

CHRONIQUE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Y. Houst

Le retrait de carbonatation

RÉSUMÉ

Les matériaux de construction à base de ciment subissent des variations de volume dont les causes peuvent être diverses. Ces mouvements sont généralement entravés et induisent ainsi des contraintes. La présence de contraintes de traction conduit à l'apparition de fissures qui sont non seulement indésirables du point de vue esthétique, mais qui nuisent également à la durabilité des constructions. Parmi les différentes causes de retrait, on décrit particulièrement le retrait de carbonatation, ses mécanismes et les facteurs qui l'influencent.

ABSTRACT

Building materials based on cement undergo volume changes of which reasons can be various. These movements are usually restrained, and therefore they induce stress. The presence of tensile stress leads to crazing and cracking, which are not only aesthetically undesirable, but also reduce the durability of constructions. Among the various causes of shrinkage, carbonation shrinkage, mechanisms and factors which have an effect upon it, are specially discussed.

RIASSUNTO

I materiali da costruzione a base di cemento subiscono variazioni di volume le cui cause possono essere diverse. Questi movimenti sono generalmente ostacolati e inducono anche delle sollecitazioni. La presenza di sollecitazioni di trazione conducono all'apparizione di fessure che sono non solamente indesirabili dal punto di vista estetico ma che nuociono alla durabilità delle costruzioni. Tra le differenti cause del ritiro, si descrive particolarmente il ritiro di carbonatazione, i suoi meccanismi e i fattori che l'influenzano.

1. INTRODUCTION

La carbonatation du béton est un phénomène naturel que subit tout matériau à base de ciment. On appelle carbonatation la réaction du gaz carbonique (CO_2) qui est normalement présent dans l'air à raison de 0,03 % en volume. Dans les locaux fermés non ventilés, cette teneur peut atteindre 0,1 % et même 0,3 % dans certaines atmosphères urbaines.

La carbonatation des bétons et mortiers est un phénomène qui n'altère pas leurs propriétés, bien au contraire : la résistance mécanique, la dureté augmentent, la perméabilité aux gaz et aux liquides diminue, les hydroxydes solubles sont transformés en carbonates. Cependant, si le béton est armé, la carbonatation du matériau qui enrobe l'acier d'armature supprime l'immunité dont bénéficie ce dernier. Les aciers peuvent alors se corroder et ainsi limiter la capacité portante des éléments en béton armé [1]. Lorsque les armatures sont proches de la surface du béton, la formation de rouille peut provoquer la fissuration ou l'éclatement du béton superficiel. Ces types de dégâts sont actuellement assez bien connus, parce que malheureusement trop répandus. Il est toutefois un autre inconvénient dont les conséquences négatives sont heureusement plus rares et en général moins graves : c'est le retrait de carbonatation. Lorsque le ciment réagit avec le gaz carbonique, il y a neutralisation des composés basiques et diminution de volume. Cette diminution de volume se traduit par un retrait qui est aussi à l'origine de craquelures et de fissures superficielles. La carbonatation artificielle, avec des concentrations élevées en CO_2 et sous haute pression, permet de stabiliser la structure de certains produits à base de ciment. Elle est utilisée industriellement.

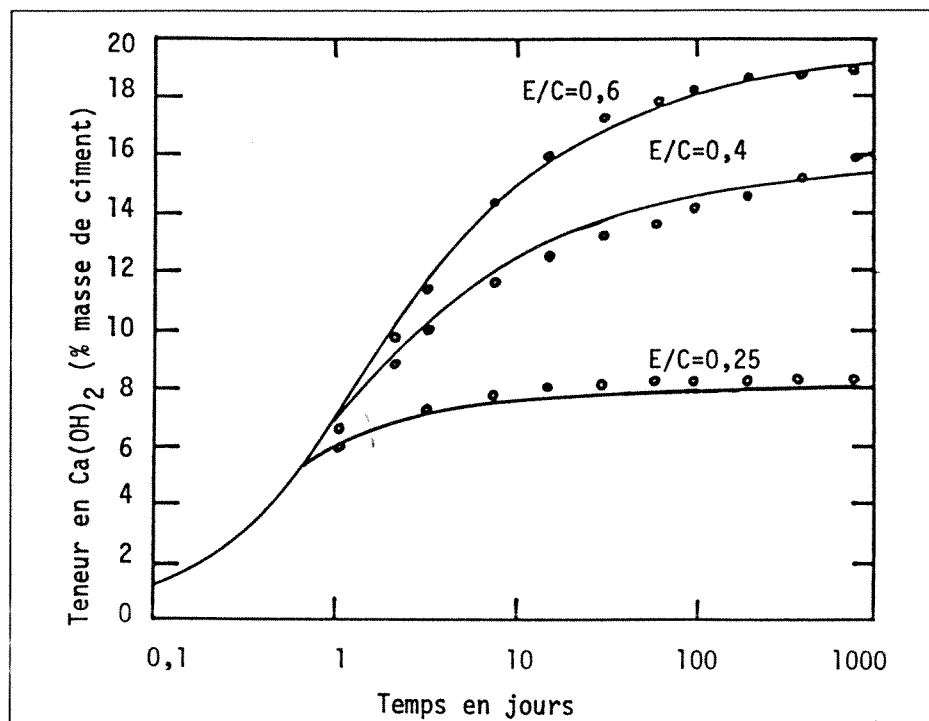
Les méfaits du retrait de carbonatation ne doivent pas être surestimés. En effet, il s'agit normalement d'un phénomène lent ou très lent pour les bétons de qualité. Par contre, les bétons médiocres qui sont déjà sujets à d'autres attaques subissent encore les méfaits de la carbonatation qui joue alors parfois un rôle primordial dans certaines dégradations.

