est un espace à l'intérieur, chauffé en hiver. Pourtant, ceci n'est pas toujours possible.

On peut assurer une protection temporaire en appliquant un isolant thermique, opaque, contre les surfaces à protéger. Comme celles-ci deviennent évidemment invisibles, on peut prévoir d'enlever la protection à la belle saison quand la pollution atmosphérique et la condensation sont moins actives et qu'il ne gèle plus. Ceci permettra aux visiteurs de voir la pierre et aux responsables de sa conservation de l'inspecter périodiquement.

Les vitrines transparentes sont en revanche potentiellement dangereuses car la température à l'intérieur peut monter à de très hauts niveaux sous l'effet des radiations solaires (effet de serre). L'expansion thermique pourrait alors provoquer des contraintes importantes dans la pierre. D'un autre côté, la climatisation de ces vitrines risque d'être onéreuse et peu fiable.

Les auvents constituent une protection contre la pluie mais pas contre la condensation. Si c'est la solution qui est adoptée, il faudra en plus appliquer une couche de protection sur la pierre.

Une révision complète du système de plomberie dans les bâtiments, le contrôle des remontées capillaires dans les maçonneries, des mesures climatiques permettant d'éviter la condensation sur les surfaces à protéger sont les trois points fondamentaux du contrôle de l'environnement de la pierre. Cependant, de telles mesures sont difficiles à appliquer sur des pierres de valeur artistique situées sur les structures externes des monuments, exposées directement aux agents atmosphériques.

#### 7.4.3 Entretien

Toutes les méthodes de conservation ont une efficacité limitée dans le temps et qui, de toute façon, n'est pas exactement prévisible. C'est pourquoi la préservation des monuments de pierre exige des inspections régulières et l'entretien de tous les systèmes utilisés pour leur protection.

La défaillance des systèmes protecteurs (système d'écoulement des eaux de pluie, revêtements de protection, auvents, etc.), si elle est détectée à temps, peut être réparée avant qu'un processus agressif ne se développe dans la pierre à protéger.

Une politique de protection de la pierre, du type de celle esquissée dans ce chapitre, nécessite de profonds changements dans les structures et les habitudes des services affectés à la conservation; notamment le développement d'équipements pour l'inspection ou le contrôle des surfaces inaccessibles qui doivent être préservées. Le but d'une telle politique est d'éviter le démarrage des processus de détérioration plutôt que de réparer leurs effets grâce à des interventions de restauration spectaculaires.

Les pierres anciennes devraient être considérées comme des malades dans des hôpitaux, ou même mieux comme des malades que l'on soigne dans leur propre maison. On devrait préparer pour chacun d'eux un dossier parce que le malade doit survivre au médecin (ou du moins nous l'espérons), et que le médecin suivant doit avoir connaissance de tous les éléments du problème. Les visites régulières et les interventions d'urgence, quand elles sont nécessaires, devraient constituer la routine médicale confiée aux soins du service de conservation compétent.



ARGILE, BRIQUE CRUE, BRIQUE CUITE

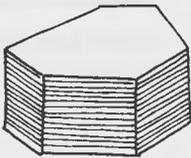
8.1. MINERAUX ARGILEUX

Les argiles sont des minéraux résultant de la dégradation de différents types de roches sous l'effet d'agents atmosphériques.

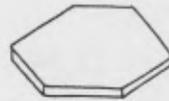
Leurs composants principaux sont l'oxyde de silicium (appelé aussi silice,  $\text{SiO}_2$ ) et l'oxyde d'aluminium (appelé aussi alumine,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Les cristaux d'argile sont très petits (moins de 2 microns) et ont souvent une forme plus ou moins hexagonale.

Chaque cristal est composé d'une série de feuillets (il y en a plusieurs centaines).



CRISTAL D'ARGILE



FEUILLET

Dans les argiles les plus courantes (la Montmorillonite ou l'illite par exemple), le feuillelet est constitué de deux couches de silice entre lesquelles se trouve une couche d'alumine.

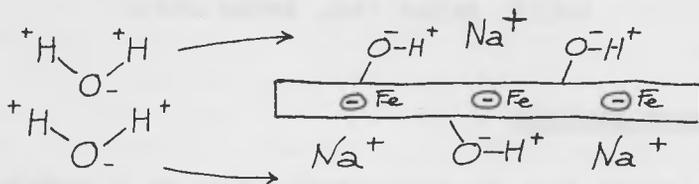
FEUILLET DE  
MONTMORILLONITE  
OU D'ILLITE



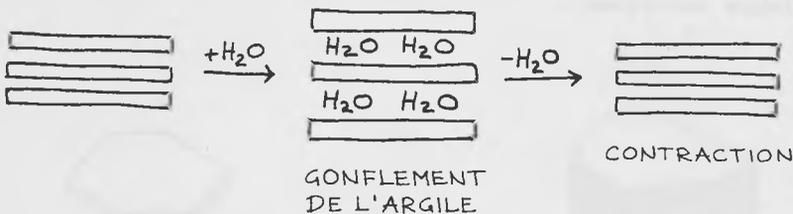
SILICE  
ALUMINE  
SILICE

Les feuillets portent des groupes hydroxyles (-OH) et des charges négatives dues à la présence d'impuretés; par exemple, le fer (trois charges positives) peut prendre la place du silicium (quatre charges positives) provoquant ainsi un excédent de charges

négatives. (C'est le fer qui provoque la coloration jaune ou rouge de l'argile cuite, et la couleur verte des argiles fondues.)



Pour cette raison, des ions positifs, comme le sodium dans la Montmorillonite, sont souvent emprisonnés entre les feuillets, et l'eau, attirée par les groupes hydroxyles, a tendance à pénétrer le cristal.



La conséquence de la pénétration d'eau sera une augmentation de l'écart entre les feuillets, et donc un gonflement de l'argile. Quand l'atmosphère est sèche, l'eau s'évapore et l'argile subit une contraction.

L'Illite contient du calcium entre ses feuillets, ce qui assure une attraction plus forte entre eux. C'est pourquoi l'Illite subit un gonflement moins prononcé.

Le Kaolin est une argile très pure qui ne contient pas de fer et dont le feuillet est constitué de deux couches (une de silice et une d'alumine).

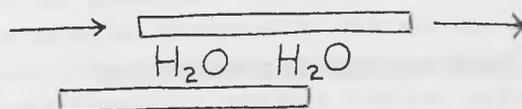


FEUILLET DE KAOLIN

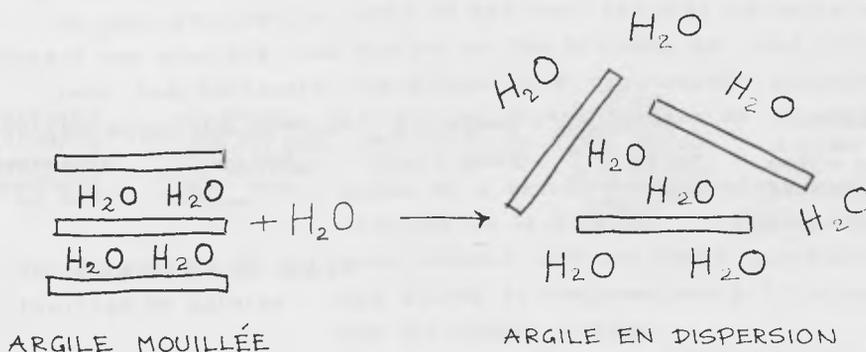
Par conséquent, il n'y a pas de charge négative entre les feuillets et aucun ion n'y est emprisonné. Les feuillets restent soudés entre eux par des liaisons hydrogènes relativement fortes, et l'eau ne peut pas les séparer.

Pourtant, il arrive que le kaolin subisse un petit gonflement, car l'eau est attirée vers la surface des cristaux plats et minces et parvient à les séparer.

Toutes les argiles sont plastiques quand elles sont mouillées parce que leurs cristaux minces glissent facilement les uns sur les autres sous une faible pression.



Si l'on ajoute encore plus d'eau à l'argile déjà mouillée, elle sera complètement dispersée.



## 8.2. TERRE

La terre contient des minéraux argileux et d'autres minéraux (feldspath, carbonate de calcium, quartz, etc.) dont les particules sont habituellement plus grosses que celles de l'argile. On classe

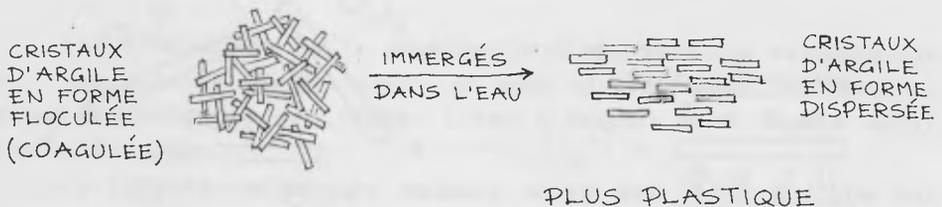
généralement les composants de la terre en fonction de leur taille, et cela donne le schéma suivant:

argile	:	taille de la particule: moins de 2 microns
limon	:	2 microns - 20 microns
sable	:	20 microns - 2 millimètres (2000 microns)
gravier	:	plus de 2 millimètres

Un sol riche en argile est plastique et gras au toucher; il subit des contractions prononcées sous l'effet de l'assèchement et se fissure. Un sol riche en sable n'est pas plastique et il est sec au toucher.

### 8.3. LA TERRE COMME MATERIAU DE CONSTRUCTION

L'argile est l'élément liant dans la terre. Souvent, ses cristaux sont disposés irrégulièrement dans une forme floculée qui n'est pas très plastique, mais si on la laisse immergée pendant un certain temps, la disposition des cristaux change et passe à une forme dispersée qui est plus plastique.



Pour préparer des matériaux de construction à partir de la terre, il faut que la terre riche en argile soit conservée sous l'eau pendant quelque temps afin d'en améliorer la plasticité.

Les minéraux non argileux sont utiles en tant que charge inerte pour réduire la contraction au moment du séchage et éviter les fissures. On peut aussi ajouter du sable si cela est nécessaire (par exemple, si le sol est trop riche en argile, trop gras).

On peut aussi ajouter d'autres matériaux:

- (a) matériaux organiques fibreux
  - paille de blé ou de riz
  - poil animal
- (b) matériaux organiques peu chers, légèrement adhésifs
  - fumier

Les matériaux fibreux augmentent la résistance à la traction du produit final qui est très basse. En revanche, la résistance à la compression est relativement élevée (10 à 45 Kg/cm<sup>2</sup>).

L'adjonction de matériaux organiques peut améliorer la résistance à l'eau, en provoquant une meilleure connection entre les feuillets d'argile et en entravant la dispersion.

Les briques crues sont fabriquées dans des moules carrés à fond ouvert d'une dimension courante d'à peu près 30 cm et d'une épaisseur de 6 à 10 cm. On prépare généralement un mortier de composition analogue pour monter la maçonnerie.

Dans un autre système ancien de construction, le matériau était travaillé en boules rondes que l'on conservait humides pendant un certain temps et que l'on disposait ensuite en les tassant les unes sur les autres pour obtenir la structure voulue.

On peut utiliser la terre du sol pour préparer un béton en y ajoutant des graviers, des pierres ou des morceaux de terre cuite.

Dans les bâtiments, la brique crue est souvent associée à d'autres matériaux pour pallier les points faibles de ce type de maçonnerie.

- Le bois : quand on a besoin d'une résistance à la traction ou la flexion;
- la natte de : pour obtenir une meilleure distribution
- feuilles de palmier : des forces de compressions à l'intérieur des structures lourdes;
- les cordes de jonc : pour obtenir une meilleure liaison interne dans les structures lourdes;
- les briques cuites : pour assurer une meilleure résistance aux attaques atmosphériques;
- la pierre : dans les fondations ou dans la base des murs qui doivent résister à l'eau.

