La décohésion granulaire,

maladie des façades en marbre

BOUINEAU A. et PERRIER R., Mines et Carrières, vol. 77, août-sept. 1995, p. 69-75

Nous décrivons dans cet article un nouveau type de pathologie de la pierre, encore peu signalé en France, en vue d'attirer l'attention des professionnels du bâtiment sur les risques que font courir certains marbres posés en façade.

Le cas le plus spectaculaire et le mieux étudié par les spécialistes américains est celui de l'Amoco Building à Chicago, dont le revêtement de marbre a du être totalement remplacé dix sept ans après sa pose ; nous décrivons le cas de la Finlandia House à Helsinki, et mentionnons le risque posé par la Grande Arche de La Défense. Une revue de la bibliographie montre que cette altération du marbre a déjà été décrite en diverses localités américaines. La dilatation tout à fait anormale de la calcite nous amène à penser que l'origine de la décohésion est à rechercher dans les alternances de chauffage et refroidissement des façades, qui causent une dilatation irréversible.

La décohésion granulaire se manifeste 10 ou 15 ans après la pose de revêtements minces en marbre, d'une épaisseur souvent voisine de 3 cm. La première manifestation évidente est le cintrage des plaques, qui étaient initialement planes au moment de la pose. Des fissures apparaissent sur la périphérie, et des éclats peuvent se détacher au niveau des attaches. S'il est possible de prélever des échantillons pour des mesures destructives, on constate que la résistance à la traction et la résistance aux attaches sont fortement diminuées par rapport au même marbre non soumis aux intempéries. Dans les cas extrêmes, juste avant la chute des plaques, la cohésion du marbre devient semblable à celle du sucre en morceaux, raison pour laquelle cette altération a été aussi appelée *saccharification*, ou vulgairement *maladie du sucre*.

Un examen au microscope d'échantillons, imprégnés sous vide de résines colorées ou fluorescentes, montre que les cristaux de calcite qui forment les grains du marbre sont séparés les uns des autres par des espaces vides, d'où le nom plus scientifique de *décohésion granulaire*.

Cette pathologie n'a été signalée jusqu'ici que pour les marbres vrais, c'est à dire les marbres métamorphiques, dont la taille des grains est supérieure à 0,1 mm.

Etats Unis

Dans le climat humide de la **Gulf Coast**, Winkler (1987) signale que le cintrage des plaques de marbre de type Carrare employées en revêtements, et leur rapide désintégration, sont bien connus des architectes. L'auteur explique le phénomène par le relâchement de contraintes internes et surtout par des cycles d'humidification et de séchage. D'autres cas sont évoqués à Kansas City et New York (Chase Lincoln First Bank of Rochester, 27 étages).

Le cas de la tour **Amoco** à Chicago est décrit par Logan et al. (1993) : construite entre 1971 et 1973, elle a été revêtue sur toute sa hauteur (346 m) de 65000 m2 de plaques de marbre de Carrare, provenant de carrières non identifiées. Ces plaques avaient une épaisseur de 32 à 38 mm, une longueur de 1,32 m et une largeur de 0,83 ou 1,11 m. Elles furent posées avec un mastic trop dur, qui empêchait leur libre expansion. Les plaques commencèrent à se cintrer en 1980, le phénomène devint inquiétant en 1987 : on releva alors sur de nombreuses plaques un bombement convexe de plus de 11,3 mm, pouvant atteindre jusqu'à 30 mm, les plus déformées étaient celles placées à l'Est et au Sud, faces les plus ensoleillées. Après une série de tests sur les façades et en laboratoire, tout le revêtement fut remplacé en 1990 par un granite, pour un coût de 75 M$.

Le marbre a un grain moyen de 0,22 mm, les cristaux sont peu orientés ; la porosité originelle est de 0,81 %, elle passe à 1,18 % sur les panneaux exposés au soleil. Les essais de résistance à la flexion ont montré qu'une vingtaine de cycles de chauffage à 36°C abaisse sensiblement (18,6%) la résistance de plaques vierges ; à 89°C la diminution atteint 31%. Sur lames minces, il a été constaté que le chauffage crée des microfractures entre les grains, surtout sur la face externe des panneaux ; les microfractures ne se

referment qu'en partie au refroidissement.

Finlande

L'un de nous (R.P.) a visité en 1990 la **Finlandia House** à Helsinki, qui présentait un cintrage prononcé des plaques de revêtement et une décohésion granulaire avancée. Construite en 1971, ses façades étaient revêtues de plaques de marbre de Carrare de 1 x 1,5 m environ, d'une épaisseur de 28 mm. Une photo de la partie supérieure de la construction (fig. 1) montre la déformation concave des plaques, dont les bords sont relevés vers l'extérieur de 2 à 3 cm. Les plaques de revêtement de la base de l'édifice, qui sont protégées de la pluie, sont également cintrées, mais en sens inverse (bombement convexe). Le marbre était devenu friable et la résistance des attaches sérieusement compromise.

Un petit échantillon a été imprégné sous vide avec une résine époxy colorée en rouge. L'examen d'une lame mince au microscope (fig. 2) montre des grains de 0,1 à 0,4 mm, à contour polygonal, avec des faces presque planes ; les contacts entre grains sont ouverts et soulignés par la résine rouge. La figure 3 correspond à un échantillon de marbre blanc ordinaire de Carrare, traité dans les mêmes conditions : les limites entre grains sont nettes, mais non ouvertes. Il est évident que le marbre de la Finlandia House a perdu sa cohésion par ouverture des espaces intergranulaires.