2. LA CARBONATATION ET SES CONSÉQUENCES CHIMICO-PHYSIQUES

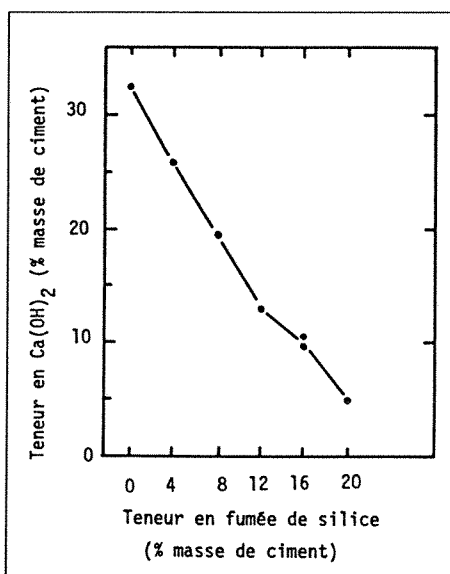
2.1. L'hydratation du ciment portland

La carbonatation du béton a déjà été décrite récemment dans cette revue [1]. Toutefois, pour la compréhension du lecteur, il est utile d'en donner une brève description.

Du point de vue chimique, le ciment portland contient essentiellement quatre composés qui sont deux silicates de calcium (nommés silicates bi- et trical-



1. Teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de pâtes de ciment durcies en fonction du temps pour divers rapports eau/ciment [2].



2. Influence du remplacement d'une partie du ciment par de la fumée de silice sur la teneur en hydroxyde de calcium d'une pâte de ciment durcie [4].

cique) qui se sont formés lors de la cuisson par réaction de la silice et de l'oxyde de calcium. Les silicates représentent environ 75 % du ciment. A côté de ces deux composés majeurs, on trouve encore l'aluminate tricalcique et l'aluminoferrite tétracalcique qui se sont formés par réaction de l'alumine, de l'oxyde de fer et de l'oxyde de calcium. Les deux derniers composés ne présentent pas d'intérêt pour la carbonatation.

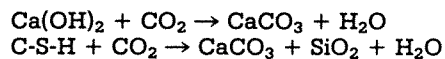
L'hydratation des deux silicates de calcium (réaction chimique avec l'eau) conduit à la formation de silicates hydratés et d'hydroxyde de calcium, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Les silicates hydratés n'ont pas une composition chimique bien définie et de l'oxyde de calcium. La composition de C-S-H dépend de nombreux facteurs tels que la composition chimique du ciment, la quantité d'eau de gâchage, l'âge, etc. Pour

un ciment donné, la quantité de C-S-H et de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formés dépend essentiellement du rapport E/C (eau de gâchage/ciment) et du temps de réaction. La figure 1 montre l'évolution de la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour différents rapports E/C.

La teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans le béton peut être réduite de façon importante par l'emploi de matériaux à propriétés pouzzolaniques, comme les pouzzolanes naturelles ou artificielles, les cendres volantes et la fumée de silice condensée (*condensed silica fume*) comme on peut le voir sur la figure 2. Pour des renseignements plus complets sur les matériaux pouzzolaniques, on peut consulter un article de Furlan et Houst [3] ainsi que l'ouvrage récent édité par Swamy [4].

