

Fig. 14. Expansion of Chloride Solutions on Freezing in Capillary Vessel

Profil de répartition des carbonates formés lors d'une carbonatation naturelle

Y.F. Houst

Résumé : On a mesuré le profil de répartition des carbonates formés lors de la carbonatation naturelle de mortiers exposés directement aux intempéries et protégés. On a constaté que la carbonatation des mortiers protégés des intempéries directes était plus élevée. La profondeur de carbonatation mesurée après pulvérisation de phénolphaléine n'est pas n'est corrélable directement avec le profil de carbonatation. Les diffusivités calculées sur la base de la répartition des carbonates sont du même ordre de grandeur que celles mesurées. Un seuil de diffusivité a été constaté lorsque la concentration en sable augmente. Ce point est discuté et comparé à d'autres caractéristiques qui présentent le même comportement.

Synopsis : The distribution profile of carbonates formed by natural carbonation of mortars exposed outdoors has been measured. The carbonation of mortars sheltered from rain is higher. The depth of carbonation measured by the phenolphthalein method cannot be directly correlated with the carbonate distribution. The diffusivities calculated on the basis of the distribution of carbonates are of the same order of magnitude as the measured ones. A threshold value of diffusivity appears when the sand concentration increases. This point is discussed and compared with other characteristics which exhibit such a behavior.

Mots clés: Carbonatation; diffusivité; porosité; mortiers; auréole de transition; percolation; phénolphaléine.

Yves F. Houst, dr. ès sciences, membre de l'ACI, est enseignant-chercheur au Laboratoire de technologie des poudres de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) en Suisse. Son activité couvre essentiellement les propriétés physico-chimiques des ciments et ajouts, ainsi que la durabilité des matériaux de construction à base de ciment.

INTRODUCTION

L'importance de la carbonatation du béton d'entrobage pour la corrosion des armatures est bien connue. L'épaisseur de la couche carbonatée est généralement mesurée après pulvérisation d'un indicateur de pH, qui change de couleur dans un certain domaine de pH. En fait, la propagation de la carbonatation est plus complexe qu'on le suppose généralement et ne peut pas être mise en évidence complètement par un indicateur de pH. Diverses autres méthodes ont été utilisées pour mesurer quantitativement la progression de la carbonatation. On peut citer la diffraction des rayons X, la thermogravimétrie, la spectroscopie infrarouge ou raman et les méthodes chimiques traditionnelles. Ces méthodes ont été discutées par Parrott (1).

La possibilité d'effectuer des prélèvements précis et reproductibles, ainsi que la disponibilité d'un analyseur performant, nous ont amené à étudier la répartition des carbonates dans divers mortiers après exposition à des atmosphères naturelles. A partir de ces mesures, il est possible d'évaluer la diffusivité du CO₂ et de comparer ces résultats à ceux que nous avons obtenus à partir de mesures directes (2).

Il est généralement admis que les bétons exposés à l'extérieur, mais protégés des intempéries directes se carbonatent plus rapidement que ceux qui ne le sont pas (3). Lors de mesures effectuées il y a quelques années sur certains mortiers, nous avons trouvé le contraire. Afin de suivre quantitativement l'avancement de la carbonatation et de lever l'incertitude mentionnée ci-dessus, nous avons mesuré la teneur en carbonates en fonction de la profondeur sur des mortiers exposés directement aux intempéries et sur des mortiers protégés. Nous avons également mesuré la profondeur de carbonatation après pulvérisation de phénolphaléine. Les mesures ont été effectuées sur six mortiers dont le rapport eau/ciment varie de 0.4 à 0.9.

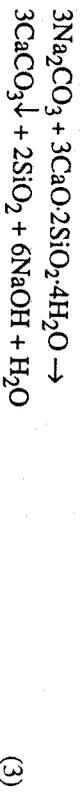
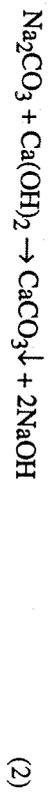
LE PROCESSUS DE CARBONATATION

On appelle carbonatation des matériaux à base de ciment, la réaction de neutralisation des composés basiques du ciment Portland par le gaz carbonique présent dans l'atmosphère. Ces composés basiques sont essentiellement les produits d'hydratation des silicates de calcium, c'est-à-dire Ca(OH)₂ et C-S-H¹⁾.

La solution interstitielle du béton durci contient essentiellement des hydroxydes de sodium et potassium. En effet, Ca(OH)₂ a une solubilité qui diminue

fortement lorsque la concentration en ions hydroxydes augmente. Pour une concentration en hydroxydes de 0.5 mol/litre, on a calculé que dans un extrait de béton au ciment Portland, la concentration en Ca²⁺ est de l'ordre de 1.10⁻⁵ mol/litre (4).