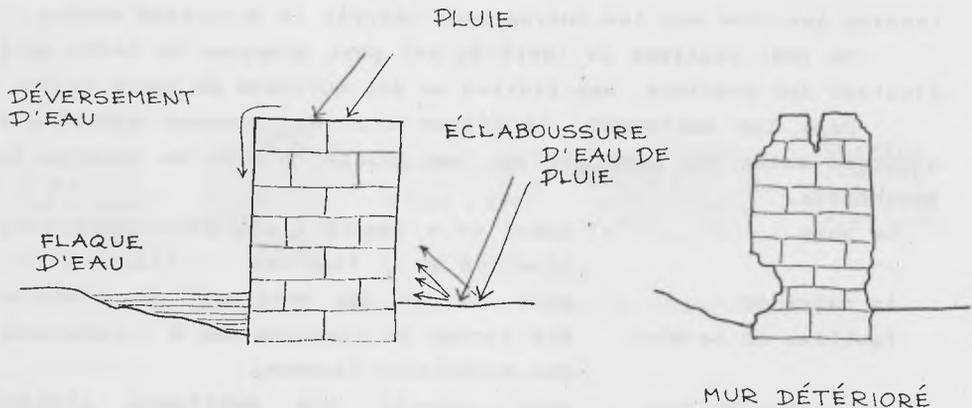
Normalement, la surface des maçonneries de brique crue est recouverte d'un enduit de boue renforcé parfois avec des matériaux fibreux (par exemple, du foin, de la paille de riz ou de blé).

Ce type d'enduit est très vulnérable aux agents atmosphériques et doit être fréquemment réparé (surface sacrificielle).

On a aussi recours à des enduits plus durs, qui résistent mieux aux attaques atmosphériques, comme la chaux et le plâtre. Le danger dans de tels cas est que le coeur du mur peut s'altérer alors que le matériau de surface reste sain et masque donc la détérioration jusqu'à ce qu'elle ne soit plus réparable. Le contrôle et l'entretien n'en sont pas faciles.

#### 8.4. DETERIORATION DES STRUCTURES DE BRIQUE CRUE

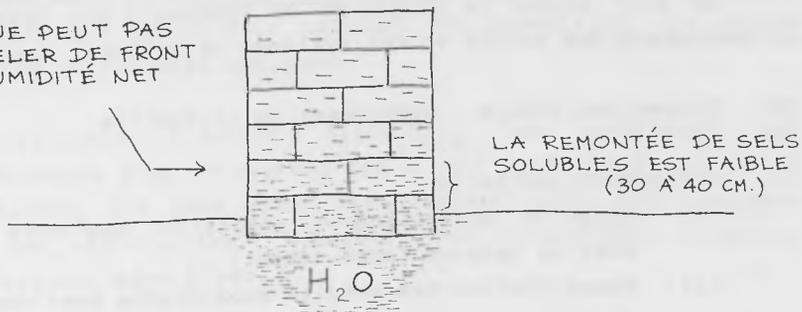
Le principal facteur climatologique de détérioration est la pluie. L'excès d'eau amène une dispersion complète de l'argile et le matériau disparaît dans l'eau. Ceci peut se produire directement sous l'effet d'une pluie exceptionnellement forte, mais plus souvent, d'une manière indirecte quand se forment des ruisseaux ou des flaques qui restent en contact avec les maçonneries.



Le deuxième facteur d'altération, par ordre d'importance, est le vent qui agit surtout par abrasion.

La remontée capillaire dans les briques crues est faible, au contraire donc des briques cuites; elle dépasse rarement les 30 à 40 cm. La teneur en eau varie lentement en fonction de la hauteur dans le mur et on ne peut déceler de front d'humidité.

ON NE PEUT PAS  
DÉCELER DE FRONT  
D'HUMIDITÉ NET



C'est pourquoi la remontée capillaire et la cristallisation des sels solubles ne constituent pas un danger majeur pour les maçonneries de brique crue sauf dans certains cas.

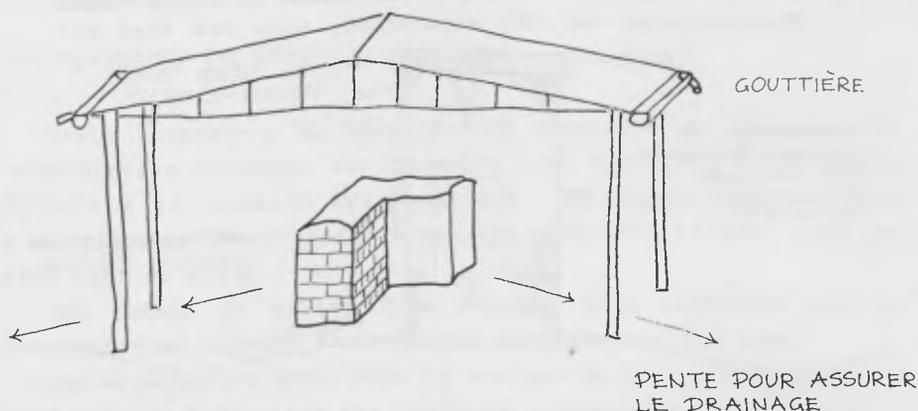
La neige peut être un facteur d'altération potentiel si on la laisse s'accumuler près des murs et qu'ensuite elle fond.

## 8.5. PROTECTION DES MURS DE BRIQUE CRUE

### 8.5.1 Fouilles archéologiques

Les constructions de brique crue sont bien conservées tant qu'elles sont enterrées. On doit les protéger dès qu'on les dégage.

#### (a) Protection totale - auvent



On doit éviter la formation de flaques d'eau près des murs en aménageant des pentes et des systèmes de drainage appropriés.

(b) Protection totale - comblement de la fouille

(c) Protection partielle:

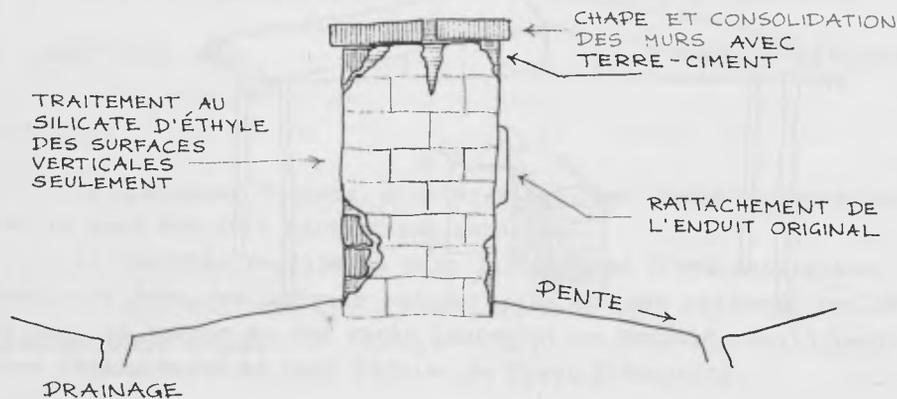
- (i) chape de protection et réparation des murs réalisées avec un mélange terre-ciment;
- (ii) consolidation des enduits subsistants avec des adhésifs (par exemple, émulsion d'acétate de polyvinyle);
- (iii) création d'un système de drainage des eaux de pluie;
- (iv) traitement des surfaces verticales (mais de celles-ci uniquement) avec du silicate d'éthyle.

#### Mélange terre-ciment

- terre riche en argile : 8 parts (volume)
- sable : 1 part
- ciment Portland : 1 part
- paille (hachée finement)
- eau

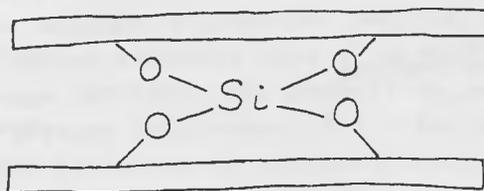
Laisser la terre argileuse immergée dans l'eau pendant quelques jours; ajouter alors les autres éléments. On peut utiliser ce ciment de terre pour faire des briques: dans des moules à fond ouvert que l'on maintient humides pendant une semaine pour permettre la prise du ciment. On les fait alors sécher au soleil.

Le mélange terre-ciment peut aussi être utilisé comme mastic pour de petites réparations ou pour fabriquer de fines chapes.



Le système d'écoulement des eaux de pluie doit être étudié très soigneusement et on doit aménager des gouttières, des pentes et des canaux de drainage adéquats.

Le silicate d'éthyle  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  est hydrolysé par l'eau en présence d'un catalyseur (un acide) et forme de la silice hydratée  $\text{Si}(\text{OH})_4$  qui peut créer des liaisons entre les feuillets d'argile, par réticulation. L'argile ainsi transformée ne pourra plus se disperser dans l'eau.



#### 8.5.2 Constructions au-dessus du niveau du sol

Les édifices construits en brique crue ne peuvent survivre que s'ils sont entretenus en permanence. Les points clés de cet entretien sont les suivants:

- les toits
- les systèmes d'écoulement des eaux de pluie
- les enduits (qui doivent être refaits souvent)
- la base des murs (endommagée par les éclaboussures d'eau de pluie ou les remontées capillaires)

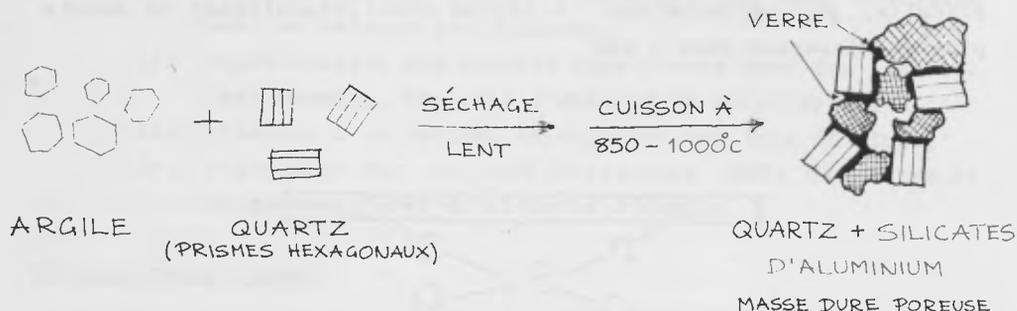
Toute contrainte de cisaillement résultant du tassement de la construction provoque des fissures qui sont dues à la faible résistance à la traction des matériaux. De telles fissures sont très dangereuses si on laisse l'eau les pénétrer; il faut donc les réparer tout de suite.

Les ruines en brique crue doivent être protégées par la restitution d'un toit et d'un système d'écoulement des eaux.

Une alternative peut être le système de protection partielle proposé pour la protection des fouilles archéologiques.

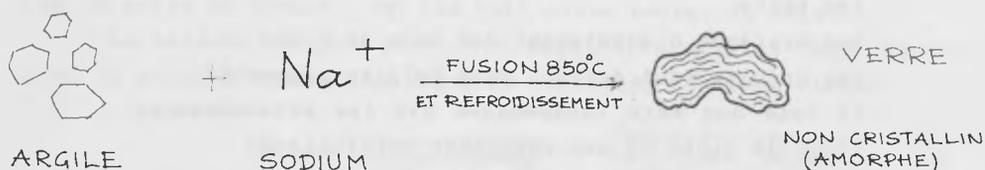
## 8.6. BRIQUE CUITE - TERRE CUITE - PORCELAINE

Les briques cuites et la terre cuite sont préparées à partir de mélanges d'argile (surtout de type Montmorillonite et Illite) et de sable (quartz).



Au cours de la cuisson, les cristaux d'argile sont détruits et il y a formation de silicates d'aluminium cristallins et encore de quartz.

La présence de sodium et de potassium dans l'argile provoque une fusion partielle de l'argile.



En refroidissant, l'argile fondue ne retrouve pas sa structure cristalline. Il se forme à sa place une masse dure, non cristalline (matériau vitrifié, verre).

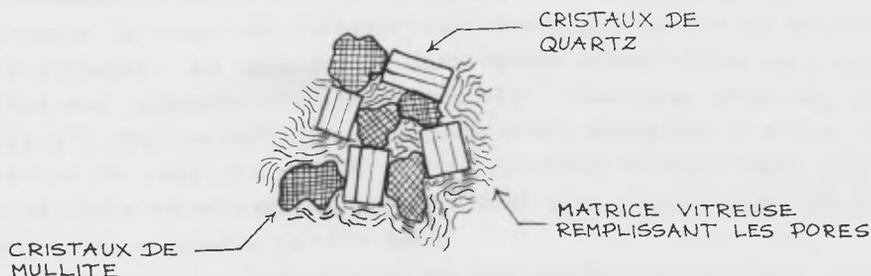
Le verre agit comme un ciment entre les cristaux de quartz et les silicates d'aluminium. En règle générale, il y a formation de verre à chaque fois qu'un silicate fond.

Le taux de vitrification et la résistance de la brique dépendent de la température atteinte pendant la cuisson (et de la composition du mélange). Plus la température est élevée, plus la brique sera résistante.

Comme l'argile contient aussi du fer, le matériau après la cuisson est jaune si on l'a cuit à basse température et rouge si on l'a cuit à haute température et en atmosphère oxydante (avec un excès d'oxygène).