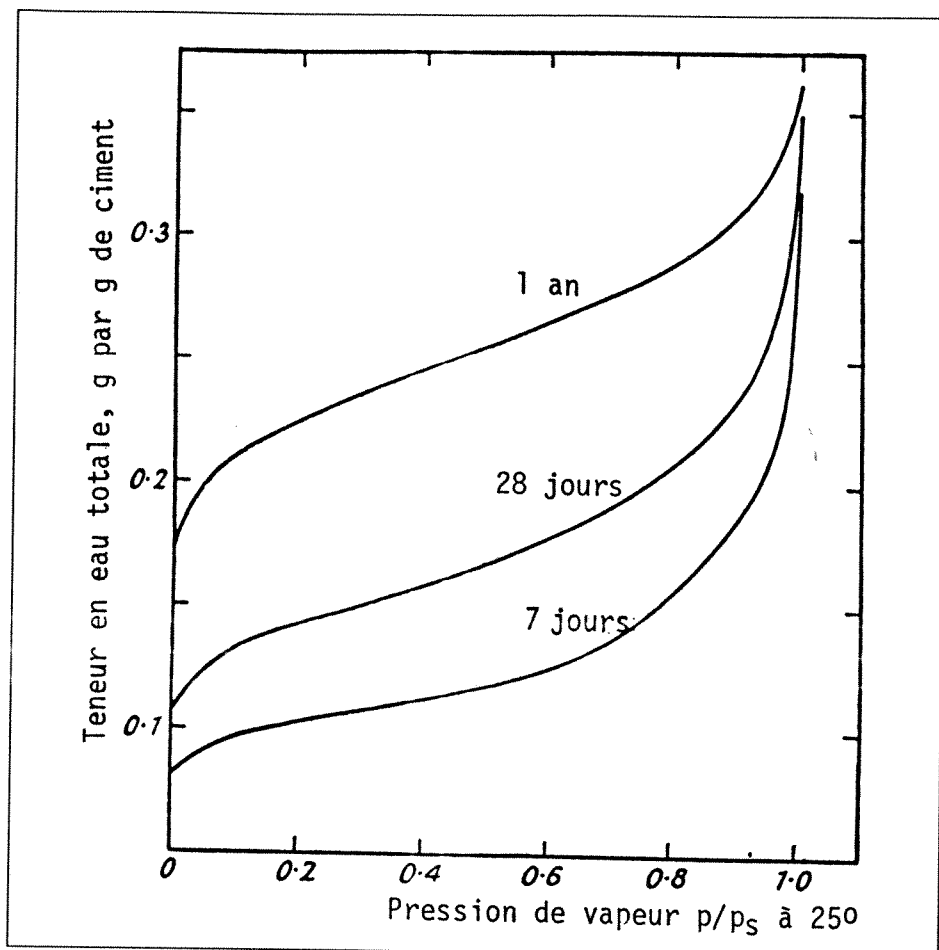
2.2. Chimie de la carbonatation

On appelle carbonatation la réaction de neutralisation des bases par l'acide carbonique ou le gaz carbonique normalement présents dans l'air. Les bases présentes dans le ciment hydraté sont essentiellement l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et les silicates de calcium, représentés par la formule C-S-H. Les réactions chimiques de carbonatation peuvent être représentées par les équations suivantes :

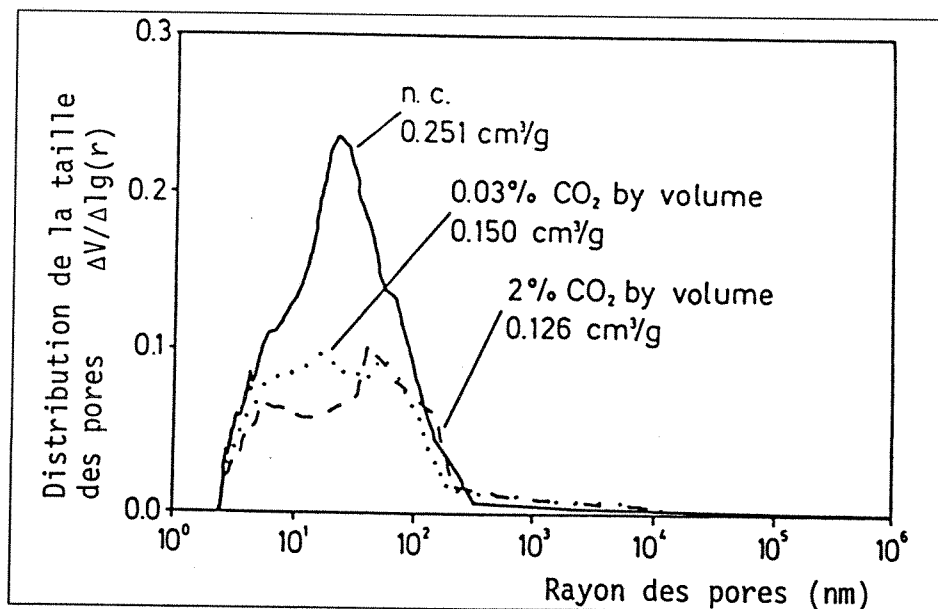


Les réactions ci-dessus, qui décrivent des réactions de produits solides avec un gaz, sont très lentes. En réalité, c'est essentiellement le gaz carbonique dissous dans l'eau qui réagit avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en solution et le C-S-H solide, ce dernier étant pratiquement insoluble dans l'eau, tandis que la solubilité de l'hydroxyde de calcium est de 2,5 g/litre à 25° C.

Les aluminates réagissent également pour donner un gel d'alumine [5,



3. Relation entre la teneur en eau et l'humidité relative de pâtes de ciment durcies (isothermes d'adsorption) [5, p. 272].



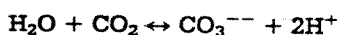
4. Influence de la carbonatation sur la distribution de la taille des pores d'une pâte de ciment Portland durcie [7].

p. 546]. Une pâte de ciment en équilibre avec l'air ambiant qui a une humidité relative supérieure à 0% contient de l'eau libre (qui s'évapore si l'on diminue l'humidité relative de l'air ambiant). Cette eau est adsorbée à des humidités relatives basses et condensée dans les capillaires pour des humidités plus élevées. La teneur en eau d'une pâte de ciment en équilibre avec différentes humidités relatives (isotherme d'adsorption) est montrée à la figure 3.

Si les pores et les capillaires ne sont pas bouchés par l'eau, le gaz carbonique peut diffuser dans tout le système poreux. Le gaz carbonique se dissout

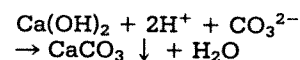
alors dans l'eau adsorbée et condensée. Sa solubilité est proportionnelle à la concentration dans l'atmosphère. A 15° C par exemple, la concentration à l'équilibre du CO₂ dans l'air et dans l'eau est égale.