Les réactions de neutralisation peuvent donc être écrites ainsi:



En réalité, ces réactions ont lieu en solution où Ca(OH)₂ doit se dissoudre au fur et à mesure que CaCO₃ précipite. C-S-H, le silicate de calcium hydraté est sous forme de gel qui réagit avec les carbonates. Aussi bien la réaction 2 que la réaction 3 libère des hydroxydes qui sont ainsi régénérés et peuvent réagir avec CO₂ selon la réaction 1 et le processus se poursuit jusqu'à disparition Ca(OH)₂ et C-S-H. La réaction 1 est une réaction de neutralisation d'une base forte par un acide faible. Elle est accompagnée d'une variation de pH. Des réactions similaires peuvent être écrites avec le potassium.

De nombreux facteurs influencent la vitesse de carbonatation. Parmi les plus importants, on peut citer:

- le rapport eau/ciment
- la cure
- le dosage en ciment
- le type de ciment
- la concentration en gaz carbonique
- la teneur en eau
- la température
- la teneur en alcalins
- les fissures

La cinétique de carbonatation peut être décrite en première approximation comme un processus de diffusion d'un gaz (CO₂) à travers un matériau poreux. En appliquant la première loi de Fick et en admettant que la réaction du CO₂ est instantanée, on trouve après intégration la relation suivante:

$$x = \sqrt{\frac{2D}{a}} \frac{c}{\sqrt{t}} \tag{4}$$

où x est l'épaisseur carbonatée au temps t, D la diffusivité effective de CO₂, c sa concentration dans l'atmosphère et a la concentration en produits carbonatés. Cette équation peut s'écrire sous la forme bien connue:

$$x = A \sqrt{t} \tag{5}$$

$$\text{où: } A = \sqrt{\frac{2D}{a}} \frac{c}{a} \tag{6}$$

1) Les abréviations utilisées dans la chimie du ciment sont:
C = CaO
S = SiO₂

H = H₂O

Pour arriver à l'équation 4, on admet que D et c sont constants et indépendants du temps et de la profondeur. D n'est normalement pas indépendant du temps, ni de la profondeur. Cependant, après un certain temps la carbonatation atteint une profondeur où la microstructure est relativement constante (plus d'effet de paroi, ni de modification importante du degré d'hydratation).

En réalité, la carbonatation n'atteint pas une profondeur définie par un nombre comme le laisse croire l'équation 5. Après un certain temps, on peut schématiquement distinguer trois zones. La première zone depuis la surface est complètement carbonatée ou plutôt sa teneur en carbonates est constante. Puis on observe une zone de transition où le degré de carbonatation varie de 1 à 0. La dernière zone n'est pas carbonatée. On appelle souvent la zone de transition front de carbonatation. En fait, la carbonatation n'est jamais complète et l'épaisseur et la forme du front de carbonatation varient avec de nombreux paramètres comme le type d'exposition et la composition du matériau. Les mesures avec des indicateurs de pH donnent une profondeur de carbonatation qu'il est généralement difficile de situer à l'intérieur du front de carbonatation.

PARTIE EXPERIMENTALE

Matériaux

Ciment -- Le ciment utilisé est de type Portland normal (CP) et provient de l'usine d'Éclépens (Suisse). Sa composition chimique est reportée dans la table 1. La courbe granulométrique du ciment est reportée sur la figure 1. Elle a été mesurée au moyen d'un granulomètre à laser, de type Mastersizer de la Maison Malvern.

Granulats -- Les granulats utilisés pour la confection des mortiers sont des sables de quartz en quatre composantes: 0.1-0.3 mm; 0.4-0.8 mm; 0.8-1.8 mm; 2.0-4.0 mm dont les courbes granulométriques sont reportées sur la figure 2.

Mortiers -- La composition des mortiers est reportée dans la table 2. On a confectionné 6 dalles de dimensions 400/400/70 mm, qui après 28 jours de cure dans l'eau ont été conservées à l'air du laboratoire pendant 14 mois. Après cette période de stockage, une bande de 10 cm de largeur a été sciée dans les dalles, puis exposée aux intempéries, tandis que l'autre face était protégée de la pluie. Les surfaces sciées étaient inclinées à 45° et exposées à l'ouest.

Caractérisation et analyse des mortiers

Masse volumique apparente - Porosité -- Nous avons utilisé la méthode traditionnelle qui consiste à déterminer le volume des éprouvettes à partir d'une pesée dans l'air et dans l'eau (poussée d'Archimède). Les éprouvettes ont été séchées à 105 °C jusqu'à masse constante, pesées à sec, imbibées d'eau sous vide, pesées dans l'eau et dans l'air. La porosité est calculée à partir de la masse d'eau absorbée lors de l'imbibition sous vide.