La porcelaine est fabriquée à partir d'argiles très pures (de type kaolin, sans sodium ni fer) mélangées à des sables (de type quartz) et du feldspath (un silicate très riche en potassium). Quand on chauffe ce mélange à une température d'environ 1200°C, la formation d'un silicate d'aluminium (mullite) se produit en même temps qu'une fusion abondante (due à la présence du potassium). Quand le mélange refroidit, la quantité de verre est suffisante pour remplir presque complètement les vides entre les cristaux. C'est pour cette raison que la porcelaine n'est pas poreuse.

### PORCELAINE



Les matériaux de ce genre sont appelés "céramiques". Ils sont en partie cristallins et en partie vitreux. Leur taux de porosité et leur résistance dépendent du type d'argile, de l'adjonction de matériaux contenant du sodium ou du potassium et de la température de cuisson.



DETERIORATION ET CONSERVATION DES MAÇONNERIES

9.1. HUMIDITE DANS LES MAÇONNERIES

L'eau peut pénétrer dans les maçonneries poreuses, soit en phase liquide (succion par contact avec matériaux humides, pénétration de l'eau de pluie) soit en phase vapeur (condensation, condensation intersticielle, adsorption), mais elle en sort presque exclusivement en phase vapeur (évaporation).

Le taux d'humidité d'un mur n'est donc pas seulement déterminé par le fait qu'il soit en contact avec des sources d'eau mais aussi par l'équilibre qui s'établit entre évaporation, condensation et adsorption de vapeur d'eau. En conséquence, la plupart des murs subissent un cycle saisonnier en climat tempéré avec un taux d'humidité maximal à la fin du printemps (après les périodes de condensation d'hiver et de printemps) et minimal à la fin de l'automne (à cause de l'évaporation dominante en été et au début de l'automne). De tels cycles compliquent l'évaluation de l'efficacité des procédés destinés à réduire l'humidité, d'autant plus qu'il y a des variations climatiques d'une année sur l'autre. Le contrôle du taux d'humidité des maçonneries devrait donc porter sur un cycle en entier, si possible pour plus d'une année, ou être répété chaque année à la même date.

L'élimination des enduits ou des couches de peinture imperméable améliore aussi la vitesse d'évaporation et provoque une réduction du taux d'humidité.

Souvent les travaux de réhabilitation des édifices anciens humides ont lieu à la belle saison: les enduits sont éliminés et on prend des précautions particulières pour lutter contre l'humidité. Quand les travaux sont terminés, à l'automne, l'analyse de la teneur en eau montre en général une nette amélioration par rapport aux échantillons prélevés avant le début des travaux (au printemps); donc un nouvel enduit est appliqué et tout le monde est content. Mais on peut déduire de ce que l'on a dit plus haut que, dans de telles conditions, on ne peut pas évaluer l'efficacité des mesures prises pour éviter l'humidité. Il faudra des années pour prouver si, oui ou non, elles ont été efficaces.

Cette remarque a pour but de mettre l'accent sur l'importance d'un diagnostic précis des altérations qui affectent un édifice, avant de prendre des dispositions pour assurer l'assèchement des maçonneries.

Malheureusement, le diagnostic nécessite des mesures de la température et de l'humidité de l'air et des maçonneries, en différents points et à différentes saisons; c'est donc un travail long et coûteux que souvent on préfère éviter en se basant sur l'intuition et l'expérience. Pourtant, comme le dit Massari, quand il s'agit de problèmes d'humidité, la réalité contredit souvent le bon sens, la première supposition étant fréquemment fausse, et une erreur peut aussi coûter très cher.

## 9.2. SELS SOLUBLES DANS LES MACONNERIES

Des sels solubles peuvent être présents dans les matériaux à partir desquels la maçonnerie a été faite (sable, brique, mortier) ou s'y introduire quand l'eau remonte dans les murs à partir du sol ou quand les gaz acides de l'air réagissent avec la surface des murs.

La théorie de la détérioration indique que ces sels peuvent provoquer des dégâts selon au moins deux processus:

- (a) les sels solubles attirent l'eau sous forme liquide (osmose) ou vapeur (hygroscopicité); ils provoquent une augmentation de la teneur en eau critique et entravent en général l'assèchement de la maçonnerie.
- (b) les sels solubles crystalisent sous l'effet de l'évaporation de l'eau et provoquent des efflorescences et des désagréments de la surface.

Dans les villes où il y a d'importants problèmes de sels, comme Venise, on a tendance à éliminer toute la maçonnerie envahie par des sels solubles, et à lui substituer des assises de briques neuves protégées d'une nouvelle invasion de sels par une couche imperméable à l'humidité que l'on aura intercalé dessous. De tels procédés coûtent très cher et il serait souhaitable de développer des systèmes bon marché pour l'extraction des sels.

Il y a quelques années, on a fait une expérience positive à la Tour de Londres en utilisant des compresses d'argile. On

utilise aussi les compresses de papier ou d'argile dans le domaine de la conservation archéologique, pour dessaler les objets trouvés dans des terres gorgées de sels. Une compresse humide est appliquée sur l'objet et on la laisse sécher. Les cristaux de sels se concentrent sur la surface d'évaporation, localisée maintenant sur la compresse; ainsi, quand la compresse est sèche, on peut l'éliminer par brossage en retirant en même temps les sels qu'elle contient. Il faut répéter l'opération plusieurs fois pour les objets épais et on ne sait pas encore si cette technique est applicable, à un prix raisonnable, aux murs chargés de sels.

Il existe une autre méthode qui consiste à laver intensivement à l'eau douce, mais on n'en connaît qu'une expérience qui d'ailleurs n'est pas terminée. L'inconvénient de cette méthode est que l'eau apportée ainsi à la maçonnerie peut poser un problème aussi grave que celui qu'elle était censée résoudre: son élimination après l'intervention risquant d'être coûteuse et difficile.

L'électrodialyse et l'électro-osmose, utilisées avec succès dans d'autres domaines, n'ont été essayées que peu de fois en conservation pour enlever les sels; elles semblent prometteuses même si l'application pratique de ces systèmes électriques aux maçonneries réserve sans doute des difficultés.

### 9.3. LES ENDUITS COMME COUCHE DE PROTECTION SACRIFICIELLE

La couche de surface des maçonneries est exposée aux processus de détérioration les plus actifs: les chocs thermiques, la cristallisation des sels, le gel et l'attaque des gaz acides.

Si l'on applique sur la maçonnerie une couche poreuse et hydrophile, les effets les plus destructeurs du milieu environnant seront concentrés sur cette couche alors que le coeur de la maçonnerie sera protégé.

Dans le passé des enduits étaient systématiquement appliqués sur la maçonnerie; rarement donc, le matériau était laissé à nu, à moins que parfois la pierre, la mosaïque ou la brique de parement n'aient été utilisées comme revêtement de surface.

L'enduit joue le rôle de couche de protection sacrificielle et doit être renouvelé périodiquement quand il a perdu sa fonction parce qu'il est trop détérioré. Cependant, les enduits des monuments historiques sont porteurs d'une information importante et

doivent être préservés avec aussi peu de reprise que possible; on peut y parvenir en ayant recours aux techniques de conservation appropriées.

Malheureusement, ces dernières décennies, il est devenu à la mode de retirer les vieux enduits et de laisser visible la structure de la maçonnerie des monuments historiques. Evidemment, cet usage est criticable du point de vue de la conservation, sans compter qu'il implique la perte de l'information potentielle emmagasinée dans les couches d'enduit original.

Quand on applique un nouvel enduit, en complément ou en substitution complète à un enduit ancien, il faut se rappeler qu'il ne peut réaliser son action de protection sacrificielle que si son réseau de pores est accessible à l'eau liquide et vapeur.

L'utilisation d'un enduit imperméable à l'eau sur des maçonneries anciennes crée une situation nouvelle qui doit être soigneusement analysée avant d'appliquer le produit. En fait, toute protection de surface imperméable aura tendance à se fissurer plus ou moins rapidement, à cause des variations thermiques, interrompant donc la continuité de la barrière contre l'eau. A travers les fissures, l'eau pourra diffuser dans la maçonnerie mais aura surtout tendance à s'accumuler derrière la couche imperméable, à travers laquelle elle ne peut s'évaporer facilement.

Un tel processus peut finalement provoquer le développement de tensions à l'interface enduit - maçonnerie, à cause du gel ou de la cristallisation des sels.

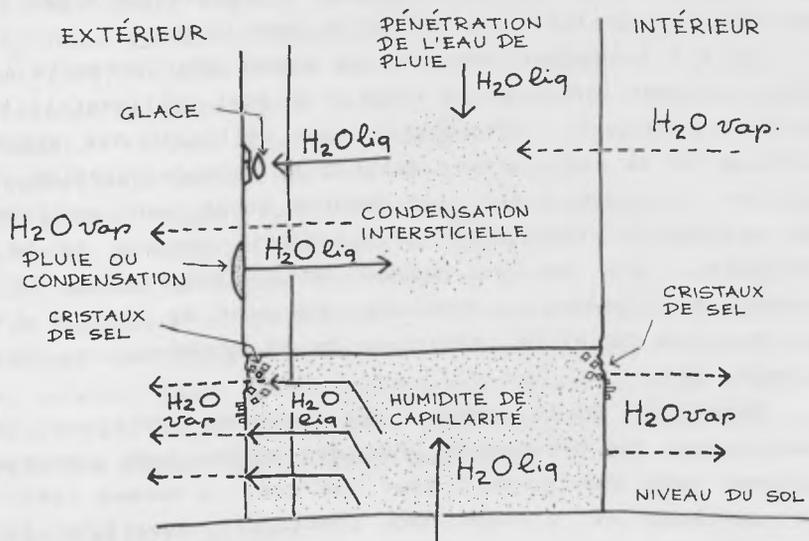
On doit aussi tenir compte d'un autre facteur: si le mur est affecté par une humidité de capillarité, après application de l'enduit imperméable, l'humidité atteindra un niveau plus élevé étant donné que l'évaporation aura été entravée.

On a résumé à la figure 9 les propriétés des enduits poreux et des enduits imperméables.

#### 9.4. ASSECHEMENT DES MACONNERIES

La théorie établit qu'il est très difficile d'extraire l'humidité des pores des matériaux de maçonnerie; encore plus difficile s'il y a des sels solubles.

(a) COUCHE DE SURFACE POREUSE SACRIFICIELLE



(b) COUCHE DE SURFACE IMPERMÉABLE

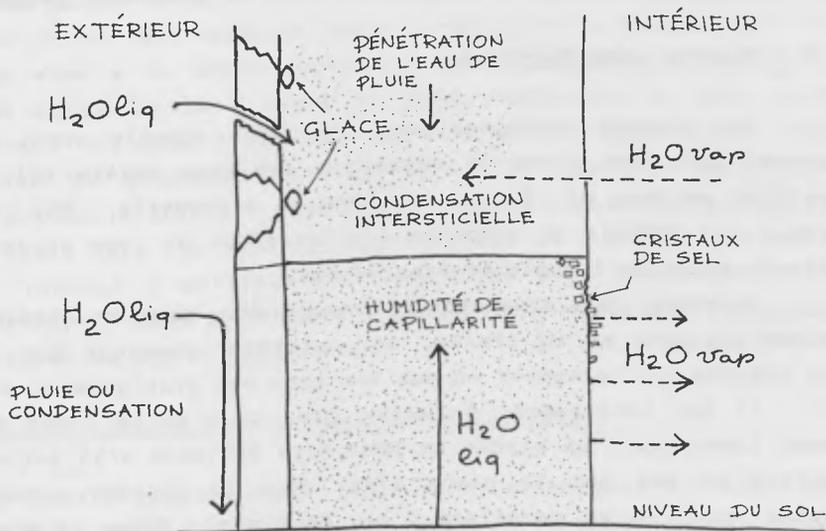


FIGURE 9. ENDUIT

Quand les murs sont extrêmement humides, on peut théoriquement réduire l'humidité en augmentant l'évaporation d'eau et/ou en réduisant la quantité d'eau qui entre dans le mur.

Il y a évidemment beaucoup de moyens pour parvenir à ce résultat, ou pour tenter de le faire. On peut appliquer la première des deux solutions, l'évaporation, en utilisant des systèmes de chauffage ou de ventilation; quant à la seconde solution, le contrôle de l'arrivée d'eau, les mesures qu'on peut appliquer sont plus variées et impliquent un diagnostic correct de la source d'humidité. Ces mesures peuvent être: intercalage de couche imperméable, systèmes de drainage, révision du système d'écoulement des eaux de pluie, réduction de la condensation, extraction des sels, etc.