Fig. 1 - Maison de la Finlande à Helsinki en 1990, cintrage des panneaux en marbre de Carrare

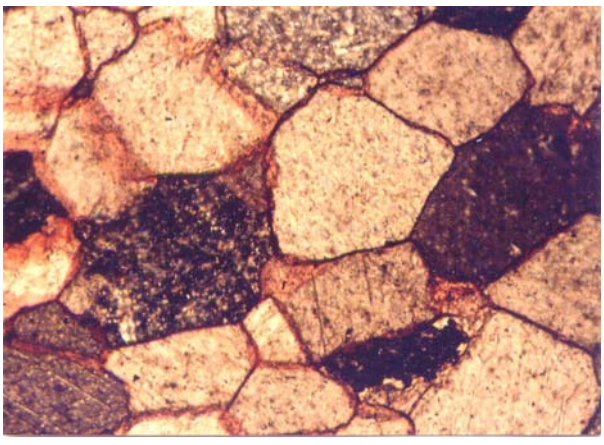

Fig. 2 - Lame mince dans le marbre de la Maison de la Finlande, la résine colorée en rouge souligne les ouvertures entre joints

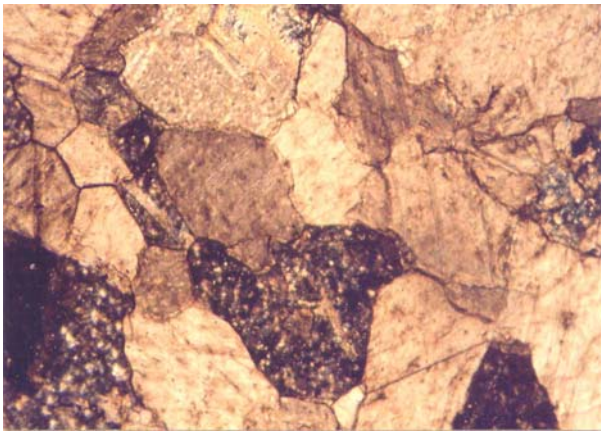

Fig. 3 - Lame mince dans un marbre de Carrare ordinaire, à grains jointifs

Inde

La **tombe de Humayun** à Delhi, visitée récemment par l'un de nous (A.B.) en même temps que le Taj Mahal, est un édifice de grès rouges datant de 1565, sur lesquels ont été agrafés ou incrustés des éléments de marbre blanc. Des problèmes de corrosion des attaches métalliques ont provoqué des ruptures et des chutes de marbre. Malgré de nombreuses réparations et changements de plaques au cours de l'histoire, des déformations concaves de plaques de marbre et des ruptures continuent de se produire, sans doute par différence de dilatation entre marbre et grès (fig. 4 et 5).

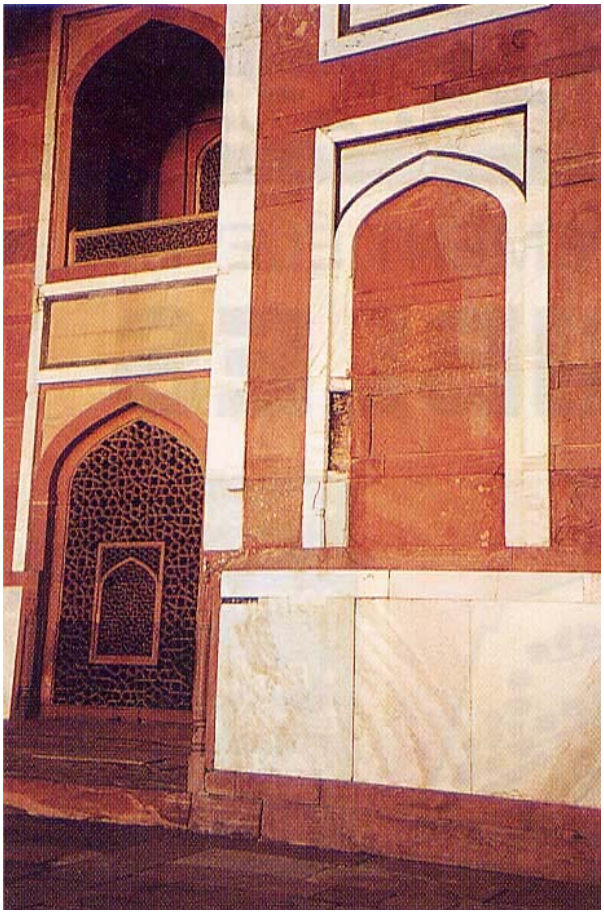

Fig. 4 - Tombe de Humayun à Delhi, chutes de plaques de marbres encastrées dans le grès