Il n'y a qu'une très faible proportion de gaz carbonique qui réagit avec l'eau et subit une dissociation électrolytique en ions hydrogène et carbonate :



La proportion de CO₃²⁻ et de CO₂ est d'environ 1 pour 999. L'équation ci-dessus représente un équilibre. Si la

concentration en CO₃²⁻ diminue, l'équilibre sera rétabli par dissolution de CO₂ et dissociation électrolytique. La réaction de carbonatation principale qui se produit dans le béton peut alors être représentée par l'équation suivante :



où Ca(OH)₂ est en solution. CaCO₃, le carbonate de calcium qui est le résultat de la réaction, existe sous trois formes polymorphes, la calcite, la vaterite et l'aragonite. Bien que la calcite soit la forme la plus stable, les produits initiaux de la réaction de carbonatation naturelle peuvent être l'aragonite ou la vaterite; ces derniers se transforment alors en calcite au cours du temps [5, p. 544]. Goodbrake et al. [6] ont trouvé que la principale espèce formée par une carbonatation artificielle était l'aragonite, lorsque les produits d'hydratation peuvent sécher. Toutefois, les conditions de réaction de leur étude étaient bien éloignées de la carbonatation naturelle.

2.3. Conséquences physiques

La réaction de carbonatation de Ca(OH)₂ entraîne une augmentation du volume. Si l'on ne tient compte que des produits solides, l'augmentation de volume de Ca(OH)₂ est, selon les produits de réaction formés, la suivante :

| | | |
|------------------------|----------------------|-------|
| | → calcite | + 12% |
| | (CaCO ₃) | |
| Portlandite | → aragonite | + 3% |
| (Ca(OH) ₂) | (CaCO ₃) | |
| | → vaterite | + 19% |
| | (CaCO ₃) | |

La distribution de la taille des pores d'une pâte de ciment durcie est modifiée par la carbonatation, comme on peut le voir sur la figure 4. La pâte de ciment durcie montre une notable réduction du volume des pores après carbonatation, le phénomène étant plus marqué pour une carbonatation accélérée.

La réduction de la porosité entraîne une augmentation des résistances mécaniques. La calcite qui s'est formée consolide la structure de la pâte de ciment durcie. Il est bien connu que le carbonate de calcium qui se forme par carbonatation de Ca(OH)₂ est un excellent liant. C'est lui qui assure l'essentiel de la résistance mécanique des mortiers à la chaux. La résistance à la compression et à la flexion de bétons au ciment portland conservés dans une atmosphère de CO₂ peut augmenter jusqu'à 30% par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de gaz carbonique [5, p. 547]. L'augmentation de résistance est d'autant plus marquée que le rapport eau/ciment du béton est bas [8]. La carbonatation accélérée qui permet l'augmentation des résistances mécaniques entraîne également une diminution du fluage [9]. La dureté, l'imperméabilité et la stabilité de volume sont favorablement influencées par la carbonatation [10].

3. LES RETRAITS

3.1. Les divers retraits

Les matériaux poreux à base de ciment subissent diverses déformations volumiques que l'on nomme retrait (ou gonflement). Les causes de ces déformations sont multiples et peuvent être classées en quatre catégories [11]:

- retrait thermique lié à une variation de température (causée dans le béton par l'hydratation du ciment qui est une réaction exothermique);

Ces divers types de retrait peuvent se produire simultanément, c'est ce qui se passe en général dans la pratique, ou consécutivement. Si l'on élimine le retrait thermique et le retrait de carbonatation qui sera traité plus en détail par la suite, on peut séparer les retraits en *retrait de dessiccation* (sans vieillissement, c'est-à-dire que l'hydratation est bloquée) et en *retrait endogène* d'un béton qui vieillit sans échange d'eau à l'extérieur [12]. Lorsqu'un béton vieillit et sèche en même temps, son retrait n'est pas la somme du retrait de dessiccation et du retrait endogène. Dans la pratique, il faut donc tenir compte de l'interaction de ces phénomènes.

3.2. Le retrait de carbonatation

3.2.1. Mécanismes du retrait de carbonatation

Comme on l'a déjà vu, la carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entraîne une augmentation de volume des solides de 12% à 19% selon que le produit de la réaction est de la calcite ou de la vaterite. Il paraît donc à première vue curieux que cette réaction entraîne un retrait et non un gonflement. Pourtant toutes les expériences mettent en évidence un retrait. Afin d'expliquer cette apparente contradiction, diverses explications ont été avancées. On a d'abord attribué le retrait de carbonatation à la perte d'eau provoquée par la réaction. On a observé que la quantité d'eau libérée par cette réaction était accompagnée d'un retrait qui est du même ordre de grandeur que celui que provoque le départ d'une même quantité d'eau, sans carbonatation. Cette explication est toutefois peu satisfaisante, car elle n'explique pas comment le départ de l'eau provoque du retrait. De plus, on trouve de façon générale qu'un corps poreux solide subit ou ne subit pas de retrait lorsqu'il perd de l'eau. Si la perte d'eau est accompagnée d'un retrait, alors invariablement le corps a une humidité interne plus faible qu'avant cette perte, et réciproquement. Le retrait de carbonatation n'est par contre pas accompagné d'une diminution d'humidité interne, ce qui suggère que le retrait de carbonatation est lié à d'autres mécanismes.

Cette constatation a conduit Powers [13] à émettre une hypothèse sur le retrait de carbonatation. Selon cet auteur, le retrait de carbonatation est dû à la dissolution des cristaux d'hydroxyde de calcium alors que ceux-ci sont soumis à une contrainte de compression. Le retrait de carbonatation à humidité constante est proportionnel à l'augmentation temporaire de compressibilité de la pâte de ciment durcie résultant du transfert de l'hydroxyde de calcium des régions sous contrainte et du dépôt de carbonate de calcium dans des régions où celui-ci n'est pas sous contrainte. D'autre part, la carbonatation des particules de C-S-H, le silicate de calcium hydraté, a lieu par une réaction topochimique, c'est-à-dire sans transport de matière ou dissolution. La carbonatation du C-S-H ne provoque ainsi pas de déformation de l'échantillon.