Analyse chimique des mortiers -- Les prélèvements ont été effectués au moyen d'une fraise spécialement développée au Laboratoire de Conservation de la Pierre

de l'EPFL pour l'analyse des pierres des monuments (5). La fraise comprend quatre copeaux en métal dur décalés de 90°. Elle est fixée sur une perceuse dont les déplacements sont programmables par pas d'au moins 0.1 mm avec une précision d'environ 0.03 mm. Le diamètre de fraisage est de 36 mm. Lors de chaque fraisage, on récupère la poudre qui peut être directement analysée. Cette méthode permet de construire le profil de concentration en CO₂ en fonction de la profondeur. Toutes les analyses de carbonates ont été effectuées sur un analyseur automatique Leybold CSA 2003. Cet analyseur est constitué d'un four à induction, permettant la décomposition thermique des échantillons et d'un analyseur de gaz à infrarouge. On ajoute à l'échantillon (0.05 à 0.5 g de poudre) de la poudre de fer comme fondant et des copeaux de tungstène comme conducteur. Le chauffage est réalisé dans un courant d'oxygène qui provoque l'oxydation de nombreux composés et notamment ceux du carbone. Donc finalement le carbone sous toutes les combinaisons chimiques est transformé en CO₂ et analysé comme tel, grâce à un détecteur mesurant l'absorption du CO₂ dans l'infrarouge. La méthode est très sensible. Elle convient aussi bien pour l'analyse de traces que de teneurs majeures.

Mesure de la profondeur de carbonatation -- Après le prélèvement effectué, on pulvérise une solution de phénolphaléine sur les surfaces latérales du trou fraîchement foré. La partie "non carbonatée" se colore alors en rouge, tandis que la partie "carbonatée" ne change pas de couleur.

RESULTATS ET DISCUSSION

Les dalles ont été analysées après 24.7 et 40.5 mois d'exposition à l'extérieur. Les résultats des mesures de carbonatation pour deux types d'exposition sont donnés sur les figures 3 à 9. Les porosités totales (e), mesurées avant carbonatation, sont indiquées sur ces figures. Seuls les résultats de l'échantillon de E/C = 0.9 sont donnés pour 24.7 mois d'exposition (fig. 3), alors que les résultats de tous les échantillons sont donnés pour 40.5 mois d'exposition.

On remarque d'abord que la carbonatation est d'autant plus importante et nette que E/C est élevé, c'est-à-dire que la porosité est élevée. L'examen de surfaces fraîchement créées sur lesquelles on a pulvérisé une solution de phénolphaléine, montre une séparation nette de la zone incolore (carbonatée) et de la zone colorée en rouge (non carbonatée) pour les mortiers de E/C ≥ 0.6. Le mortier de E/C = 0.4 présente, sur les deux faces, une zone d'environ 30 mm d'épaisseur avec des filets colorés en rouge. Cette constatation, bien que moins nette, peut être faite sur le mortier de E/C = 0.5. On voit donc admettre que sur ces échantillons, la carbonatation ne présente pas un front bien défini comme on a l'habitude de le constater, mais qu'elle est partielle et profonde. L'examen visuel montre que le mortier possède d'assez nombreux gros pores entre 0.5 et 2 mm, qui sont dus à la difficulté de compacter un tel mortier de consistance terre humide. Le gaz carbonique peut donc diffuser rapidement dans le mortier grâce à un système de pores grossiers en ne carbonatant qu'une partie du matériau. Les autres mortiers plus homogènes et avec une porosité plus fine, ne présentent donc pas ce type de carbonatation. La teneur en carbonates des mortiers de E/C = 0.4 et 0.5 varie faiblement de la surface vers l'intérieur. Les profondeurs de carbonatation D_p et

Pa indiquées sur les figures 3 à 9 correspondent à la valeur moyenne de la profondeur de carbonatation que l'on peut mesurer après pulvérisation de phénolphaléine à partir des faces exposées et abritées. L'allure aux résultats de teneurs en carbonates des mortiers de E/C ≥ 0.6 sont conformes aux résultats de Tuuti (6) et Kashino (7) par exemple. Le maximum de produits carbonatés varie entre 8 % et 10 % de CO₂ à proximité de la surface exposée et 1 % vers l'intérieur. Cette valeur est due à la teneur en CO₂ résiduelle des constituants des mortiers. On remarque aussi que le degré de carbonatation est plus faible pour les mortiers de E/C bas. Ceci peut provenir, en partie du moins, d'un degré d'hydratation du ciment plus bas.

La carbonatation mesurée sur la face des mortiers directement exposée aux intempéries est en général moindre et moins profonde que celle mesurée sur la face abritée. Seul le mortier de E/C = 0.9 à l'âge de 24.7 mois se comporte différemment. On voit donc que les mortiers très poreux peuvent se carbonater plus rapidement lorsqu'ils sont exposés aux intempéries, certainement parce qu'ils peuvent sécher suffisamment vite et que, dans ce cas, le facteur limitant la vitesse de carbonatation est la diffusion du CO₂. Dans les autres mortiers, la diffusion du CO₂ est plus lente, car l'eau de pluie obture en partie les pores et ne permet pas au CO₂ de diffuser à l'état gazeux. Les résultats obtenus sur les mortiers directement exposés aux intempéries sont plus difficiles à interpréter, car la carbonatation peut se produire en partie grâce au CO₂ dissous dans l'eau de pluie qui est elle-même absorbée par capillarité dans le mortier. On est donc loin des seuls phénomènes de diffusion gazeuse. La teneur en carbonates de la couche superficielle de ces mortiers est variable. Ceci est certainement dû au transport d'hydroxydes dissous lors des cycles d'humidification-séchage.