Récemment, on a proposé des systèmes prétendant réaliser l'assèchement des maçonneries avec des moyens très économiques et efficaces dans pratiquement tous les cas. L'examen théorique de tels systèmes et l'étude des résultats recueillis dans les applications par des observateurs impartiaux permettent de garder un certain scepticisme, même si l'on continue à espérer, contre toute évidence scientifique, que l'assèchement économique soit possible (exactement comme on espère pour le mouvement perpétuel).

#### 9.4.1 Siphons atmosphériques

Les siphons atmosphériques (que l'on appelle aussi siphons Knapen) sont des pipes de céramique que l'on insère obliquement (orifice en bas, cf. figure 10) dans la maçonnerie. Une circulation d'air devrait se produire à l'intérieur du tube et accélérer l'évaporation de l'humidité dans le mur.

Cependant des observateurs impartiaux, tant en France qu'en Grande-Bretagne et en Italie, ont nettement remarqué que l'effet des siphons sur la teneur en eau des murs est pratiquement nul.

Il est intéressant de noter que, si l'on se fonde sur les bases théoriques, un siphon ne peut être efficace s'il est orienté orifice en bas (on le place ainsi dans le système actuel pour éviter qu'il ne se remplisse d'eau de pluie), comme le montre la figure 10. En effet, quand le mur est plus chaud que l'air ambiant, l'air froid ne peut pas pénétrer dans le siphon par le bas, et donc le système ne fonctionne pas.

Quand le mur est plus froid que l'air, le siphon fonctionne puisque l'air froid sortant du mur, s'écoule vers le bas, alors que l'air chaud ambiant remonte dans le tube; malheureusement, dans ces conditions, lorsque l'air entre dans le siphon et se refroidit pour atteindre la température du mur, son humidité relative augmente fortement. Il peut donc se produire une condensation; l'effet d'assèchement sera faible, en tout état de cause.

Un siphon orienté orifice en haut fonctionnerait beaucoup mieux puisque la circulation d'air s'établirait lorsque le mur est chaud (cf. encore la figure 10) comme on a pu l'observer dans les tombes de Tarquinia et de Thèbes. Il faudrait faire des calculs pour évaluer la surface d'évaporation permettant d'obtenir un résultat valable; mais, selon l'impression personnelle de l'auteur, il faudrait sans doute une surface beaucoup plus grande que celle qu'offrent les siphons actuellement utilisés.

#### 9.4.2 Electro-osmose passive

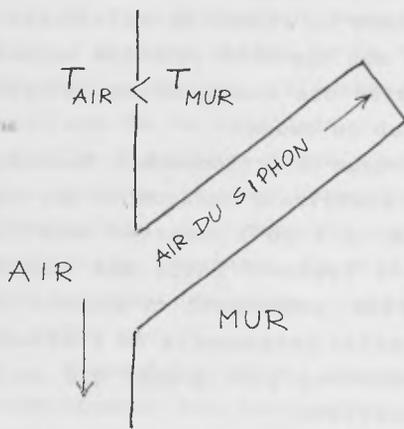
L'électro-osmose passive est basée sur un principe qui n'est pas admis dans la théorie énoncée ici. Il reposerait sur le fait que l'eau serait attirée dans la maçonnerie par une différence de potentiel électrique existant entre la terre et la maçonnerie.

La mise à la terre convenable des murs devrait inhiber la remontée et permettre à l'eau de redescendre dans le sol, ou de s'évaporer. En dehors du fait que l'existence même d'une telle différence de potentiel est douteuse, la remontée capillaire, selon la théorie actuelle, est causée par la liaison hydrogène qui attire l'eau vers les surfaces hydrophiles; on n'a donc pas besoin d'avoir recours à un potentiel électrique pour l'expliquer. En conséquence, la mise à la terre d'un mur ne devrait pas influencer sensiblement la montée capillaire.

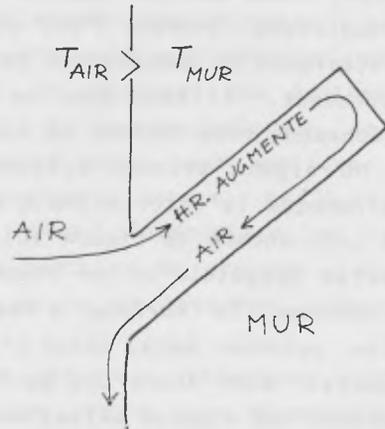
#### 9.4.3 Electro-osmose active (ou électro-cinétique)

L'électro-osmose active (ou électro-cinétique) est basée sur le fait bien établi que, dans un corps hydrophile poreux, l'eau peut être poussée vers le pôle négatif par un champ électrique. Cependant, comme on l'a démontré ici, l'extraction générale de l'eau nécessiterait beaucoup plus d'énergie qu'il n'en faut pour la déplacer et la remplacer par de nouvelles molécules d'eau.

(a) LE SIPHON ORIENTÉ ORIFICE EN BAS N'EST PAS EFFICACE



LE SIPHON NE FONCTIONNE PAS



LE SIPHON FONCTIONNE MAIS L'H.R. À L'INTÉRIEUR AUGMENTE (IL PEUT Y AVOIR CONDENSATION)

(b) LE SIPHON ORIENTÉ ORIFICE EN HAUT POURRAIT FONCTIONNER (MAIS QUELLE DEVRAIT ÊTRE SA TAILLE?)

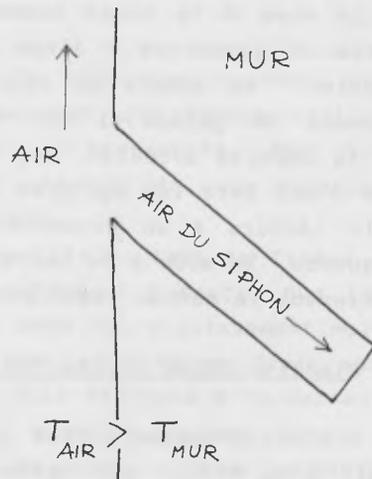
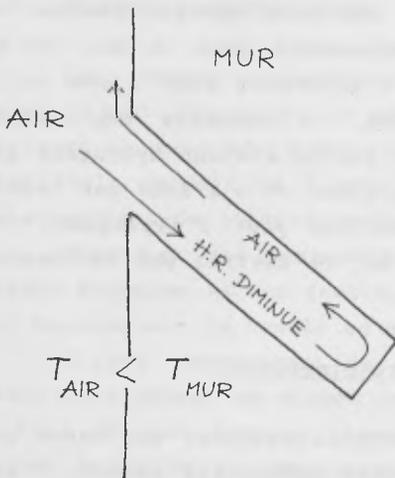


FIGURE 10. SIPHONS ATMOSPHÉRIQUES

L'énergie nécessaire pour parvenir à l'assèchement devrait être de l'ordre de 1 KW/heure par kg. d'eau. On voit mal comment des systèmes à faible voltage et faible courant pourraient fournir, en un temps raisonnable, l'énergie suffisante pour extraire de fortes quantités d'eau; en réalité, un mur de dimensions 4 x 2 x 0,6 m. avec un contenu en eau de 10%, contient 1 tonne d'eau et il faudrait 700 KW/h pour amener à 3% la teneur en eau. D'un autre côté, des systèmes à fort voltage seraient difficiles à mettre en oeuvre et à entretenir.

Il y a une autre difficulté que la théorie dénonce: quand le séchage amène la teneur en eau en dessous du niveau critique (ou niveau III), il y a suffisamment d'interruption dans le réseau des pores remplis d'eau pour arrêter le passage du courant électrique entre les électrodes. L'assèchement par méthode électrique ne devrait donc, en principe, ne jamais être possible en dessous du niveau III.

La présence de sels solubles pourrait agir sur le déroulement du traitement électrique, peut-être de façon positive, parce que les ions augmentent la conductivité de l'eau; et les petits ions positifs pourraient être des porteurs d'eau d'hydratation plus efficaces que les gros ions.

L'effet de l'électrolyse de l'eau pourrait aussi être favorable, surtout si de grandes quantités d'énergie étaient en jeu. En revanche, au bout d'un certain temps, la polarisation des électrodes risque de limiter le mouvement de l'eau.

Il est surprenant de constater que le transfert électrocinétique de produits en suspension ou dissous dans l'eau a très peu retenu l'attention dans ce domaine. On pourrait pourtant l'exploiter, pour créer des barrières d'eau à l'intérieur des corps poreux; par exemple, par le dépôt de molécules en suspension qui, portant une charge positive, pourraient pénétrer dans les petits pores à cause du déplacement électrique des molécules d'eau et former un revêtement hydrophobe à l'intérieur. Une autre voie de recherche possible serait la précipitation de gels sous l'effet de la migration électrique de silicates ou d'aluminates solubles; on espère que de tels précipités puissent obstruer les pores et former une sorte de réseau imperméable à l'humidité.

## 9.5. METHODES INCORRECTES DE RESTAURATION DES MACONNERIES

D'après la théorie de la détérioration telle qu'elle est étudiée ici, de nombreuses techniques employées couramment pour traiter les maçonneries anciennes apparaissent critiquables.

Le premier exemple est celui du nettoyage des maçonneries de briques ou de pierres avec des acides forts ou des alcalis. Le fait que les acides puissent altérer les mortiers de chaux ou de calcaire semble évident puisque le carbonate de calcium (composant essentiel des deux matériaux) est attaqué rapidement par les acides. Ce qui est moins évident, c'est que toute réaction chimique, utilisée pour le nettoyage de n'importe quel matériau poreux, constitue un danger potentiel: en effet, les sous-produits de toutes les réactions sont des sels solubles qui, si on ne les retire pas, peuvent cristalliser dans les pores. Les alcalis (par exemple la soude caustique) produisent inévitablement des carbonates (par exemple des carbonates de soude) qui peuvent cristalliser en cristaux hydratés provoquant de fortes tensions internes, comme on l'a décrit plus haut.

On a aussi démontré que le nettoyage mécanique peut être la cause d'un processus de détérioration du fait de la formation de fractures de surface. La théorie montre que le bon état de la surface est un facteur essentiel, déterminant la résistance du matériau de construction aux attaques de l'environnement.

Dans la mesure du possible, les méthodes de nettoyage devraient éviter d'introduire de nouveaux défauts dans les surfaces traitées. Quand il y a déjà de nombreux défauts, l'utilisation de consolidants ou de revêtements protecteurs devrait toujours être préconisée.

L'eau de gâchage du ciment employé pour les mortiers ou le béton est riche en matériaux basiques (chaux hydratée, soude caustique) et en sels solubles (silicate de sodium, carbonate de sodium, sulfate de sodium) formés lors de la réaction de prise.

Ce liquide peut provoquer des dégâts sérieux s'il a la possibilité de pénétrer les pores des matériaux anciens comme la brique, la pierre ou le mortier dans les maçonneries environnantes. Les efflorescences et les contraintes provoquées par la cristallisation sont la conséquence fréquente de l'utilisation du mortier de ciment ou de béton pour la réparation des vieilles maçonneries.

L'utilisation de mortiers forts, faits avec des bétons au ciment ou de mortiers synthétiques (par exemple les résines époxydes), pour la réparation ou le remaillage des vieilles maçonneries, peut provoquer des dégâts de type mécanique.

Ces matériaux ont une bonne adhésion sur les maçonneries anciennes mais leur coefficient d'expansion thermique est deux fois plus élevé (et même encore plus pour les résines synthétiques) que celui de la plupart des matériaux de construction anciens.

Les mouvements thermiques provoquent ainsi des contrastes et des tensions; comme le vieux matériau est plus faible que le nouveau, c'est toujours lui le perdant dans cette lutte. Ainsi, des fractures visibles et/ou microscopiques se développent tout autour de la zone où le matériau ancien est en contact avec le nouveau, prêtes à jouer leur rôle dans de futurs processus de détérioration.

En règle générale, on peut énoncer le principe suivant: le matériau utilisé pour la réparation doit avoir la même résistance (ou même une résistance moindre) que le matériau original. Comme le prouve la théorie, si le nouveau matériau est plus fort que le vieux, la détérioration des parties anciennes en contact avec les restaurations sera probablement accélérée, ce qui est contraire à l'objectif que la pratique de la conservation devrait avoir.