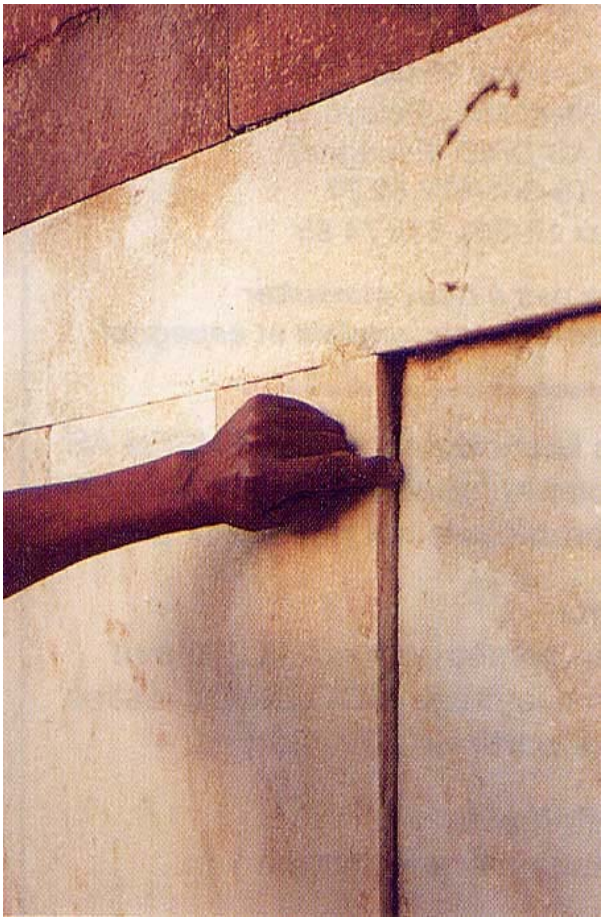

Fig. 5 - Tombe de Humayun à Delhi, cintrage de plaques de marbre

Le Taj Mahal à Agra a été construit par Shah Jahan, à partir de 1631 : c'est une structure en maçonnerie de briques hourdées au mortier de chaux aérienne, revêtue de marbres blancs d'une épaisseur 15 à 20 cm, avec incrustations de marbre noir : l'ensemble est agrafé au support et monté à joints vifs. La qualité des marbres, qui proviennent de nombreuses carrières, est très variable ; en outre des marbres de récupération, de 400 à 800 ans d'âge, ont été employés. Les tassements différentiels entre maçonnerie et marbre (qui ont des modules d'élasticité distincts) ont causé diverses ruptures dans le passé : ces plaques ont été changées au fur et à mesure. De nos jours, bien que les tassements soient terminés, les dégradations persistent : on observe des fissures et des épaufrures (fig. 6 à 8), qui sont à notre avis d'origine thermique. La température de l'air varie entre 1 °C en hiver à 50 °C en été ; mais la température du revêtement, surtout pour les marbres noirs, atteint certainement des valeurs supérieures. Les dégâts actuels sont attribuables à la simple dilatation des marbres, qui induit des contraintes de compression, du fait de l'absence de joints de dilatation : il serait intéressant, comme pour la tombe de Humayun, de mesurer ces contraintes en été et en hiver (par les technique de libération des contraintes), d'effectuer des examens pétrographiques et de mesurer les propriétés physiques en les comparant à celle des marbres des carrières de Makrana.