Il n'y a pas de corrélation évidente entre les mesures de profondeur de carbonatation après pulvérisation de phénolphaléine et les profils de répartition des teneurs en carbonates. En effet, on n'observe aucune coloration dans les zones de certains mortiers qui sont loin d'être entièrement carbonatés (figures 6 et 7 par exemple). Il est plus surprenant que sur le même mortier, on mesure des profondeurs de carbonatation correspondant à des teneurs en carbonates assez différentes (figures 7 et 9 par exemple). Toutefois, une partie de ces différences peut être due à la variabilité du front de carbonatation mesuré avec la méthode à la phénolphaléine dont il est parfois difficile d'évaluer la moyenne. Une autre cause, vraisemblablement plus importante est que certains cristaux de CH et des grains de ciment partiellement hydratés ne subissent qu'une carbonatation superficielle. Lors de la rupture du mortier avant la pulvérisation de phénolphaléine, la partie de ces cristaux de CH et de ces grains de ciment peut être mise à nu et donc donner une réaction basique. L'analyse des carbonates fournit une valeur moyenne correspondant au volume du prélèvement. Ce volume qui est de 200 mm³ pour un pas de prélèvement de 0.2 mm n'est pas toujours représentatif et explique certaines variations brusques de la composition.

On a calculé pour chaque mortier et chaque exposition la quantité de carbonates que l'on peut attribuer à la réaction du CO₂ atmosphérique avec le ciment. On a admis que, à partir de 10 à 12 mm de profondeur, la teneur en carbonates est constante et n'est due qu'aux composants du mortier. La quantité de carbonates formés est proportionnelle à la surface comprise entre la courbe de la teneur en carbonates et la droite parallèle à l'abscisse représentant la teneur en carbonates résiduels. Les résultats sont représentés sur la figure 11. On observe une relation approximativement linéaire entre la quantité de carbonates formés et E/C. Les

mortiers de E/C = 0.4 et 0.5 directement exposés aux intempéries s'écartent sensiblement de cette relation et on n'en a pas tenu compte pour tracer la droite.

On a calculé d'autre part une *profondeur de carbonatation* en admettant que la teneur en carbonates était constante de la surface au front de carbonatation, c'est-à-dire que la quantité de carbonates formés est proportionnelle à la surface d'un rectangle. Les profondeurs de carbonatation ainsi calculées ont été reportées sur la figure 12. On n'a pas tenu compte des points des mortiers de E/C = 0.4 et 0.5 directement exposés aux intempéries pour tracer les droites de la figure 12. Une telle relation linéaire entre la profondeur de carbonatation et E/C avait déjà été proposée par Vénat (8).

Si l'on identifie la quantité de produits de carbonatation formés après un temps t à la quantité de produits carbonatés a de l'équation (4) et la profondeur de carbonatation calculée ci-dessus à x , on peut calculer la diffusivité D du CO₂. Les résultats de ce calcul, effectué avec une concentration en CO₂ de 0.35 % (0.016 mol/m³), sont représentés graphiquement sur la figure 13.

Les diffusivités calculées selon l'équation (4) sont du même ordre de grandeur que celles que nous avons déterminées expérimentalement sur des mortiers de porosité comparables (9), mais avec des dosages en ciment différents et un sable nettement plus fin (0.1 à 0.6 mm). On observe sur le diagramme diffusivité-concentration en sable de la figure 13 un minimum de diffusivité pour une concentration en sable d'environ 60 %. Nous avons obtenu des résultats expérimentaux similaires (9), mais le minimum se situait à environ 50 % de concentration en sable.

Diverses caractéristiques en relation avec le transport de vapeur d'eau ou de CO₂ (9, 10) ou même le module de Young (11) manifestent un comportement semblables: elles présentent un seuil lorsque la concentration en granulats (non poreux) croît. Diverses explications ont été avancées pour expliquer ce phénomène. On a attribué ce comportement à la percolation des auréoles de transition autour des granulats (9, 10). A une certaine concentration en granulats, les auréoles de transition, qui ont une porosité plus élevée que la "pâte de ciment", deviennent interconnectées et créeraient ainsi de canaux favorables au transport de masse. Wittmann et al. (11) expliquent la brusque diminution du module de Young de mortiers lorsque la concentration en sable est supérieure à 50 % au fait que lorsque l'épaisseur du film de pâte de ciment entre les grains de sable devient trop faible, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de la taille des grains de ciment, ces derniers ne peuvent plus passer dans les interstices entre les grains de sable et la porosité croît ainsi brusquement. Les petits grains de sable agissent donc comme une sorte de tamis. D'autre part, il est évident que lorsque la teneur en ciment devient trop faible, les produits d'hydratation ne peuvent plus remplir l'espace et qu'il en résulte une porosité supplémentaire. La percolation de ces pores pourrait également expliquer l'apparition d'un seuil. Il est vraisemblable que ces divers mécanismes jouent un rôle.