#### 9.6. TRAITEMENT HYDROFUGE DE SOLIDES HYDROPHILES

Si, par imprégnation en profondeur, tous les pores d'un solide poreux pouvaient être revêtus d'un produit hydrophobe, le matériau deviendrait pratiquement impénétrable à l'eau, même si les pores restaient ouverts. On peut arriver à réaliser une bonne répartition du produit d'imprégnation dans les pores, s'ils sont secs, en utilisant des techniques adéquates; pourtant, le problème devient plus difficile à résoudre si les pores sont déjà remplis d'eau.

Les suspensions ou les émulsions dans l'eau de produits hydrophobes ont une pénétration limitée dans les petits pores parce que les particules en suspension sont grosses. Des injections de silicates solubles dans l'eau (dérivés sodiques des silicones) ont été utilisés pour réaliser des barrières contre l'humidité dans les maçonneries.

Dans ce cas, il peut y avoir des difficultés, du fait que la diffusion de la solution dans l'eau qui remplit les pores est lente et qu'il pourrait s'avérer difficile de parvenir à une bonne répartition si le matériau compte une grande proportion de petits pores.

Des solvants relativement polaires (qui sont donc attirés par les surfaces polaires) mais non miscibles à l'eau (parce qu'incapables de former des liaisons hydrogènes), par exemple les hydrocarbures chlorurés, peuvent être capables de déplacer l'eau de la surface interne des pores, en exploitant en partie la forte tendance qu'ont les molécules d'eau à former des gouttes (forte tension de surface); on utilise ce type de solvants avec succès pour appliquer des revêtements organiques sur des surfaces mouillées mais on n'a pas la preuve qu'ils permettent une imprégnation en profondeur.

Les traitements hydrofuges de surface des solides poreux sont en général plus faciles à mettre en oeuvre et donnent de bons résultats. Ils sont toutefois soumis à au moins deux restrictions importantes: la première est le vieillissement du produit hydrofuge, la seconde est l'éventualité de l'accumulation d'eau ou de sels derrière le film de surface, qui aura pour conséquence des contraintes internes détériorantes.

Le vieillissement des films de surface. Toutes les molécules qui contiennent de l'hydrogène et du carbone (matériaux organiques) s'oxydent quand elles sont exposées à l'air. Ce processus est habituellement déclenché par l'énergie fournie par la lumière ou les radiations ultra-violettes et, par conséquent, est très actif sur la surface des matériaux. L'oxydation provoque la cassure ou la réticulation des molécules et l'addition d'oxygène qui crée des groupes polaires hydrophiles, comme:



L'effet de l'oxydation se traduit souvent par un changement de couleur, une réduction de la résistance mécanique et une perte du pouvoir hydrofuge; au dernier stade de l'oxydation, le produit peut même devenir soluble dans l'eau. Pour les meilleurs matériaux hydrofuges, la vie utile est estimée à 8 ou 10 ans quand ils sont exposés à la lumière et à l'air ambiant; à l'intérieur des pores, cela devrait être pourtant beaucoup plus long puisqu'il n'y a pas de lumière et qu'il y a moins d'oxygène disponible.

Il est important de noter que la résistance à l'oxydation dépend partiellement de la pureté des produits; en effet, une petite quantité d'impuretés facilement oxydables peut être à l'origine d'une réaction en chaîne et transmettre l'oxydation aux molécules plus résistantes. C'est pour cela qu'il est nécessaire de tester le comportement au vieillissement de chaque produit commercial et qu'il est impossible de se fonder sur des jugements généraux qui porteraient sur des familles entières de produits chimiques (par exemple "les silicones ne conviennent pas", "les acryliques résistent bien").

Accumulation d'eau derrière les films de surfaces. L'eau peut s'accumuler derrière un revêtement de surface parce qu'elle peut pénétrer un matériau poreux de tant de manières différentes qu'elle trouvera tôt ou tard le moyen d'y parvenir. L'eau peut entrer par remontée capillaire, l'eau de pluie peut pénétrer par les joints ou les failles du revêtement ou les défauts des systèmes d'écoulement des eaux; la condensation intersticielle peut aussi se produire derrière le film, s'il est appliqué sur la surface d'un mur à l'extérieur et que l'air ambiant à l'intérieur est bien plus chaud que l'air externe. Si le film est en partie ou complètement imperméable à l'évaporation, l'eau accumulée peut geler en produisant des contraintes internes. Si l'évaporation s'effectue lentement, les sels dissous peuvent cristalliser derrière le film, et il y aura des contraintes internes dans ce cas aussi.

L'application d'un film de surface à un matériau poreux requiert donc une étude préliminaire concernant la circulation de l'eau à l'état liquide et vapeur dans les maçonneries, pour éviter les dangers énoncés ci-dessus.



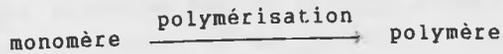
RESINES SYNTHETIQUES

On divise normalement les résines synthétiques en deux groupes:

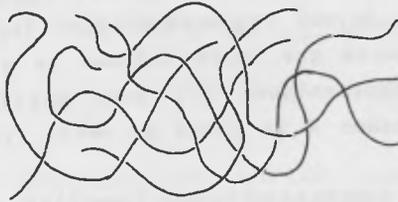
- (a) résines thermoplastiques
- (b) résines thermodurcissables

10.1. RESINES THERMOPLASTIQUES

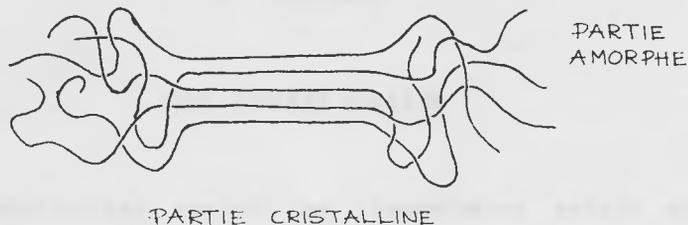
Les résines thermoplastiques sont des solides moléculaires (c'est-à-dire qu'elles sont constituées de molécules). Les molécules sont très longues. Elles sont formées par synthèse à partir d'une petite molécule (monomère) qui peut être additionnée à elle-même un grand nombre de fois (polymérisation) pour former une longue chaîne d'atomes (polymères).



Les longues chaînes sont flexibles et peuvent se disposer dans un désordre complet:

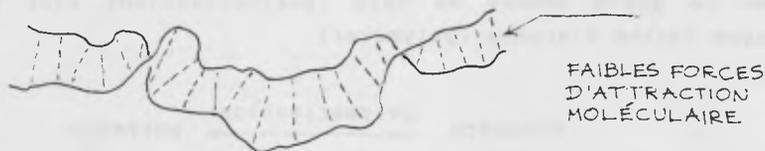


ou, en partie, dans un arrangement parallèle (parties cristallines - cristallites).



La partie cristalline est plus dure mais plus raide, alors que la partie désordonnée (amorphe) permet l'absorption des chocs mécaniques grâce à la flexibilité des chaînes.

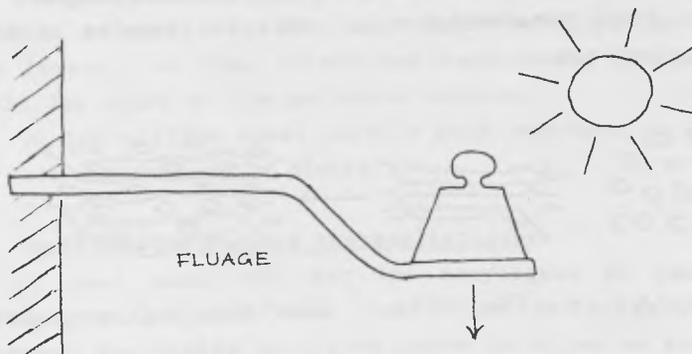
Les longues chaînes sont attirées les unes vers les autres par des forces moléculaires relativement faibles qui permettent une déformation facile du matériau à une température modérée et sous une contrainte modérée.



Au dessous d'une température donnée (température de transition vitreuse) les résines thermoplastiques deviennent aussi rigides que le verre parce que leurs chaînes ne sont plus flexibles. Les matières thermoplastiques qui sont vitreuses à température ambiante sont utilisées à la place du verre (par exemple métacrylates, perspex).

Les matières thermoplastiques flexibles (par exemple polyéthylène, nylon) ont une température de vitrification très basse et sont utilisées comme matériau à très haute résilience (résistant aux chocs) dans les fibres et les films.

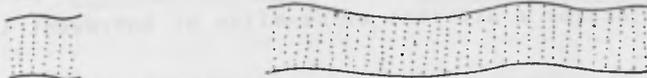
Les résines thermoplastiques ne sont pas des matériaux de structure, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent pas supporter des charges lourdes pendant longtemps.



LES RÉSINES THERMOPLASTIQUES  
NE SONT PAS DES MATÉRIAUX  
DE STRUCTURE

Ce phénomène est dû à la faiblesse des forces qui relient les molécules entre elles; elles cèdent progressivement sous l'effet d'une contrainte continue, entraînant une déformation du matériau plastique (fluage) qui s'accroît constamment avec le temps et peut conduire à la perte totale de résistance.

Les longues molécules ont un meilleur comportement mécanique que les courtes; la dureté et la résistance augmentent avec la longueur de la chaîne car la force d'attraction entre les molécules est égale à la somme des forces d'attraction entre leurs atomes.

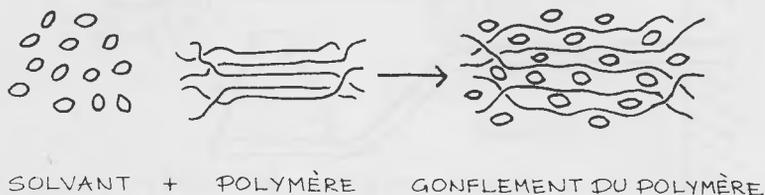


LA FORCE D'ATTRACTION ENTRE LES MOLÉCULES  
AUGMENTE AVEC LEUR LONGUEUR  
(AINSI QUE LA RÉSISTANCE MÉCANIQUE)

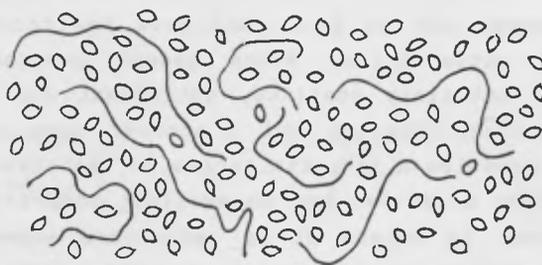
#### Solubilité des résines thermoplastiques.

Les molécules longues ne se dissolvent pas facilement car la pénétration des molécules de solvant est retardée.

Lors de la dissolution des résines thermoplastiques, il y a toujours une étape intermédiaire au cours de laquelle le matériau gonfle et devient mou.



La dissolution complète a lieu quand les molécules sont complètement séparées les unes des autres.



SOLUTION D'UN POLYMÈRE

Les solutions de polymères sont visqueuses parce que les longues molécules s'attirent entre elles et entravent l'écoulement du liquide.

Les très longues molécules de polymères peuvent même être presque insolubles (par exemple le polyéthylène et le nylon); celles qui sont solubles forment des solutions très visqueuses.

Les polymères constitués de molécules plus petites sont plus faciles à dissoudre et leurs solutions sont moins visqueuses; mais leur résistance mécanique à l'état solide est moindre. Elles conviennent mieux pour l'imprégnation des matériaux poreux.

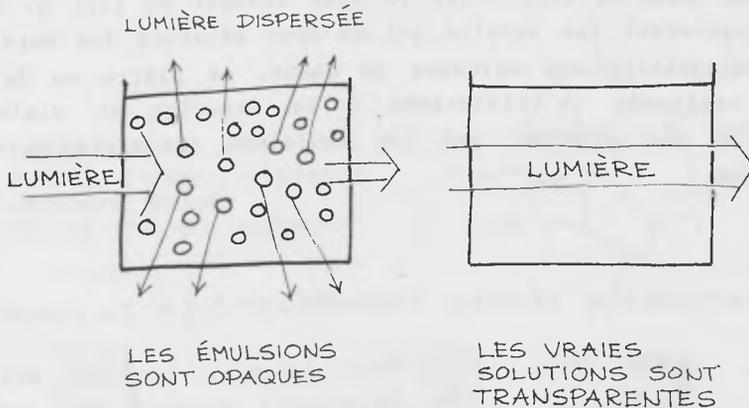
Dans le domaine de la conservation des matériaux de construction, les acryliques et les acétates de polyvinyle sont les résines thermoplastiques les plus utiles.

On peut les dissoudre dans des solvants organiques et leurs solutions peuvent être utilisées comme adhésifs (pour porter des poids légers), ou pour former des revêtements protecteurs sur la pierre, les stucs et les peintures murales.