Fig. 6 - Taj Mahal à Agra, fissuration d'un panneau de marbre à l'entrée

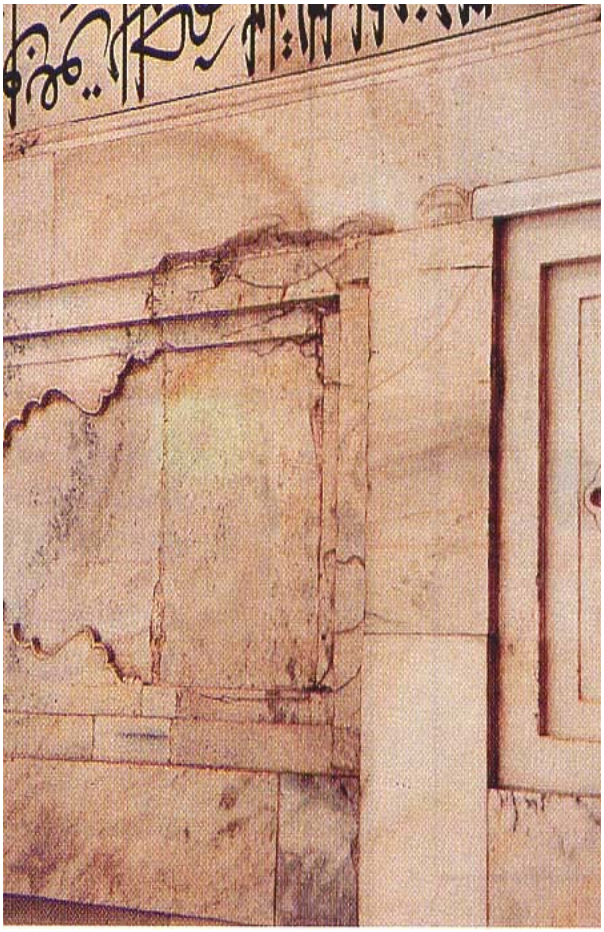

Fig. 7 - Taj Mahal à Agra, fracturation de panneaux d'encadrements à l'entrée

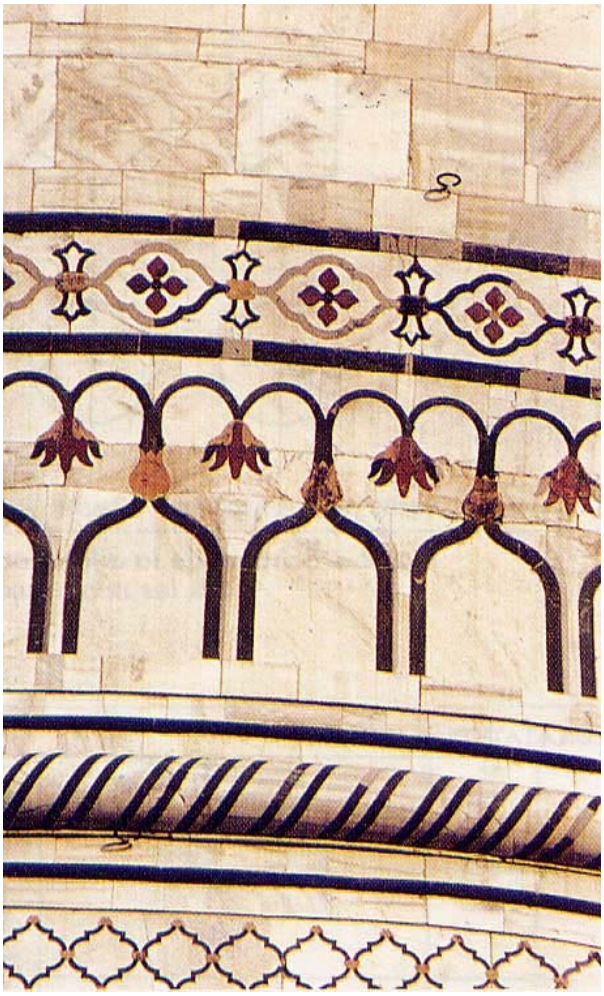

Fig. 8 - Dégradations du revêtement extérieur du dôme du Taj Mahal

France

La **Grande Arche** de La Défense date de moins de dix ans, elle est revêtue de plaques de marbre de Carrare (carrières de Lorano), de 70 x 70 cm sur une épaisseur de 3 cm. Certaines des plaques de marbre ont commencé à se cintrer : on remarque par endroits des bombements convexes de l'ordre de 15 mm, et des fissures périphériques, spécialement sur la façade Sud et en partie haute (fig. 9 à 11).

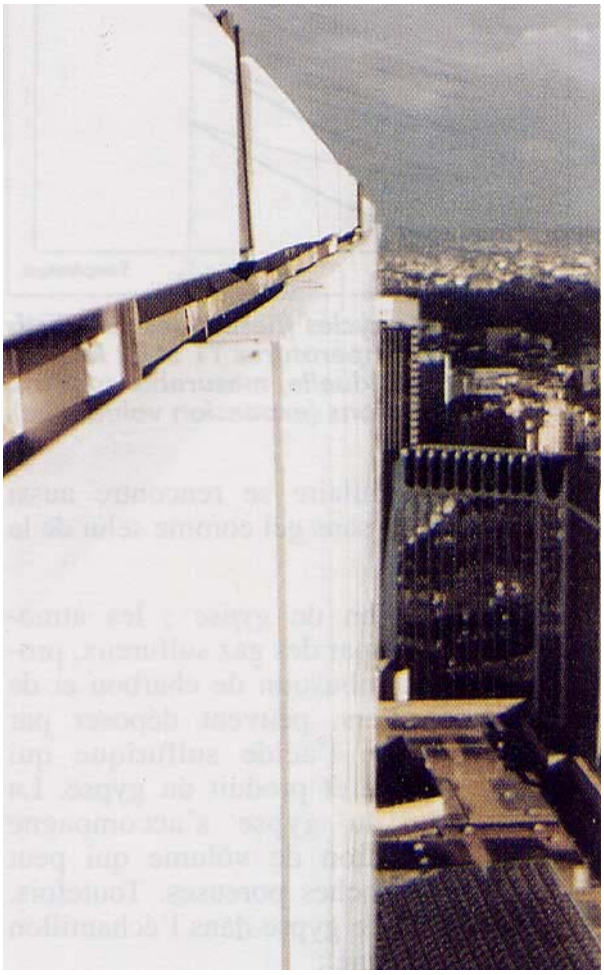

Fig. 9 - Plaques cintrées au sommet de la Grande Arche de La Défense

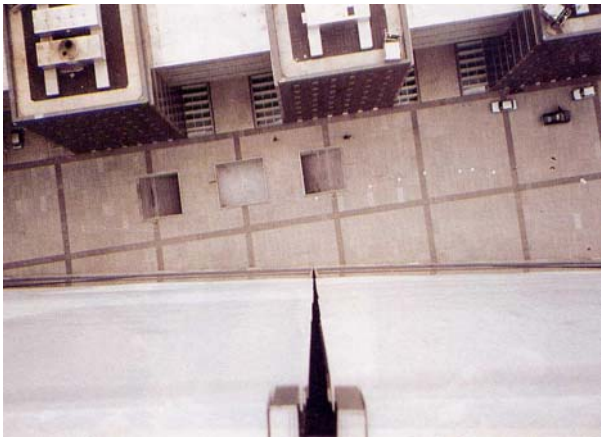

Fig. 10 - Vue verticale du sommet de la Grande Arche, tendance à la fermeture des joints par cintrage des plaques

Fig. 11 - Fissuration périphérique d'une plaque de la Grande Arche

Certaines **rues de Paris** ont été récemment pavées en petits cubes de marbre de Carrare de 65 mm d'arête, sciés sur deux faces ; les cubes sont posés sur sable stabilisé, avec jointoyage au mortier. On a constaté qu'en été le pavage du centre de la chaussée ou de carrefours se soulève en voûte sur environ 2 cm (fig. 12 à 14). Cette déformation résulte de la dilatation thermique, car aucun joint de fractionnement n'a été ménagé ; de plus le bord supérieur des pavés de faible qualité s'écaille sous la contrainte. La mesure de la vitesse de propagation du son au CEBTP montre que la qualité du marbre est très variable, puisque les mesures s'étendent entre 2000 et 7000 m/s. La bonne corrélation constatée entre la vitesse de propagation du son et la résistance au fendage des différents marbres confirme la variabilité de la qualité.