Les échantillons de mortier ont été sciés avant d'être exposés à l'extérieur et donc tout effet de paroi est exclu. Il est vraisemblable que la composition superficielle de mortiers coffrés exposés au même environnement aurait été légèrement différente. En effet, la peau des mortiers est plus riche en liant et plus poreuse. Ceci devrait se traduire par une teneur en carbonates plus élevée.

CONCLUSIONS

La quantité de carbonates et la profondeur de carbonatation sont plus élevées sur les faces protégées des mortiers exposés à l'extérieur. Cela est dû au frein à la diffusion de l'eau apportée par les intempéries qui limite la porosité disponible pour la diffusion gazeuse. On a mis en évidence une relation linéaire croissante entre E/C et la quantité de carbonates formés.

Il n'y a pas de relation évidente entre la profondeur de carbonatation mesurée à la phénolphaléine et le profil de teneur en carbonates. Cela peut être expliqué par la mise à nu de parties de grains de ciment non entièrement carbonatés, puisque la phénolphaléine indique toujours une profondeur inférieure à celle où la teneur en carbonates est minimum.

Les mortiers de E/C = 0,4 et 0,5 gâchés avec le moins d'eau, ne présentent pas de front de carbonatation, mais une carbonatation diffuse assez profonde, avec des îlots de matière non entièrement carbonatée. Ceci est dû à la présence de gros pores régulièrement répartis, liés à la consistance *terre humide* du mortier frais. Ces pores permettent au CO₂ de diffuser dans le mortier avant qu'il ne carbonate entièrement la matière entre les pores. Un modèle bi-poreux permet d'expliquer ces résultats.

En revanche, mortiers de consistance courante présentent un front de carbonatation bien défini. Il s'agit d'une zone d'autant plus large que le mortier est plus poreux, limitée vers l'extérieur par du mortier entièrement carbonaté et, vers l'intérieur, par du mortier non carbonaté. Le front de carbonatation est donc une tranche du matériau où la carbonatation varie de totale à nulle.

La diffusivité du CO₂ à travers des mortiers a été calculée sur la base des profils de répartition des carbonates formés après 40,5 mois d'exposition. Les diffusivités effectives ainsi calculées sont du même ordre de grandeur que celles déterminées expérimentalement.

On a trouvé un seuil à la diffusivité du CO₂ lorsque la concentration en sable augmente, comme d'ailleurs avec la détermination expérimentale. Ceci pourrait être expliqué par la percolation ~~par la percolation~~ des auréoles de transition, des gros pores ou par une concentration en ciment insuffisante pour créer un film de pâte de ciment continu entre les granulats.

REFERENCES

1. Parrott L.J., "A Review of Carbonation in Reinforced Concrete"; Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1987
2. Houst Y.F. and Wittmann F.H. "Influence of Porosity and Water Content on the Diffusivity of CO₂ and O₂ through Hydrated Cement Paste"; soumis pour publication à *Cement and Concrete Research*.
3. Schiessl P. "Zur Frage der zulässigen Rissbreite der erforderlichen Betondeckung in Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 255, Wilhelm Ernst + Sohn, Berlin, München, Düsseldorf, 1976.
4. Longuet P. "La protection des armatures dans le béton armé élaboré avec des ciments au laitier"; Silicates industriels, vol. 41, 1976, pp. 321-328.
5. Girardet F. and Félix C. "Accumulation des composés soufrés dans un mur en molasse abrité de la pluie à l'Eglise St-François à Lausanne, Suisse"; The conservation of Stone, IIA, International Symposium, October 1981, Cento Conservazione Sculture all'Aperto, Bologna, 1981, pp. 91-105.
6. Tuutti K. "Corrosion of Steel in Concrete"; Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
7. Kashino N. "Investigation into the Limit of Initial Corrosion Occurrence in Existing Reinforced Concrete Structures"; Third International Conference on the Durability of Building Materials and Components (Edited by T. Sneek and A. Kaarresalo), Technical Research Centre of Finland, Espoo, 1984. Vol. 3, pp. 176-177.
8. Vénaut M. "Relations entre la carbonatation du béton et les phénomènes de la corrosion des armatures du béton"; Annales de l'ITBTP, No 364, 1978, pp. 42-47.
9. Houst Y.F., Sadouki H. and Wittmann F.H. "Influence of Aggregate Concentration on the Diffusion of CO₂ and O₂"; Interfaces in Cementitious Composites (J.C. Maso Ed.), E.&F. Spon, London, 1993, pp. 279-288.
10. Baron J. "Reliability Threshold Value : A Complementary Criterion for Designing Durable Concrete"; communication à cette conférence.
11. Wittmann F.H., Steiger T. and Sadouki H. "Experimental and Numerical Study of Effective Properties of Composite Materials"; Micromechanics of Concrete and Cementitious Composites (C. Huét Ed.), Presses Polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, 1993, pp. 59-82.

Table 1 -- Composition chimique du CP d'Éclépens
(toutes les grandeurs sont en pour cent en masse).