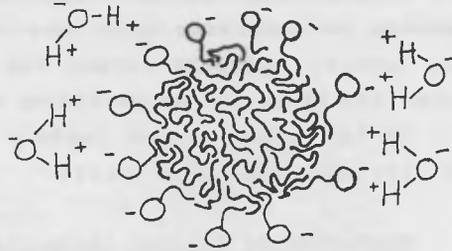
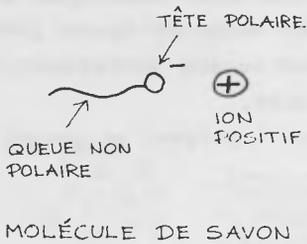
On les utilise aussi parfois pour imprégner et consolider le bois, les enduits, ou la pierre.

#### Emulsions de résines thermoplastiques.

On peut aussi utiliser les acryliques et les acétates de polyvinyle en émulsion dans l'eau. Les émulsions se distinguent facilement des vraies solutions parce qu'elles ne sont pas transparentes mais blanches et opaques, comme du lait. Leur opacité provient du fait qu'elles contiennent des agrégations de molécules de polymère, en suspension dans l'eau, qui diffractent (dispersent) la lumière incidente blanche qui les frappe.



Dans les vraies solutions, les molécules sont séparées les unes des autres et ne provoquent pas de diffraction car elles sont beaucoup plus petites que la longueur d'onde de la lumière.



La tête polaire du savon attire les molécules d'eau et ne permet pas aux gouttelettes de polymères de se réunir de nouveau.

Pourtant, l'utilisation des émulsions est limitée en conservation ou fait même qu'elles contiennent des savons et d'autres additifs dont le comportement au vieillissement est imprévisible.

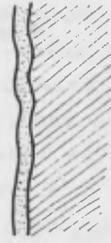
De plus, les émulsions ne peuvent être utilisées pour l'imprégnation des matériaux poreux parce que les grosses masses de molécules ne pénètrent pas facilement les pores.

En conservation, c'est le plus souvent en tant qu'adhésifs (pour rattacher les enduits qui se sont détachés des murs) ou en tant qu'additifs aux mélanges de chaux, de plâtre ou de ciment (pour renforcer la résistance à la traction et diminuer la fragilité des enduits) que les émulsions thermoplastiques sont utilisées.

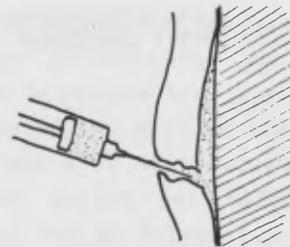
#### UTILISATIONS DES RÉSINES THERMOPLASTIQUES EN CONSERVATION



FIXATIF DE SURFACE  
(SOLUTION)



FILM PROTECTEUR  
(SOLUTION)



RÉATTACHEMENT D'ENDUIT  
(ÉMULSION)

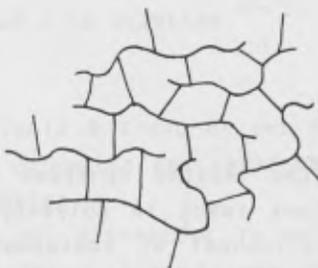
## 10.2. RESINES THERMODURCISSABLES

Les résines thermodurcissables sont toujours fabriquées en deux phases. Dans la première, on prépare par processus chimique une molécule à chaîne relativement longue.



RÉSINE THERMODURCISSABLE  
PREMIÈRE PHASE  
LIQUIDE VISQUEUX

Dans la deuxième phase, une réaction chimique ou l'action de la chaleur (ou les deux à la fois) provoquent une réticulation des chaînes qui se rejoignent pour former une masse dure et cassante (durcissement de la résine).



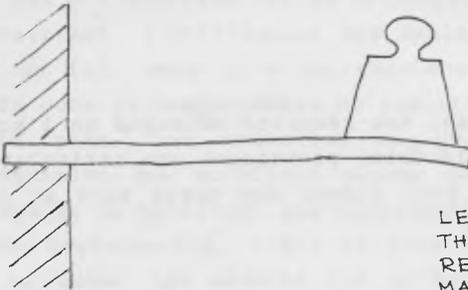
RÉSINE THERMODURCISSABLE  
DEUXIÈME PHASE  
SOLIDE DUR ET CASSANT

Les résines thermodurcissables les plus connues sont les époxydes (par exemple l'Araldite) et les polyesters. Ce sont toutes les deux des liquides visqueux qui peuvent durcir, sans être chauffés, quand on leur ajoute un liquide "durcisseur" ou "catalyseur".

Quand la résine est durcie, les chaînes sont liées par des liaisons chimiques fortes (et non par des forces moléculaires faibles, comme dans le cas des résines thermoplastiques). La conséquence est que l'on ne peut pas plier facilement les chaînes ni déformer le matériau par pression ou en le chauffant.

Les résines thermodurcissables sont plus dures et plus fortes que les résines thermoplastiques mais elles sont aussi plus fragiles. Pour améliorer les propriétés mécaniques des résines thermodurcissables, on ajoute toujours une charge à la résine liquide avant son durcissement.

On fait largement recours au renforcement par fibres de verre; il permet d'obtenir des matériaux ayant une meilleure résistance et pouvant être utilisés comme matériaux structuraux parce que les résines thermodurcissables sont beaucoup plus résistantes au fluage que les résines thermoplastiques.



LES RÉSINES  
THERMODURCISSABLES  
RENFORCÉES SONT DES  
MATÉRIAUX STRUCTURAUX

Les résines époxydes adhèrent très bien à presque tous les matériaux (sauf le polyéthylène, le nylon, les surfaces grasses, les silicones) et résistent à l'eau et à de nombreux produits chimiques. Les adhésifs préparés à base de résines époxydes sont largement utilisés dans la conservation des matériaux de construction pour réparer les pierres cassées, pour combler des fissures dans le béton, pour relier des barres de renfort aux maçonneries, etc. Les résines époxydes, comme la plupart des résines thermodurcissables, sont insolubles dans les solvants les plus courants.

Les résines polyester, moins résistantes chimiquement que les époxydes, sont aussi moins chères. Le polyester renforcé avec du verre est très fréquemment utilisé pour fabriquer des abris provisoires légers ou des éléments de structure. Une résine polyester très chargée est utilisée dans la méthode Massari pour

constituer la couche qui isolera de l'humidité les maçonneries anciennes. Des injections de polyester très fluides permettent de consolider les fissures les plus fines.

Les résines polyester comme les époxydes sont utilisées pour faire des copies exactes de sculptures à partir de moulages en latex pris sur les originaux.

### 10.3. VIEILLISSEMENT DES RESINES SYNTHETIQUES

L'action de l'environnement provoque aussi la détérioration des résines synthétiques.

Le principal agent de dégradation est l'oxygène, particulièrement en présence de lumière (la radiation ultraviolette est plus dangereuse).

L'oxydation des résines synthétiques peut se faire de deux façons apparemment contradictoires: (a) la rupture des molécules et la formation d'éléments plus petits, oxydés; (b) la réticulation des chaînes séparées.

Les résultats de ces processus très complexes sont:

- le changement de couleur (jaunissement)
- la perte de la résistance à la traction
- la fragilité

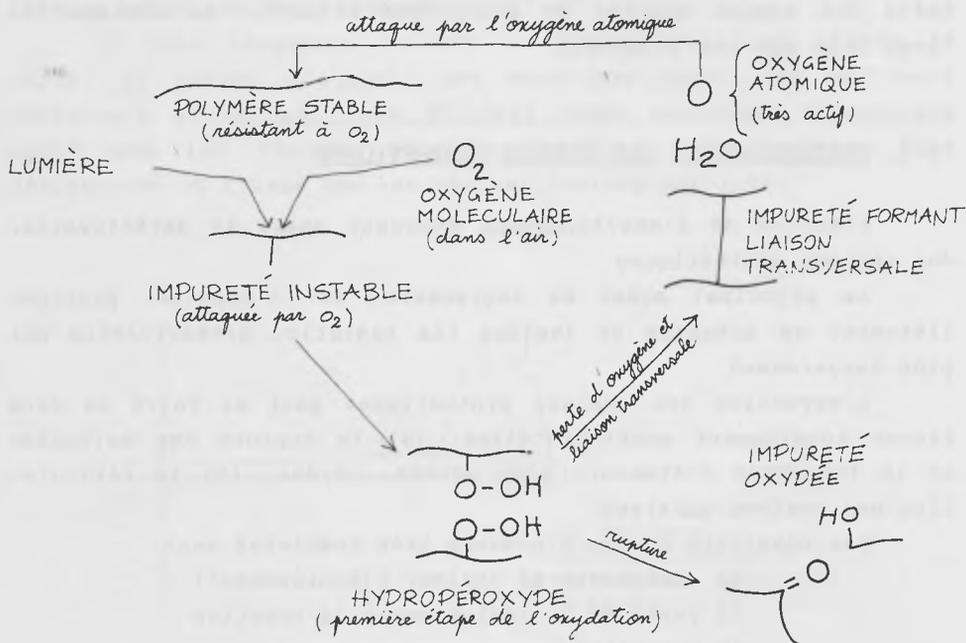
Souvent, le matériau devient soluble à l'eau et est facilement délavé des surfaces exposées (le polyester des revêtements de couverture en verre-polyester, par exemple).

Ce sont les résines acryliques qui présentent la meilleure résistance à l'oxygène et aux ultraviolets. Les résines époxydes se décolorent très rapidement et ne devraient en général jamais être utilisées sur la surface des matériaux.

Les époxydes et les polyesters sont très résistants au vieillissement si on les protège de la lumière et de l'oxygène, comme c'est le cas quand on les utilise comme adhésifs de structure ou comme barrières contre la remontée capillaire.

L'oxydation des résines synthétiques est facilitée par la présence d'impuretés qui sont facilement attaquées par l'oxygène. Dans le processus d'oxydation des impuretés, de l'oxygène frais se forme, plus actif que celui de l'atmosphère et agissant plus rapidement, même sur les molécules les plus résistantes.

## L'OXYDATION DES POLYMÈRES EST FACILITÉE PAR LES IMPURETÉS INSTABLES



L'oxydation des résines synthétiques est une réaction en chaîne dans laquelle de l'oxygène est recyclé en une forme activée.

Pour cette raison, les matériaux synthétiques devraient être très purs et toujours de première qualité. Tous les produits commerciaux devraient être testés individuellement (et périodiquement) et la similarité chimique d'avec d'autres produits qui donnent (ou ne donnent pas) satisfaction ne doit pas être considérée comme preuve de bon (ou mauvais) comportement au vieillissement.

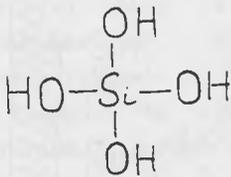
SILICATES ET SILICONES

11.1. SILICE ET SILICATES

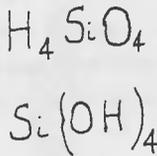
L'élément silicium (Si) forme un oxyde qui s'appelle silice ( $\text{SiO}_2$ ).

La silice se trouve dans la nature sous des formes diverses (par exemple, le quartz) mais aussi sous un aspect amorphe (par exemple, le gel de silice ou le verre de silice).

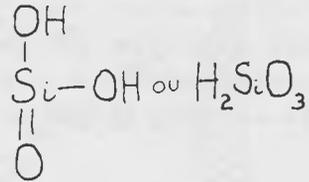
Les oxydes de silicium hydratés (c'est-à-dire la silice combinée avec l'eau) se comportent comme des acides faibles.



ACIDE ORTHO-SILICIQUE



ou



ACIDE MÉTA-SILICIQUE

Ils forment des sels que l'on appelle des silicates; par exemple, le silicate de soude ou "verre soluble" ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ou le silicate de potassium ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) qui ont tous deux été utilisés dans le passé comme consolidants de la pierre, du bois, et d'autres matériaux.

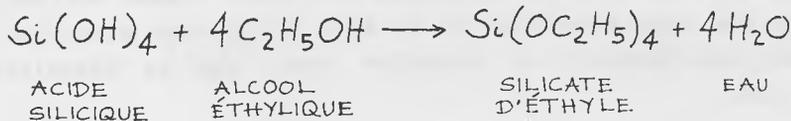
La réaction du silicate de soude ou de potassium avec l'eau (ce type de réaction s'appelle hydrolyse) produit de l'acide silicique et de l'hydroxyde de sodium ou de potassium. Les deux hydroxydes sont très alcalins et sont plus connus sous les noms de soude caustique et potasse caustique.