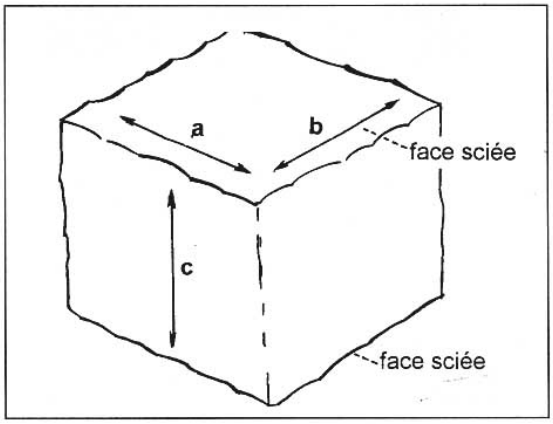

Fig. 12 - Directions de mesure de la dilatation thermique sur les pavés de Paris

Fig. 13 - Soulèvement en voûte de pavés de marbres à Paris en été, quartier Montorgueuil

Vitesse de propagation du son m/s	Sens de la mesure	Coefficent de dilatation thermique en µm/m °C entre 20-30 °C	entre 30-40 °C	entre 40-50 °C	entre 50-60 °C	entre 20-60 °C
3 000	a	6	5	8	6	6
	b	9	9	12	11	10
	c	16	11	12	15	13
4 300	a	2	1	4	1	2
	b	4	7	11	11	8
	c	4	7	7	9	7
6 000	a	9	10	14	13	12
	b	6	10	14	11	10
	c	9	9	17	12	12

Fig. 14- Coefficients de dilatation thermique de pavés de marbre à Paris

Les études au microscope pétrographique et au MEB montrent que les variétés à grande vitesse du son sont formées de grains à sutures engrenées, tandis que les variétés lentes, plus faiblement métamorphiques, possèdent des grains fins à contour polygonal en mosaïque.

Les mesures des coefficients de dilatation thermique ont été faites selon trois directions perpendiculaires, elles montrent que la dilatation est différente selon les directions, en particulier pour les échantillons ayant des vitesses de 3000 à 4300 m/s : un échantillon à 3500 m/s par exemple a des coefficients de dilatation de 1,8 - 8,3 et 6,7.310-6/°C.

Modes de dégradation des façades

Les façades de marbres sont sujettes à divers types de désordres :

- perte du poli et *dissolution* sous l'effet de la pluie, surtout dans les atmosphères riches en gaz carbonique,

- formation de *taches* brunes par oxydation de la pyrite,

- différences d'élasticité entre support (maçonnerie, béton) et revêtement, tassements du support par fluage,

- éclatements au niveau d'attaches en acier, par gonflement sous l'effet de la rouille. Ce type ne se rencontre plus que dans les monuments anciens (Inde) et dans les réparations malencontreuses faites par le passé (Parthénon) : les attaches sont de nos jours en métaux inoxydables.

- cristallisation de *gypse* dans les atmosphères polluées par des gaz sulfureux (provenant de la combustion de charbon et de produits pétroliers) : l'eau de condensation se charge en acide sulfurique, qui attaque la calcite et produit du gypse. La cristallisation du gypse s'accompagne d'une augmentation de

volume, qui peut désagréger les roches poreuses.

- *dilatation hydrique* : en soumettant des marbres à des cycles de trempage et de séchage, on a constaté des expansions permanentes de 50 à 248.10-6, les plus fortes valeurs correspondant aux marbres ayant la plus forte absorption d'eau. De plus on constate que des contraintes différentes apparaissent sur chaque face, ce qui entraîne un léger cintrage des plaques (rayon de courbure entre 219 et 1984 m).

-le *gel*, quand de l'eau s'introduit dans les espaces intergranulaires : on sait que la pression de cristallisation de la glace est considérable (61 MPa à -5°C, 113 MPa à -10°C). La résistance à l'extension du marbre de Carrare étant de 10 à 23 MPa, un gel à -2°C suffirait à désagréger la roche si les pores se trouvaient saturés d'eau. Cependant la porosité des marbres de qualité est faible, de l'ordre de 1 %), et le gel ne semble pas un risque grave pour les marbres ; en outre, la décohésion granulaire se rencontre aussi dans des climats sans gel comme celui de la Gulf Coast.

- la *relaxation de contraintes* : dans certaines carrières de Carrare le massif de marbre est soumis à des contraintes actuelles, d'origine tectonique, se marquant par la tendance à la fermeture des traits de sciage. Une grande partie des contraintes est libérée au cours de l'extraction des blocs et du sciage des tranches ; s'il en subsistait, elles pourraient causer un cintrage des plaques de revêtement, mais ce cintrage se manifesterait par des bombements tantôt convexes tantôt concaves, car les plaques sont posées au hasard.

- la *dilatation thermique* : toutes les roches ornementales se dilatent (fig. 15), avec des coefficients compris généralement entre 2 et 13.10-6/°C (soit 2 et 13 µm/m.°C). L'allongement d'une longueur de 10 m, passant de 0 à 80°C, est donc compris entre 1,6 et 10,4 mm. En comparaison le coefficient de dilatation du béton est de 10 à 12, celui de l'acier de 11 ; certains métaux et alliages sont beaucoup plus dilatables, comme le laiton (20), l'aluminium (23), le plomb (29), et beaucoup plus pour les résines de synthèse. Les DTU prévoient de subdiviser les grandes surfaces de roches de revêtement par des joints de dilatation souples, selon des règles précises. En l'absence de tels joints, les roches chauffées par le soleil se dilatent plus que la maçonnerie ou les supports métalliques, et des contraintes s'accumulent dans le revêtement ; elles sont absorbées dans un premier temps par déformation élastique, puis conduisant à des ruptures au delà d'un certain seuil. C'est le cas des pavés de rues de Paris, jointoyés au mortier, et des monuments indiens où le marbre a été posé à joints vifs.