Insol.	p. feu	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
0.4	3.0	63.0	1.95	4.7	2.95	19.9	0.4	0.9	2.5

Table 2 -- Composition des mortiers 0.1-4.0 mm. Toutes les grandeurs sont en kg/m³, sauf la teneur en air qui est en dm³/m³.

E/C	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ciment	406	406	406	406	406	406
sable*	1836	1717	1598	1481	1359	1243
eau	162	203	244	284	325	365
air **	16	20	24	28	33	37
masse vol. apparente**	2420	2326	2248	2171	2090	2014

* Le sable comprend 25 % de chacune de 4 composantes

** valeurs estimées

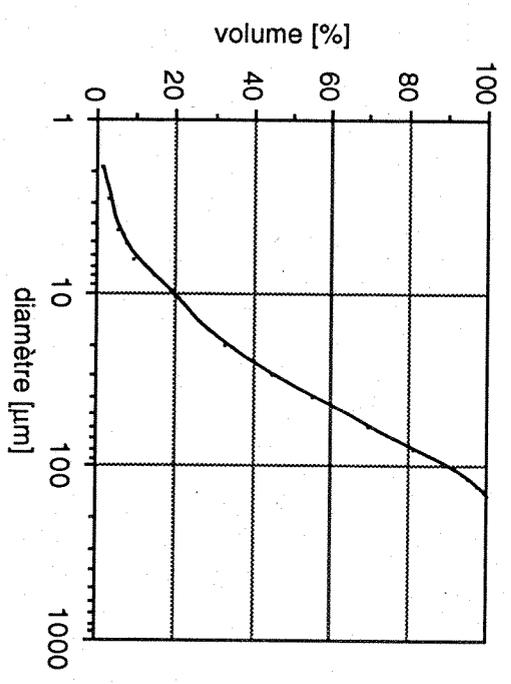


Fig. 1 -- Courbe granulométrique du ciment Portland (CP)

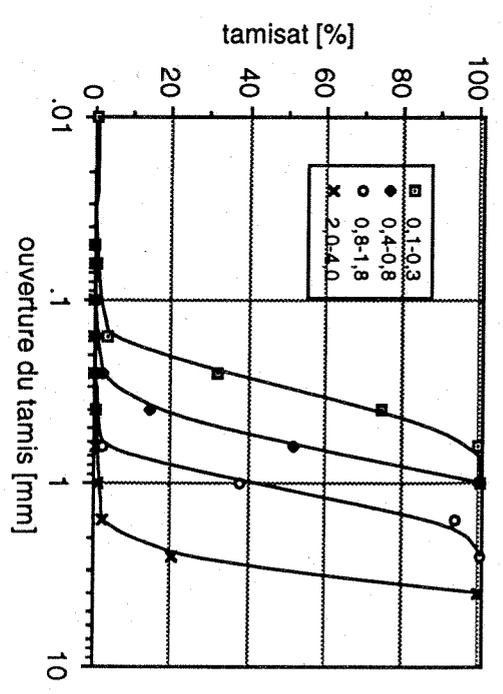


Fig. 2 -- Courbe granulométrique des 4 composantes du sable 0.1-4.0 mm.

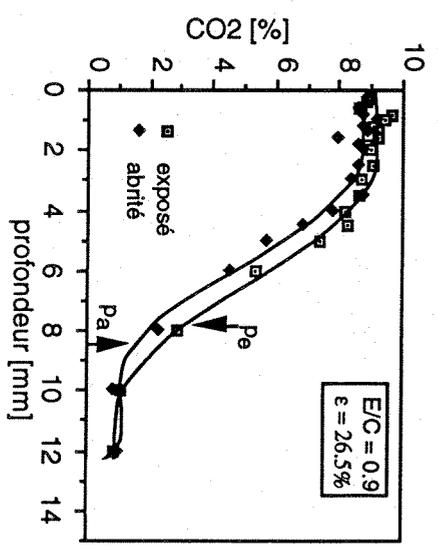


Fig. 3 -- Profil de répartition des carbonates dans une plaque de mortier exposée durant 24.5 mois.
(Pa et Pe: profondeurs de carbonatation mesurées à la phénolphtaléine, ε porosité totale).

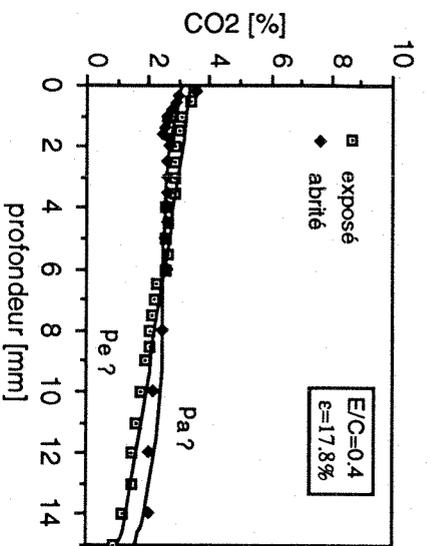


Fig. 4 -- Profil de répartition des carbonates dans une plaque de mortier exposée durant 40.5 mois.
(Pa et Pe: profondeurs de carbonation mesurées à la phénolphaléine, ϵ porosité totale).