C'est l'acide silicique produit au cours de la réaction d'hydrolyse qui est responsable de la consolidation des matériaux. Si on le laisse seul, l'acide forme une masse gélatineuse (gel)

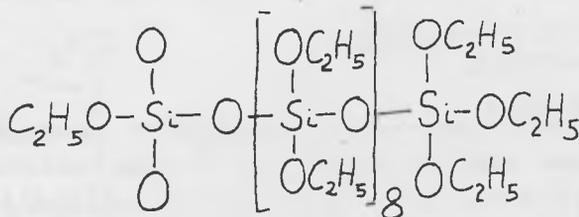


l'hydrolyse peuvent altérer les matériaux organiques et provoquer des efflorescences sur les matériaux minéraux poreux.

L'acide silicique, comme tous les acides, peut réagir avec l'alcool pour former des esters que l'on appelle aussi silicates, ou mieux, esters siliciques.



On trouve dans le commerce des esters siliciques sous des marques déposées diverses (par exemple, Silester, Monumentique). Certains types sont composés de molécules comme celle que l'on cite ici dont le nom chimique complet est "ortho-silicate tétraéthyle". D'autres types contiennent des molécules plus longues formées par la condensation de plusieurs molécules isolées; par exemple, le "silicate d'éthyle 40", formé par la condensation d'environ 10 molécules.



SILICATE D'ÉTHYLE 40

Les types condensés forment plus d'acide silicique à partir d'un même volume de liquide.

Les esters siliciques aussi peuvent être utilisés comme consolidants car ils peuvent être hydrolysés par un catalyseur acide; ils forment de l'acide silicique qui peut assurer une consolidation comme le font les silicates alcalins.

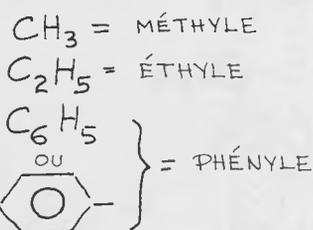
Un avantage des esters siliciques par rapport aux silicates alcalins est l'absence de sous-produits caustiques au cours de la réaction d'hydrolyse. Dans le cas des silicates d'éthyle, le sous-produit est l'alcool éthylique, qui s'évapore et n'est source d'aucun problème.

En revanche, il peut y avoir quelques ennuis dus aux catalyseurs acides si le matériau à consolider est sensible aux acides. L'utilisation des esters siliciques est aussi rendue difficile du fait qu'ils sont volatiles et il faut faire très attention afin d'éviter une évaporation excessive avant que la consolidation n'ait lieu.

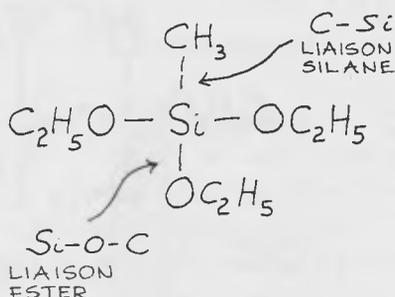
## 11.2. SILICONES

Si les radicaux organiques (c'est-à-dire les groupes d'atomes de carbone et d'hydrogène) sont attachés directement à un atome de silicium par l'intermédiaire d'une liaison carbone-silicium (Si-C), un groupe de composants que l'on appelle alkoxy-silanes est constitué. Certains d'entre eux possèdent à la fois des liaisons silane et des liaisons ester.

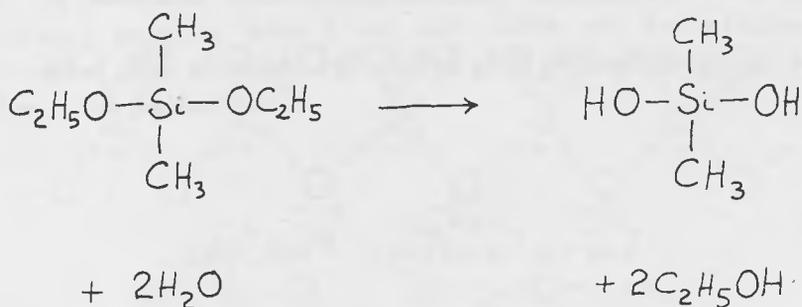
### RADICAUX ORGANIQUES



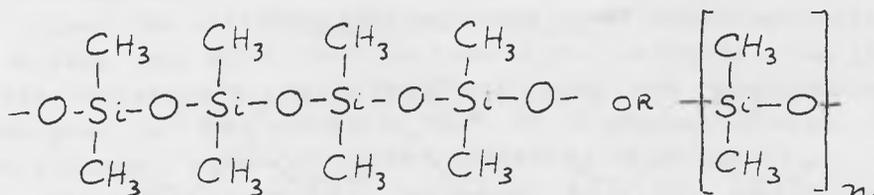
### TRI-ÉTHOXY MÉTHYL-SILANE



Alors que la liaison ester est décomposée par hydrolyse, la liaison Si-C y résiste. C'est pourquoi l'hydrolyse de composés comme celui représenté ci-dessus (que l'on appelle ethoxy-alkylsilanes) conduit à des produits qui possèdent encore des radicaux organiques.



La déshydratation de ce type de molécules provoque la connexion de plusieurs d'entre elles (de 20 à 200) pour former de longues molécules qui sont en partie organiques et en partie minérales, et que l'on appelle silicones.



$$200 > n > 20$$

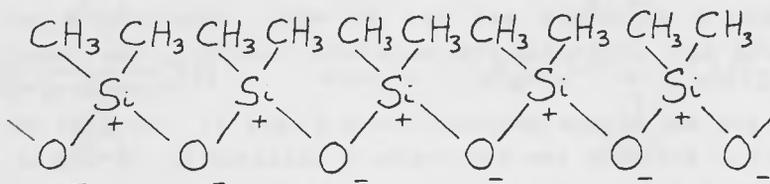
La molécule de silicone représentée ci-dessus ne contient que des radicaux méthyle ( $\text{CH}_3$ ), mais on peut aussi utiliser des silicones à radicaux phényle ( $\text{C}_6\text{H}_5$ ).

Les molécules qui ont une structure linéaire, comme celle montrée ci-dessus, sont solubles dans les solvants organiques. Des silicones insolubles sont aussi synthétisés; ils ont une structure tri-dimensionnelle, avec réticulations transversales.

### 11.3. EFFET HYDROFUGE DES SILICONES

La partie minérale de la molécule de silicone ( $\text{Si-O}$ ) est légèrement polaire alors que sa partie organique ( $\text{CH}_3$  ou  $\text{C}_6\text{H}_5$ ) ne l'est pas.

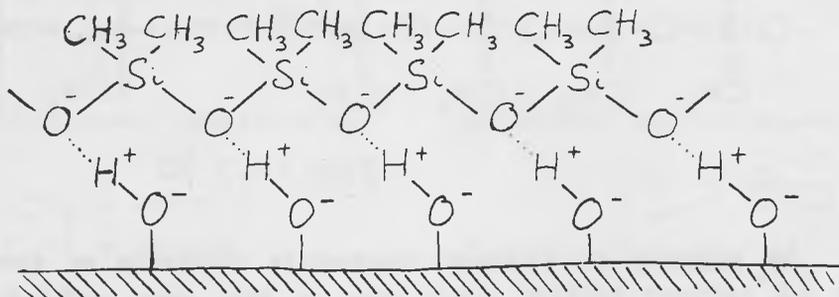
PARTIE ORGANIQUE - NON POLAIRE



PARTIE MINÉRALE - POLAIRE

Quand on applique un silicone sur un matériau qui porte des groupes hydroxyles (OH) à sa surface (ce qui est le cas de la plupart des matériaux de construction), la partie polaire de la molécule de silicone est attirée vers le matériau. Par conséquent, les radicaux organiques non polaires sont orientés vers l'air.

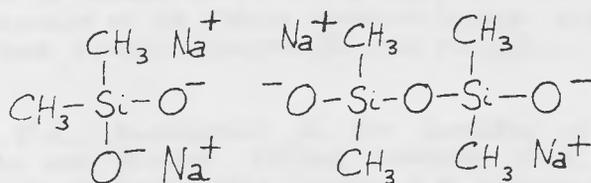
COUCHE HYDROFUGE



A la surface du matériau, il se forme donc une barrière non-polaire qui n'a pas tendance à former de liaison hydrogène avec les molécules d'eau, et que l'on appelle hydrophobe ou hydrofuge.

L'eau à l'état liquide ne peut pas pénétrer à travers une telle barrière. Toutefois, il reste assez d'espaces entre les molécules de silicone pour permettre aux molécules d'eau isolées de passer. Par conséquent, la couche de silicone est perméable à la vapeur d'eau.

Les silicones à structure moléculaire linéaire sont solubles dans les solvants organiques mais pas dans l'eau. Les produits hydrofuges solubles dans l'eau sont basés sur des silicones qui contiennent des groupes hydroxyles (OH) transformés en sels de sodium. Par exemple:

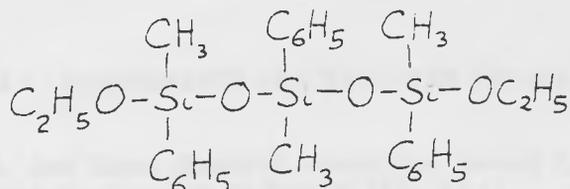


SILICONES SOLUBLES DANS L'EAU

Pourtant, en tant qu'hydrofuges, ils semblent moins efficaces que ceux solubles dans les solvants organiques.

Quand des silicones sont appliqués comme couche protectrice de surface, leur effet n'est que temporaire. La couche a une très petite épaisseur et peut facilement subir des détériorations mécaniques ou être détruite par un processus chimique de vieillissement, sous l'action de l'oxygène et de la lumière.

Les alkoxy-silanes qui contiennent à la fois des liaisons silane et ester sont utilisés comme consolidants de la pierre pour des imprégnations en profondeur, puisqu'ils peuvent provoquer à la fois l'hydrofugation et la consolidation.



MÉTHYLE - PHÉNYLE - ETHOXY - SILANE  
 QUE L'ON PEUT ÉVENTUELLEMENT UTILISER  
 COMME CONSOLIDANT

La formule ci-dessus montre la structure approximative d'un alkoxy-silane que l'on utilise pour la conservation des marbres altérés par les agents atmosphériques.



## BIBLIOGRAPHIE TECHNIQUE

### DETERIORATION ET CONSERVATION EN GENERALE

HONEYBORNE, D.B. - HARRIS, P.B. "The structure of porous building stone and its relation to weathering behaviour." *Proceedings of the 10th Symposium of the Colston Research Society*. Eds. D.H. Everett et F.S. Stone. Londres: Butterworths, 1958, 343-365.

McINTYRE, W.A. *Investigation in the durability of architectural terracotta and faience*. Building Research, Dept. of Sci. Ind. Research, Special Report N°12. Londres: H.M. Stationery Office, 1929.

SCHAFFER, R.J. *The Weathering of Natural Building Stone*. Londres: H.M. Stationery Office, 1950.

STAMBOLOV, T. - VAN ASPEREN de BOER, J.R.L. *The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments*. 2<sup>e</sup> éd. Rome: ICCROM, 1976.

TORRACA, G. "Brick, adobe, stone and architectural ceramics: deterioration processes and conservation practices." *Preservation and Conservation: Principles and Practices*. Ed. S. Timmons. Washington D.C.: Smithsonian Institution Press, 1976, 143-165.

WINKLER, E.M. *Stone Properties, Durability in Man's Environment*. New York: Springer Verlag, 1973.

### CHAPITRE I - MOUVEMENTS DE L'EAU DANS LES SOLIDES POREUX

ARNOLD, M. *Salt Damp Research Committee. Second Report*. Adelaide: South Australian Government Printer, 1978, 27-65.

CAMMERER, W.F. "The capillary motion of moisture in building materials." CIB/RILEM *Second International Symposium on Moisture Problems in Buildings*. Rapport 2.1.2. Rotterdam: 1974.

HALLER, P. "Entgegung zum Aufsatz: Anwendung von Elektroosmose gegen aufsteigende Mauerfeuchtigkeit." *Schweizerische Bauzeitung*, 91, 35 (1973) 832-836.

LACY, R.E. "A note on the climate inside a mediaeval chapel." *Studies in Conservation*, 15, N°2 (1970) 65-80.

MASSARI, G. - MASSARI, I. *Damp Buildings, Old and New*. Manuscript non publié. Rome: ICCROM.

VOS, B.H. - TAMMES, E. "Suction of groundwater." *Studies in Conservation*, 16, N°4 (1971) 129-144.