La diminution de l'eau chimiquement liée, c'est-à-dire de l'eau faisant partie des particules de C-S-H, a également été avancée comme cause du retrait de carbonatation [14]. Dans ce cas, il faut attribuer le retrait de carbonatation, non plus essentiellement à l'hydroxyde de calcium, mais bien au C-S-H. Cette explication est basée sur l'observation qu'il y a moins d'une molécule d'eau libérée lors de la réaction d'une molécule de CO_2 avec la pâte de ciment durcie, alors que lors de la carbonatation de l'hydroxyde de calcium, une molécule de CO_2 libère une molécule d'eau. Selon Swenson et Sereda [15], le retrait de carbonatation serait lié à la déshydratation et la polymérisation du gel de silice formé lors de la carbonatation.

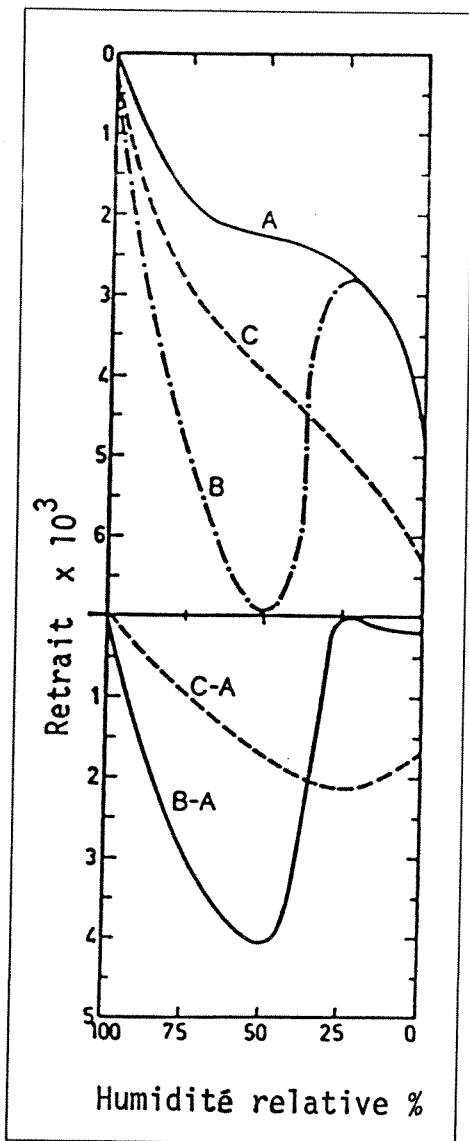
3.2.2. Mesures de retrait de carbonatation et discussion

Comme on l'a vu précédemment, il est nécessaire de prendre de nombreuses précautions lorsque l'on désire réaliser des mesures de retrait. De plus, il est nécessaire d'avoir des échantillons de petite dimension afin que les équilibres désirés soient obtenus dans un temps raisonnable et que les réactions chimiques se déroulent également dans un temps raisonnable.

La figure 5 montre le retrait de mortier au ciment séché jusqu'à l'équilibre avec différentes humidités, puis carbonaté en atmosphère de CO_2 pur. La courbe A représente le retrait de dessiccation du mortier âgé de 28 jours dans une atmosphère exempte de CO_2 . La courbe B représente le retrait de dessiccation et d'une carbonatation subséquente. La courbe C montre le retrait simultané de dessiccation et de carbonatation. Des résultats similaires ont été obtenus par Verbeck [16]. Les courbes B-A et C-A de la partie inférieure de la figure 5 montrent respectivement le retrait de carbonatation seul dû à une carbonatation subséquente et simultanée à la dessiccation.

On remarque que le retrait de carbonatation maximum se produit à environ 50% d'humidité relative. Bien qu'il se produise une certaine carbonatation, on n'observe pas de retrait de carbonatation à environ 100% h.r. ou en dessous de 25% h.r. [16]. Dans le cas où les échantillons sèchent et se carbonatent simultanément, la carbonatation se produit à une humidité qui est bien supérieure à l'humidité d'équilibre, car l'humidité à l'intérieur des échantillons est nettement plus élevée.

La figure 6 montre le retrait de carbonatation de pâtes de ciment durcies, préalablement conditionnées à différentes humidités relatives, en fonction du temps [15]. On remarque qu'après peu de temps, le retrait tend à être maximum vers 50% d'humidité relative. A un jour, le retrait est maximum vers 70% h.r. On peut attribuer cela au fait qu'il faut vraisemblablement une humidité à l'intérieur du matériau de l'ordre de 70-80% pour que la vitesse de carbonatation soit maximum. Au début, l'humidité à l'intérieur du matériau est égale à celle de l'environnement, puis elle croît rapidement puisque la réac-



5. Influence de la carbonatation sur le retrait de mortiers au ciment. D'après [10].

Courbe A : retrait de dessiccation sans carbonatation.

Courbe B : séchage, puis carbonatation.

Courbe C : séchage et carbonatation simultanés.