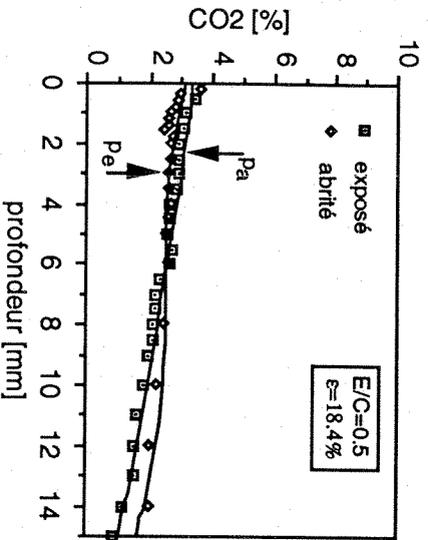


Fig. 5 -- Profil de répartition des carbonates dans une plaque de mortier exposée durant 40.5 mois.
(Pa et Pe: profondeurs de carbonation mesurées à la phénolphaléine, ϵ porosité totale).

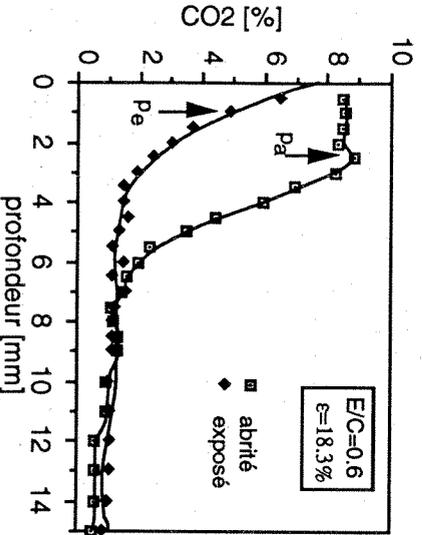


Fig. 6 -- Profil de répartition des carbonates dans une plaque de mortier exposée durant 40.5 mois.
(Pa et Pe: profondeurs de carbonation mesurées à la phénolphaléine, ϵ porosité totale).

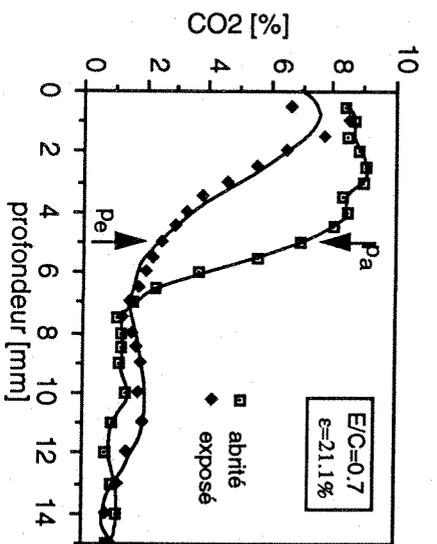


Fig. 7 -- Profil de répartition des carbonates dans une plaque de mortier exposée durant 40.5 mois.
(Pa et Pe: profondeurs de carbonation mesurées à la phénolphaléine, ϵ porosité totale).

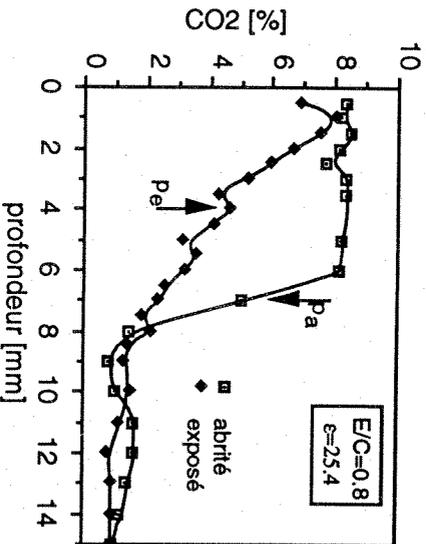


Fig. 8 -- Profil de répartition des carbonates dans une plaque de mortier exposée durant 40.5 mois.
(Pa et Pe: profondeurs de carbonation mesurées à la phénolphaléine, ϵ porosité totale).

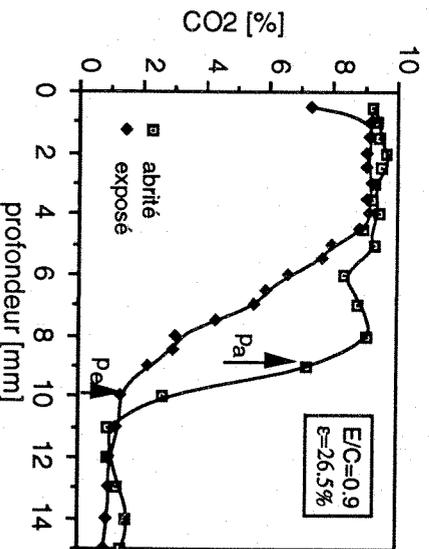


Fig. 9 -- Profil de répartition des carbonates dans une plaque de mortier exposée durant 40.5 mois.
(Pa et Pe: profondeurs de carbonation mesurées à la phénolphaléine, ϵ porosité totale).