- la *décohésion granulaire* apparaît comme une conséquence de la dilatation thermique, mais elle produit une déformation irréversible alors que la dilatation simple est réversible), et une chute des caractéristiques mécaniques de la roche. Nous allons voir comment elle s'explique par l'anomalie de dilatation de la calcite.

Particularités de la dilatation de la calcite

La plupart des minéraux, sauf ceux appartenant au système cubique, présentent une dilatation inégale selon les directions : leur dilatation est caractérisée par trois coefficients différents, orientés selon les axes de symétrie des cristaux, ils sont anisotropes (fig.15) .

La calcite, composant principal des marbres et des calcaires, est également anisotrope, mais de plus la dilatation est négative selon certaines directions cristallographiques (fig. 16):

- suivant l'axe de symétrie d'ordre 3 (ou axe c), le coefficient de dilatation est très élevé (20 à 24.10-6/°C), du même ordre de grandeur que celui de métaux très dilatables comme l'aluminium et le magnésium,

- dans les directions perpendiculaires à c, le coefficient est négatif (-4 à -7.10-6), c'est à dire que le cristal se rétracte quand on le chauffe

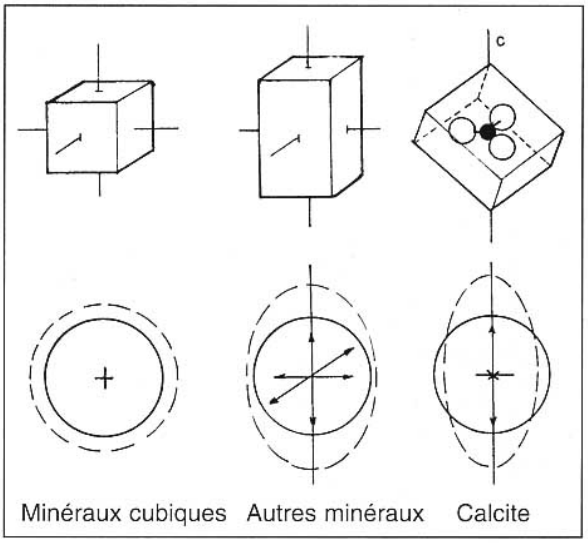

Fig. 15 - Schéma de dilatation dans les minéraux

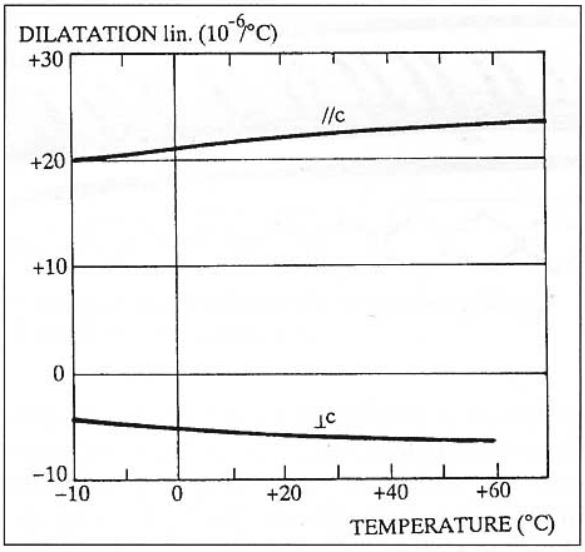

Fig. 16 - Coefficients de dilatation linéaires de la calcite entre -10 et +60°C (d'après Gascon et Balbas, 1986)

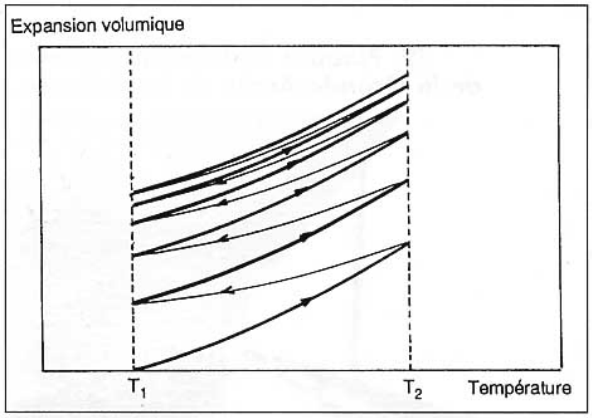

Fig. 17 - Les cycles thermiques successifs entre les températures T1 et T2 laissent une porosité résiduelle, mesurable sur l'axe des déformations (expansion volumique)

Dilatation des calcaires et des marbres

Dans les **calcaires** (pierres calcaires et calcaires marbriers) les valeurs de dilatation linéaire publiées indiquent des valeurs comprises entre 2 et 6, avec quelques valeurs anormalement plus élevées dans certains calcaires rouges à hématite, comme le Rubino rosso de Stazzema près de Massa (8,7) et le Rouge de Vérone (9,4 à 9,8), et parfois des valeurs négatives (calcaire de Winn Parish, Louisiane). Une

anisotropie de dilatation a été montrée par des mesures faites en Espagne (*Rouge d'Alicante* et *Crema Capri* .