- retrait chimique (ou gonflement) lié aux réactions chimiques entre le ciment et l'eau ou à la carbonatation par exemple;
- retrait capillaire lié à la formation de ménisques d'eau entre les particules par évaporation superficielle de l'eau de gâchage;
- retrait de dessiccation lié à une variation de l'humidité relative et donc de la quantité d'eau dans les pores du matériau.

tion de carbonatation libère localement de l'eau. Lorsque la carbonatation se produit à une certaine distance de la surface, l'eau a besoin de plus de temps pour diffuser vers l'extérieur ou il faut une humidité relative plus basse de l'environnement.

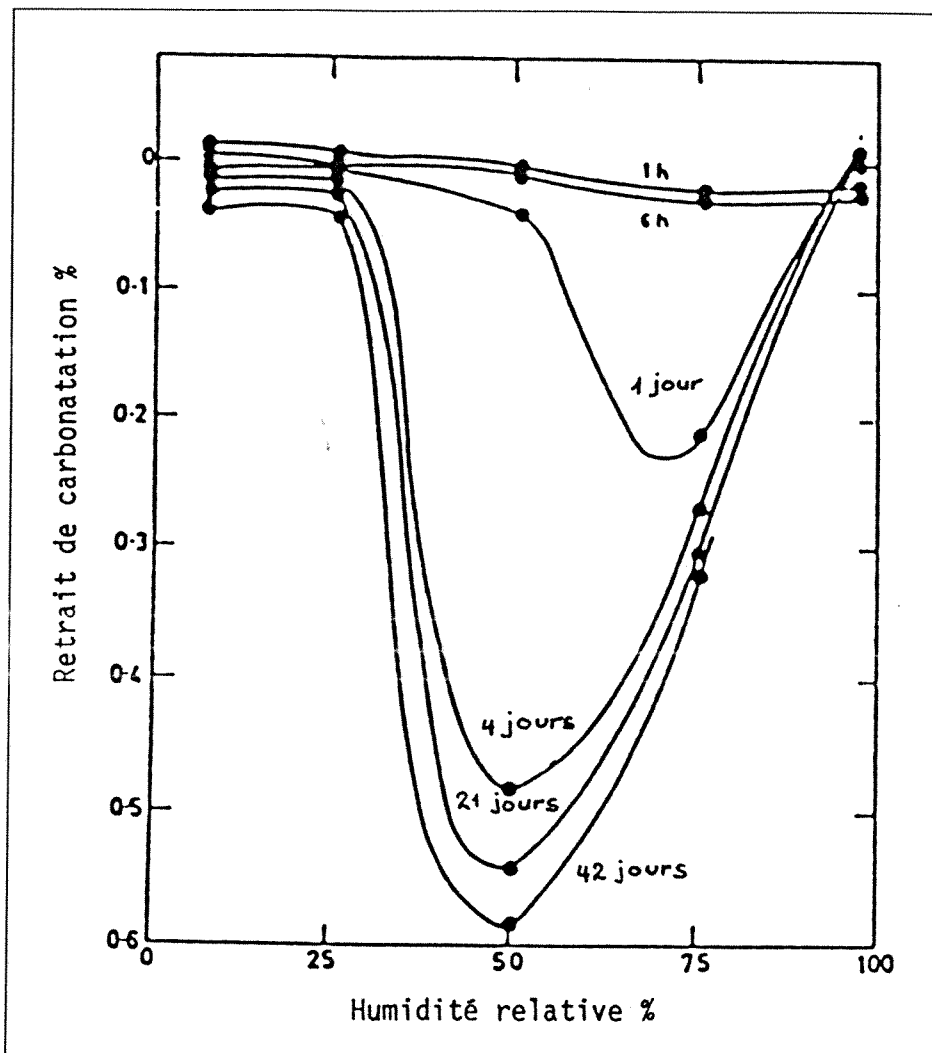
La figure 7 montre le retrait de carbonatation de trois types de bétons cellulaires préalablement équilibrés à différentes humidités relatives. Ces résultats sont intéressants, car le béton cellulaire ne contient pas d'hydroxyde de calcium. Le retrait mesuré est donc dû uniquement à la carbonatation des silicates de calcium. L'hypothèse de Powers [13] ne permet donc pas d'expliquer le retrait de carbonatation. On remarque que la masse volumique apparente, ainsi que le dosage en liant de ces bétons cellulaires n'ont que peu d'influence sur la valeur du retrait. Le retrait maximum n'est que peu inférieur à celui mesuré sur un mortier ou sur une pâte de ciment (voir figures 5 et 6). Par contre, on voit que le retrait de carbonatation maximum a lieu à une humidité relative de l'ordre de 80-90%. Cette dernière constatation n'est pas étonnante si l'on regarde la distribution de la taille des pores [17] ou l'isotherme d'absorption [18] de ces matériaux. La structure du béton cellulaire est nettement plus grossière que celle d'une pâte de ciment durcie et le matériau n'a pas une teneur en eau notable au-dessous de 60% d'humidité relative. Nous avons vu précédemment qu'une certaine quantité d'eau était nécessaire afin que la carbonatation puisse se produire. Le béton cellulaire se distingue des pâtes de ciment durcies et des mortiers par le fait que les retraits de carbonatation maximum sont du même ordre de grandeur, mais le retrait de dessiccation du béton cellulaire est nettement inférieur [18]. Cela est dû à la stabilisation de la structure du béton cellulaire par l'autoclavage et la carbonatation préalable de l'hydroxyde de calcium.