VOS, B.H. "Water absorption and drying of materials." *The Conservation of Stone I*. Ed. R. Rossi Manaresi. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1975, 679-694.

WATSON, A. *Measurement of moisture content in some structures and materials by microwave absorption*. Building Research Station Current Papers, Research Series N°63. Londres: H.M. Stationery Office, 1965.

## CHAPITRE II - DETERIORATION DES MATERIAUX POREUX CONTRAINTES MECANIQUES

ACCARDO, G. - MASSA, S. - ROSSI DORIA, P. - TABASSO, M. "Measurements of porosity and mechanical resistance in order to evaluate the state of deterioration of some stones." *Unesco/RILEM Colloque international sur l'altération et la protection des monuments en pierre*. Rapport 2.1. Paris: CEBTP, 1978.

ARNOLD, L. - PRICE, C.A. "The laboratory assessment of stone preservatives." *The Conservation of Stone I*. Ed. R. Rossi Manaresi. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1975, 695-704.

ARNOLD, L. - HONEYBORNE, D.B. - PRICE, C.A. "Conservation of natural stone." *Chemistry and Industry*, 17th April (1976) 345-347.

EVERETT, D.H. "The thermodynamics of frost damage to porous solids." *Transactions Faraday Society* 57 (1961) 1541-1551.

FAGERLUND, G. "The significance of critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials." *Durability of Concrete*, American Concrete Institute, Publication SP 4, Partie SP 4-2. Detroit: 1975.

GORDON, J.E. *The New Science of Strong Materials*. 2<sup>e</sup> éd. Harmondsworth: Penguin Books, 1976.

HONEYBORNE, D.B. *Weathering processes affecting inorganic building materials*. Building Research Station, Internal Note 141/65. Garston: 1965.

LITVAN, G.G. "Testing the frost susceptibility of bricks." *Masonry: Past and Present*. ASTM STP 589, 123-132. Washington, D.C.: 1975.

PAULY, J.P. "Maladie alvéolaire, conditions de formation et d'évolution." *The Conservation of Stone I*. Ed. R. Rossi Manaresi. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1975, 55-80.

PRICE, C.A. "Stone decay and preservation." *Chemistry in Britain*, 11 (1975) 350-353.

*Report of the Building Research Board for the Period Ended 31st December 1926*. Londres: H.M. Stationery Office, 1927.

### CHAPITRE III - DETERIORATION DES MATERIAUX POREUX REACTIONS CHIMIQUES. CORROSION

ALTIERI, A. - FUNICELLO, R. - LUPA PALMIERI, E. - ZUPPI, G.M.  
"Caratteri dell'alterazione delle pietre da costruzione a Venezia; azione dello zolfo atmosferico su rocce carbonatiche." *Annali dell'Istituto Superiore di Sanità* 13, Partie 1-11 (1977) 331-342.

BADAN, B - BACELLE, G. - MARCHESINI, L. "Surface reactivity of marble and stone: quarry and altered samples." *The Conservation of Stone I*. Ed. R. Rossi Manaresi. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1975, 89-101.

DEL MONTE, M. - VITTORI, O. "Air pollution and stone decay: the case of Venice." *Endeavour*, 9, N°3 (1985), 117-122.

MARCHESINI, L. "Comportamento dei marmi e delle pietre a Venezia." *La Conservazione delle Sculture all'Aperto I*. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1971, 78-86.

SRAMEK, J. "Determination of the source of surface deterioration of tombstones at the Old Jewish Cemetery in Prague." *Studies in Conservation*, 25 (1980) 47-52.

TORRACA, G. "Atmospheric sulphur and the deterioration of building stone." *Sulphur Emissions and the Environment*. Londres: The Society of Chemical Industry, 1979, 305-310.

WINKLER, E.M. "Weathering rates of stone in urban atmospheres." *The Conservation of Stone I*. Ed. R. Rossi Manaresi. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1975, 27-36.

#### CHAPITRE IV - BIODETERIORATION DES MATERIAUX POREUX

ECKHART, F.E.W. "Microorganisms and weathering of a sandstone monument." *Environmental Biogeochemistry and Geomicrobiology*, Vol.2. Ed. W.E. Krumbein. Ann Arbor: Ann Arbor Sci. Publ. Inc., 1978, 675-686.

KRUMBEIN, W.E. - LANGE, C. "Decay of plaster, paintings and wall material of the interior of buildings via microbial activity." *Environmental Biogeochemistry and Geomicrobiology*, Vol. 2. Ed. W.E. Krumbein. Ann Arbor: Ann Arbor Sci. Publ. Inc., 1978, 687-697.

PLUSIEURS AUTEURS, UNESCO/RILEM. "Altération et traitements liés à la biologie (Séance 4)." *Altération et protection des monuments en pierre*. Rapports 4.1 à 4.8. Paris: CEBTP, 1978.

ROSSI MANARESI, R. "Biodeterioration and related problems." *The Conservation of Stone I*. Ed. R. Rossi Manaresi. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1975, 191-293.

#### CHAPITRE V - VIBRATIONS

BOCQUENET, D. - GIRARD, J. - Le HOUEDÉC, D. - PICCARD, J. "Les vibrations dues au trafic routier: action sur l'environnement et méthodes d'isolation." *Annales ITBTP*, 355 (1977) 57.

BRAMER, T.P.C., et autres. *Basic Vibration Control*. Londres: Sound Research Laboratories Ltd., E. and F. Spon Ltd., 1977.

MASSARI, G. "Danno ai monumenti da traffico stradale pesante." *Ingegneri Architetti*, XXI, V- VI (1971) 1-9.

PARIBENI, M. *Influenza delle vibrazioni meccaniche indotte dal traffico sulla stabilità delle costruzioni*. 3° Corso di Informazione ASSIRCO. Manuscript non publié, bibliothèque de l'ICCROM, Rome, 1980.

STEFFENS, R.J. *Structural vibration and damage*. Building Research Establishment, Report 21-L5. Londres: 1974.

WALLER, R.A. *Building on Springs*. Oxford: Pergamon Press, 1969.

WHIFFIN, A.C. - LEONARD, D.R. *A survey of traffic induced vibrations*. Road Research Laboratory, Report LR 418. Crowthorne: 1971.

#### CHAPITRE VI - LIANTS

BRE (Building Research Establishment) "The durability of steel in concrete: Part 1. Mechanism of corrosion and protection." *BRE Digest* 263. Londres: Her Majesty's Stationery Office, 1982.

DAVEY, N. *A History of Building Materials*. Londres, Phoenix House, 1961.

- FERRAGNI, D., et autres. "Essais de laboratoire sur des coulis à base de ciment." *Mortiers, ciments et coulis utilisés dans la conservation des bâtiments historiques. Symposium 3-6 Novembre 1981, Rome.* Rome: ICCROM, 1982, 185-203.
- FOUCAULT, M. "Le plâtre." *Calcium Sulphates and Derived Materials.* Paris: RILEM, 1977, 271-284.
- FURLAN, V. *Evolution et historique du mortier.* Notes de cours. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire des Matériaux Pierreux. Lausanne: 1976.
- FURLAN, V. *Caractéristiques générales des principaux liants utilisés pour les travaux de crépissage.* Notes de cours. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire des Matériaux Pierreux. Lausanne: 1976.
- FURLAN, V. - BISSEGER, P. "Les mortiers anciens, histoire et essais d'analyse scientifique." *Zeitschrift für Schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte*, 32, 2 (1975) 166-178.
- I.E.A., E.M. *The Chemistry of Cement and Concrete.* 3<sup>e</sup> éd. Londres, Edward Arnold, 1978.
- MILNER, J.D. "Masonry and masonry products: the use and preservation of mortar, plaster/stucco and concrete." *Preservation and Conservation: Principles and Practices.* Ed. S. Timmons. Washington, D.C.: The Smithsonian Institution Press, 1976, 177-189.
- MURAT, M. "Structure, cristallographie et réactivité des sulfates de calcium." *Calcium Sulphates and Derived Materials.* Paris: RILEM, 1977, 59-172.
- PERONI, S., et autres. "Lime based mortars for the repair of ancient masonry and possible substitutes." *Mortiers, ciments et coulis utilisés dans la conservation des bâtiments historiques. Symposium 3-6 Novembre 1981, Rome.* Rome: ICCROM, 1982, 63-99.

TORRACA, G. "Materiali cementizi e tecnologie: scelta dei materiali in funzione del tipo di intervento." *Restauro e Cemento in Architettura* 2. Ed. G. Carbonara. Rome: AITEC, 1984, 174-180.

ZNACHKO-IAVORSKII, I.L. "New Methods for the study and contemporary aspects of the history of cementing materials." *Technology and Culture* 18, N°1 (1977) 25-42.

## CHAPITRE VII - CONSERVATION DE LA PIERRE

ASHURST, J. - DIMES, F.G. *Stone in Building*. Londres: The Architectural Press, 1977.

HOSEK, J. - SKUPIN, L. *Consolidation and hydrophobization of cretaceous marly limestone used in monuments*. Building Research Institute of the Technical University, rapport. Prague: 1978.

PLUSIEURS AUTEURS, UNESCO/RII.EM. "Essais sur les produits et procédés de traitement (Séance 6). Restauration des monuments (Séance 7)." *Altération et protection des monuments en pierre*. Rapports 6.1 à 6.15 et 7.3 à 7.20. Paris: CEBTP, 1978.

PRICE, C.A. *Brethane stone preservative*. Building Research Establishment Current Paper, CP 1/81. Garston: BRE, 1981.

ROSSI MANARESI, R., éd. *The Conservation of Stone I*. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1975.

ROSSI MANARESI, R., éd. *The Conservation of Stone II*. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1981.

ROSSI MANARESI, R. - TORRACA, G., éd. *The Treatment of Stone*. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1975.

THOMSON, G., éd. *Conservation of Stone*. Londres: IIC, 1971.

## CHAPITRE VIII - ARGILE, BRIQUE CRUE, BRIQUE CUITE

CHIARI, G. - GULLINI, G. - TORRACA, G. Report on mud-brick preservation. *Mesopotamia*, VII. Turin: Università di Torino, 1972, 259-287.

CLIFTON, J.R. *Preservation of historic adobe structures. A status report.* National Bureau of Standards, Technical Note 934. Washington, D.C.: 1977.

CLIFTON, J.R. - DAVIS, F.L. *Mechanical properties of adobe.* National Bureau of Standards, Technical Note 996. Washington, D.C.: 1979.

COMITES DE L'ICOM/ICOMOS DE LA TURQUIE. *IIIrd International Symposium on Mud-brick (Adobe) Preservation.* Ankara: Université ODTU, 1980.

ICCROM. *Bibliographie sur la brique crue.* Non publié, bibliothèque de l'ICCROM. Rome: 1982.

ICOMOS. *First International Conference on the Conservation of Mud-Brick Monuments. Yazd (Iran), 25-30 September, 1972.* Téhéran: Ministère de la Culture d'Iran, 1976.

## CHAPITRE IX - DETERIORATION ET CONSERVATION DES MACONNERIES

BOWLEY, M.J. *Desalination of stone: a case study.* Building Research Establishment, Current Papers N°46. Londres: H.M. Stationery Office, 1975.

HOLMSTROM, I. - SANDSTROM, C. *Maintenance of Old Buildings. Preservation from the Technical and Antiquarian Standpoint.* Stockholm: National Swedish Building Research, 1975.

JEDRZEJEWSKA, H. "Removal of soluble salts from stone." *1970 New York Conference. Volume 1. Conservation of Stone.* 2<sup>e</sup> éd. Londres: IIC, 1970, 19-33.

## CHAPITRE X - RESINES SYNTHETIQUES

BRYDSON, J.A. *Plastic Materials*. Londres: Hiffe Books, 1970.

THOMSON, G. - WERNER, A.E. - FELLER, R.L. "Synthetic materials used in the conservation of cultural property." *The Conservation of Cultural Property*. Paris: Unesco Press, 1975, 303-335.

## CHAPITRE XI - SILICATES ET SILICONES

GERARD, R. "Etude de la protection des pierres calcaires au moyen de résines silicones." *The Treatment of Stone*. Eds. R. Rossi Manaresi et G. Torraca. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1972, 145-163.

WEBER, H. "Stone renovation and consolidation using silicones and silicic esters." *The Conservation of Stone I*. Ed. R. Rossi Manaresi. Bologne: Centro Cesare Gnudi per la Conservazione delle Sculture all'Aperto, 1975, 375-385.