Dans les **marbres calcaires** les valeurs publiées s'étendent suivant une gamme très large allant de 1 à 16, avec parfois des valeurs négatives (Macael). L'*anisotropie* de dilatation des marbres a été clairement mise en évidence dès 1949 par Rosenholtz et Smith sur les marbre de Yule (Colorado) et de Crestmore (Californie) : ce sont des marbres dont les cristaux ont une orientation préférentielle, la dilatation étant beaucoup plus forte le long de cette orientation que dans le sens perpendiculaire. Ces auteurs ont aussi mis en évidence un autre phénomène important : à la fin du premier cycle de chauffage, les échantillons ne reviennent pas à leur longueur initiale, il reste une *déformation résiduelle*. Soumettant alors le marbre à un second cycle, ils constatent que la dilatation est beaucoup plus faible qu'au premier.

Plusieurs auteurs ont depuis complété ces études, dont les résultats se résument comme suit :

- l'anisotropie de dilatation est fréquente dans les marbres : les marbres à cristaux orientés, comme celui de Saint Béat, sont les plus anisotropes, avec une dilatation négative perpendiculairement aux axes.

- le chauffage se traduit par l'ouverture de microfractures entre les grains, qui créent une porosité et une perméabilité (communications entre pores, permettant le passage des fluides). Ces ouvertures apparaissent à partir de seuils variables, parfois dès 40 à 50°C ; elles se traduisent par l'émission de bruits ultrasoniques.

- pendant le refroidissement les microfractures se referment, avec émission d'autres microbruits; mais la fermeture est incomplète, sans doute à cause de frottements entre grains, l'échantillon ne revient pas à ses dimensions d'origine, il reste alors une porosité résiduelle (fig. 17).

- la porosité résiduelle s'accroît au cours des cycles successifs, tendant vers une limite : les premiers cycles de chauffage sont les plus actifs dans l'ouverture des microfractures.

- la porosité résiduelle abaisse notablement la résistance mécanique du marbre.

Pour comprendre la formation de microfractures par dilatation anisotrope, considérons une coupe dans un marbre calcaire, dont les grains sont séparés par des limites planes, formant un réseau hexagonal. Si tous les grains ont des axes cristallins parallèles, il y a dilatation globale dans un sens et contraction dans l'autre, mais pas d'ouverture entre grains. Par contre si deux grains parallèles 1 et 2 sont en contact avec un grain perpendiculaire 3 (fig. 18), les grains 1 et 2 s'écartent, car le grain transverse 3 empêche la contraction. La largeur de cette ouverture peut se calculer : pour une température s'élevant de 20 à 60°C, elle est de 0.9 µm pour des grains de 1mm, de 0,18 µm pour des grains de 0,2 mm. Les ouvertures devraient donc être plus importantes pour les marbres à gros grains. Le calcul de la contrainte d'extension indique environ 23 MPa, valeur supérieure à la résistance à la traction de la plupart des marbres.

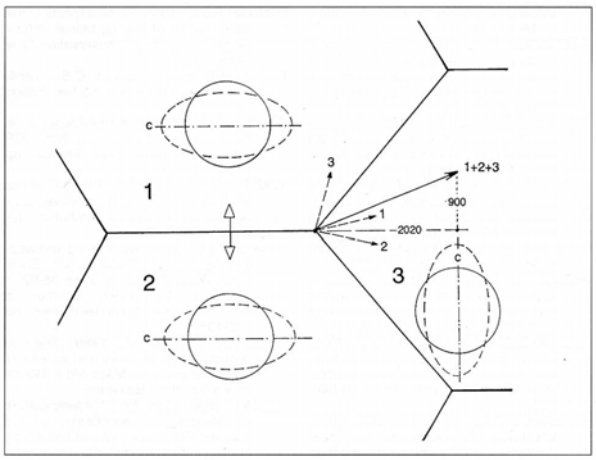

Fig. 18 - Apparition de contraintes de tension, avec ouverture des joints, entre des cristaux de calcite d'orientation différente

Fig. 19 - Socle en marbre blanc craquelé, Grand Trianon de Versailles

Les **granites** sont aussi soumis à la décohésion granulaire : l'examen de monuments antiques (Delos, Evora), où le granite a été employé en concurrence avec le marbre, révèle que le granite est plus facilement désagrégé que le marbre. Même des monuments du Moyen Age (Saint Jacques de Compostelle, Avila) montrent des granites très altérés. Toutefois la désagrégation granulaire n'a pas encore été signalée sur les revêtements de façades récents en granites.

Conclusion

La dilatation des roches est plus complexe que celle des métaux, du fait de l'anisotropie des cristaux. La mesure de la dilatation doit se faire selon trois directions perpendiculaires, orientées par mesures en carrière (stratification, foliations, linéations...), et pour toute la gamme de températures que peut subir un revêtement.

Une roche monominérale à cristaux parfaitement orientés a une dilatation fortement anisotrope, mais les contraintes entre grains sont faibles.

Dans les roches à grains non orientés la dilatation globale est isotrope, tandis que de fortes contraintes apparaissent entre grains de nature ou d'orientation différente, conduisant à la séparation des grains.

On sait que la présence d'**eau** dans la roche favorise la propagation des fractures : dans les essais en compression simple et en extension, la résistance de la roche est notablement diminuée en présence d'eau.