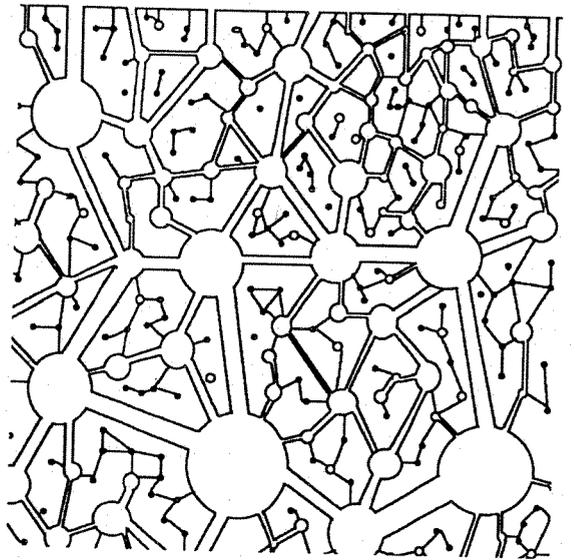


Fig. 10 -- Représentation schématique du système bi-poreux d'une pâte de ciment durcie avant carbonation.

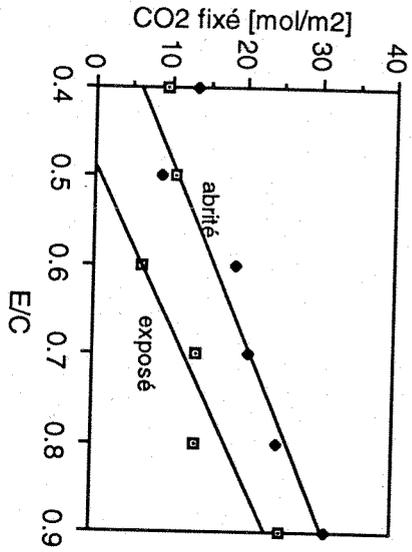


Fig. 11 -- Carbonates formés durant la carbonation naturelle des mortiers après 40,5 mois d'exposition à l'extérieur.

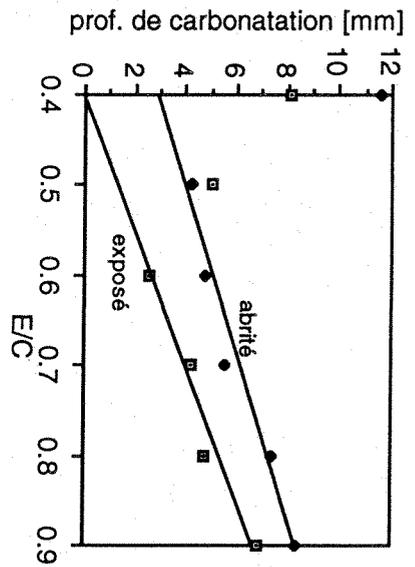


Fig. 12 -- Profondeur de carbonation, mesurée après pulvérisation de phénolphthaléine, sur des mortiers après 40,5 mois d'exposition à l'extérieur.

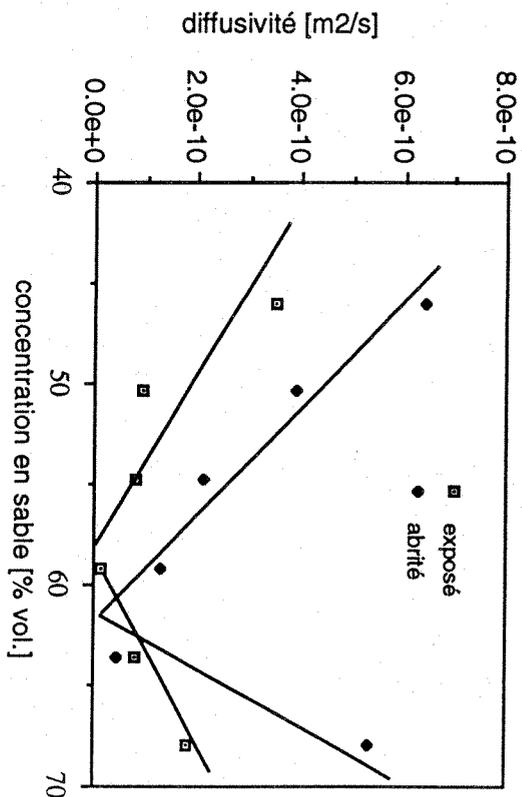


Fig. -- 13. Diffusivité effective du CO2 calculée pour les différents mortiers.

Third CANMET/ACI International Conference
on
Durability of Concrete

SUPPLEMENTARY PAPERS

Nice, France, 1994

DNM X
H&R 30 3/5

Front cover photo:
"Great Arch of Defense" Building
Paris, France
Photo: Courtesy of Jörg Reichert
SKW, Trosberg AG