Ces caractéristiques particulières du béton cellulaire font que des retraits de carbonatation importants peuvent être observés dans des caves où l'humidité et la concentration en CO_2 sont élevées. Par contre, les risques de retrait sont bien moindres avec du béton cellulaire pour des humidités relatives de l'ordre de 50-55% que l'on trouve dans les habitations. Cela n'est pas vrai pour les bétons ou mortiers au ciment portland, puisque c'est à ces humidités que le retrait de carbonatation est maximum.

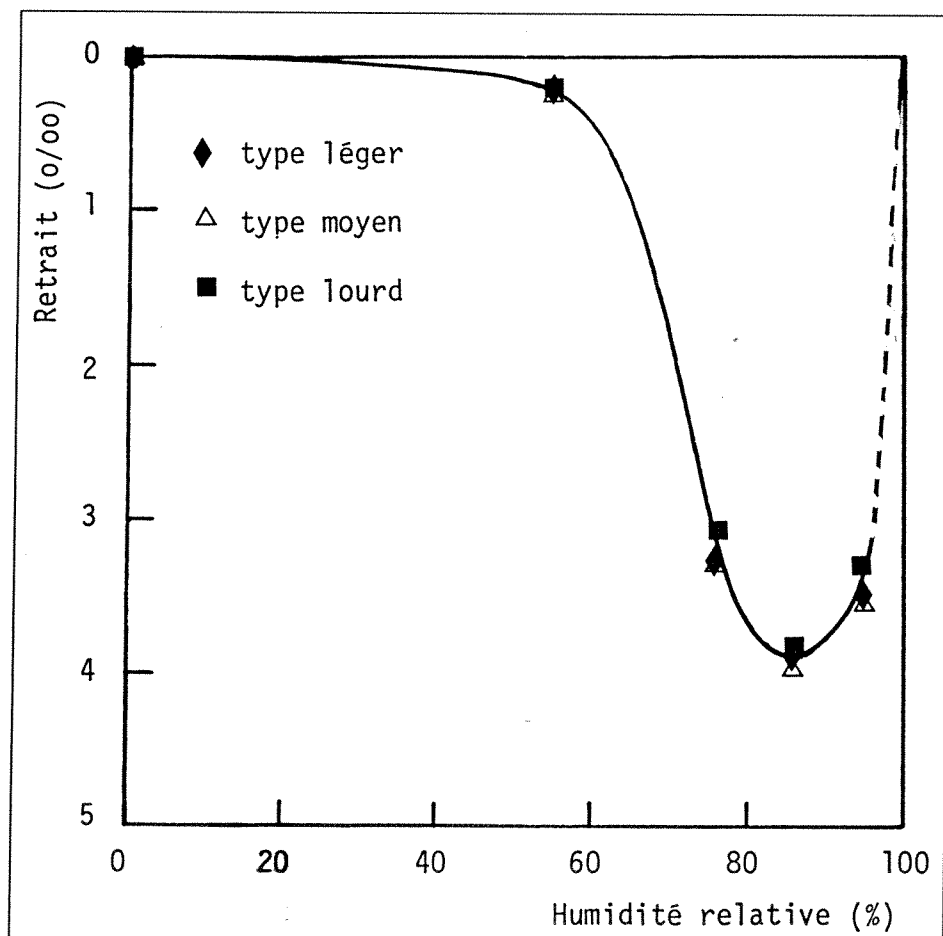
4. LA FISSURATION ET SES CONSÉQUENCES

La carbonatation, qui progresse de l'extérieur vers l'intérieur, provoque un retrait non uniforme. L'extérieur du béton a tendance à se retirer, tandis que l'intérieur est stable. Le retrait est compensé par des déformations dues à des contraintes internes, de traction proche de la surface et de compression dans le cœur.

Le diagramme schématique du développement des fissures lorsque les



6. Retrait de carbonatation de pâtes de ciment durcies et préalablement conditionnées à différentes humidités relatives [15].



7. Retrait de carbonatation de trois types de béton cellulaire autoclavé préalablement conditionné à différentes humidités relatives.

Contraintes sont réduites par le fluage est donné à la figure 8. La fissuration peut être évitée seulement si la contrainte élastique induite, réduite par le fluage, est à tout moment plus petite que la résistance à la traction.

La fissuration qui se produit à la surface des éléments en béton se présente soit sous forme de craquelures (ou faïençage) ou de fissures proprement dites. Les craquelures sont un phénomène bien connu. Elles consistent en un fin réseau de fissures dont l'ouverture est de la taille d'un cheveu. Elles sont particulièrement visibles sur les surfaces qui sont plus ou moins humides ou lorsque les poussières se sont accumulées dans ces petites fissures. Elles ont un effet inesthétique seulement. D'après Lea [5, p. 542], on a longtemps attribué ces craquelures uniquement à des défauts de composition ou de mise en place des bétons et mortiers qui rendent la couche superficielle, ou peau du béton, de moindre qualité que la masse. Il est indubitable que ces causes entraînent l'apparition de craquelures, mais il est tout à fait vraisemblable que la carbonatation joue dans ces cas également un rôle important.

Les craquelures sont toujours superficielles et se distinguent en cela des autres fissures, comme les fissures de retrait qui généralement pénètrent dans la masse. Les craquelures provoquées par la carbonatation n'apparaissent généralement qu'après un temps relativement long, après que la couche superficielle ait séché. Lorsque l'on observe des sections de béton, on remarque que la profondeur des craquelures coïncide avec la profondeur de carbonatation, ce qui tend à confirmer que la carbonatation peut être responsable de l'apparition de craquelures.