Dans les **marbres** compacts l'effet de l'eau reste superficiel (dissolution, perte du poli), mais dès que la roche est soumise à des cycles thermiques une porosité de microfractures se développe : si les grains ont des orientations statistiquement quelconques, la dilatation globale est isotrope, mais des contraintes apparaissent aux limites de grains, qui tendent à se séparer. Lorsque la température redescend, les microfractures entre grains ne se referment pas complètement, il reste une porosité résiduelle, qui peut se cumuler au cours de cycles successifs et causer le cintrage des plaques. Une fois cette porosité communicante établie, l'eau peut s'infiltrer ou se condenser, et divers types d'altérations interviennent librement (dissolution, cristallisation de sels, attaque acide par le gaz carbonique et le gaz sulfureux, gonflement du gypse, gel). La plus forte dilatation des marbres s'observe lors des premiers cycles thermiques, elle diminue au cours des cycles ultérieurs, d'où l'intérêt de disposer d'échantillons de comparaison n'ayant jamais été soumis aux intempéries.

Le phénomène est particulièrement grave pour les marbres de revêtements de façades, posés en

épaisseur mince. L'absence de joints élastiques est une cause évidente de détériorations (Taj Mahal en Inde, pavés de marbre à Paris). Il est évident que les plaques doivent être suspendues librement, ou que des groupes de plaques doivent être séparés par des joints souples (conformément aux DTU), de manière telle que des contraintes ne puissent se développer.

Cependant, même avec des joints correctement mis en place, certains marbres subissent la décohésion granulaire. Il convient de détecter avant la pose les types enclins à cette maladie, en vue de prévenir de nouveaux accidents. On devrait enregistrer les températures réelles dans des plaques de façades, en même temps que la teneur en eau, pour évaluer les températures extrêmes, les vitesses de variation de la température, les gradients thermiques dans la roche. En fonction de ces données, il serait possible de fixer les conditions d'un test, applicable tant aux marbres qu'aux calcaires et aux granites, et évaluer les dégâts invisibles par des mesures non destructives (vitesse du son, atténuation de la fréquence de résonance fondamentale, etc.). Il est également possible par ces mesures de suivre l'évolution de la décohésion sur une façade, avant que le cintrage des plaques ne devienne manifeste.

Des propositions vont être faites, dans le cadre de la normalisation européenne sur les pierres naturelles, et dans le groupe de travail que la France anime (CEN/TC 246 WG2) :

- une norme de *mesure du coefficient de dilatation* thermique,

- une norme d'*essai de vieillissement* accéléré par chocs thermiques avec humidification. Le groupe de travail aura ensuite la lourde tache de proposer les spécifications correspondantes.

Quelques références

BATHIA C., 1994, Deterioration of marble de to physical reasons and its conservation (Taj Marble, a test case), 3d World Archeological Congress, New Delhi.

BORTZ S. et al., 1993, Accelerated weathering in building stone, Int. J. Rock Mechanics, 30/7, p. 1569-1562.

BOUINEAU A. et PERRIER R., 1995, La décohésion granulaire, maladie des revêtements de façades en marbre, Mines et Carrières, vol. 77, août-sept. 1995, p. 69-75.

CALLEJA L. *et al*., 1986, Resistencia à la tracción en rocas sometidas a ciclos termicos, Bol. Geol. y Minero de España, 97/2, p. 222-231.

COOPER H.W. et SIMMONS G., 1977, The effect of cracks on the thermal expansion of rocks, Earth and Planetary Science Letters, v.36, p. 404-412.

GASCON F. et BALBAS M., 1986, Modelo tensorial en la dilatacion lineal termica anisotropa de marmoles, Bol. Geol. y Minero de España, 97/6, p.793-802.

GOMES DA SILVA C.M., 1990, Alteração e alterabilidade de alguns mármores da região de Estremoz-Borba-Vilaviçosa, Rochas e Equipamientos, n°18, 2°trim.

GUESSOUS Z., 1981, Comportement mécanique des roches fissurées : étude en traction directe d'un marbre de Carrare préfissuré thermiquement, Thèse, Grenoble.

HOMAND-ETIENNE F., 1986, Comportement mécanique des roches en fonction de la température, Mém. Sciences de la Terre, n° 42.

LOGAN J.M. et al., 1993, A case study of the properties of marble as building veneer, Int. J. of Rock Mechanics, 30/7, p. 1531-1537.

MANI B.R. et GOEL M.K., 1995, Conservation of work heritage in Delhi, Intern. Seminary on Stone Conservation, New Delhi.

PERAMI R., 1971, Contribution à l'étude expérimentale de la microfissuration des roches sous actions mécaniques et thermiques, Thèse Toulouse.

ROZENHOLTZ J.L. et SMITH D.T., 1949, Linear thermal expansion of calcite, var. Iceland spar, and Yule marble, American Mineralogist, 34 (II), p. 846-854.

ROZENHOLTZ J.L. et SMITH D.T., 1950, Crestmore Skyblue marble, its linear thermal expansion and color, American Mineralogist, p. 1949-1954.

SENGAR P.B.S., 1995, Some aspects of the conservation of the Taj Mahal, Intern. Seminary on Stone Conservation, New Delhi.

THOMASEN S.V. et EWART C.S., 1984, Durability of thin set marble, Espoo Conference.

WAI R.S.C. et al., 1982, Thermal stress analysis in rocks with non-linear properties, Int. J. of Rock Mechanics, 19, p. 211-220.

WINKLER E.M., 1987, Weathering and weathering rates of natural stones, Envir. Geol. Water Sc., v. 9, n° 2, p.85-92.

WUNDERLICH M., 1992, Marmor im Aussenbereich, Naturstein, 9/92, p. 132-135.

ZEZZA U. et al., 1985, Effect of temperature on intergranular decohesion of the marbles, 5° Congrès Int. sur l'Altération et la Conservation de la Pierre, Lausanne.