Les fissures apparaissent surtout dans les bétons poreux où la profondeur de carbonatation est importante. Lorsque les armatures sont proches de la surface, elles créent des zones localement affaiblies et il n'est pas rare de voir que de telles fissures suivent les armatures. Lorsque les fissures d'une ouverture d'au moins 0,2 mm environ atteignent les armatures, le béton à proximité de l'acier se carbonate rapidement, ce qui réduit l'alcalinité du milieu et crée des conditions dans lesquelles les aciers sont susceptibles de se corroder.

5. CONCLUSION

Le retrait de carbonatation passe souvent inaperçu, parce que très souvent il se produit en même temps ou se superpose partiellement au retrait de dessiccation. On attribue ainsi couramment l'apparition de craquelures ou de fissures uniquement au retrait de dessiccation, alors que le retrait de carbonatation est fréquemment responsable. Les défauts ou les dégâts dus au retrait de carbonatation ne doivent toutefois pas être surestimés. Ils se manifestent d'autant plus que les bétons et mortiers sont de médiocre qualité.

Le retrait de carbonatation, qui peut atteindre les mêmes valeurs que le retrait de dessiccation, ne doit pas être négligé, car c'est un des facteurs qui, à part des effets inesthétiques, contribue à limiter la durabilité des constructions. Le phénomène peut être beaucoup plus marqué et les conséquences plus graves lorsque les bétons et mortiers sont situés dans une atmosphère où les teneurs en gaz carbonique sont de plusieurs ordres de grandeur plus élevées que dans l'atmosphère normale.

BIBLIOGRAPHIE

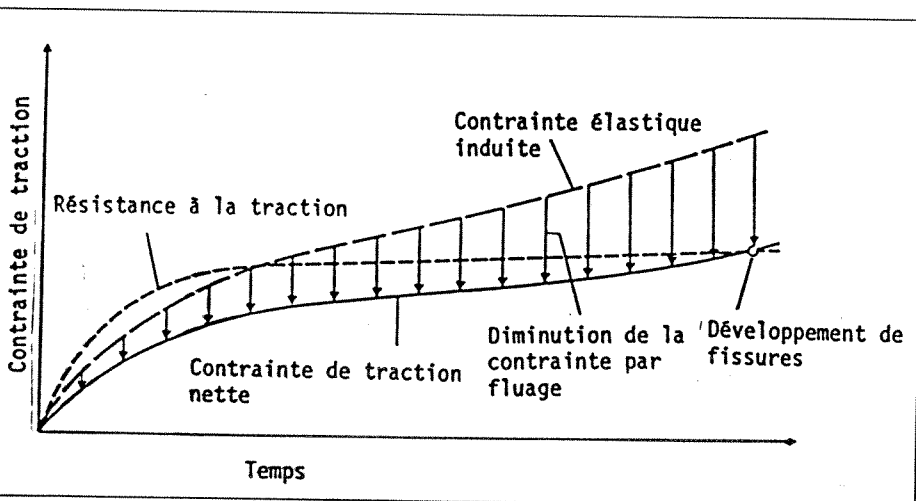
- [1] Y. HOUST, *Carbonatation du béton et corrosion des armatures*, Chantiers/Suisse, 15 (1984), pp. 569-574.
- [2] P.E. ROELFSTRA, résultats non publiés.
- [3] V. FURLAN et Y. HOUST, *Les matériaux pouzzolaniques et leur utilisation*, Chantiers/Suisse, 11 (1980), pp. 29-32.
- [4] R.N. SWAMY, *Cement Replacement Materials*, Surrey University Press, Glasgow and London (1986).
- [5] F.M. LEA, *The Chemistry of Cement and Concrete* (2^e éd.), Edward Arnold, London (1970).
- [6] C.J. GOODBRAKE, J.F. YOUNG et R.L. BERGER, *Reaction of hydraulic calcium silicates with carbon*

dioxide and water, J. Amer. Ceram. Soc., 62 (1979), pp. 488-491.

- [7] Th.A. BIER, J. KROPP et H.K. HILSDORF, *Carbonation and realcalinisation of concrete and hydrated cement paste*, in *Durability of Construction Materials* (J.C. Maso Ed.), Chapman and Hall, London-New York (1987) vol. 3, pp. 927-934.
- [8] R. FREY et H.-J. GOERKE, *Derzeitiger Stand der Kenntnis des Einflusses der Carbonatisierung auf die Festigkeitseigenschaften von Betonen*, TIZ-Fachberichte, 106 (1982), pp. 184-187.
- [9] J. ALEXANDRE, *Influence de la carbonatation sur le fluage en compression du béton*, Rev. mat. constr., N° 684 (1973), pp. 22-30.
- [10] K. KAMIMURA, P.J. SEREDA et E.G. SWENSON, *Changes in Weight and Dimensions in the Drying and Carbonation of Portland Cement Mortars*, Mag. Concr. Res. 17 (1965), pp. 5-14.
- [11] C.F. FERRARIS et F.H. WITTMANN, *Retrait de la pâte de ciment durcie*, Chantiers/Suisse, 18 (1987), pp. 289-292.
- [12] J. BARON et R. SAUTEREY, *Le béton hydraulique*, Presses de l'ENPC, Paris (1982), chap. 27.
- [13] T.C. POWERS, *A Hypothesis on Carbonation Shrinkage*, J. PCA R. & D. Lab., mai 1962, pp. 40-50.
- [14] C.M. HUNT et L.A. TOMES, *Reaction of blended Portland Cement Paste with Carbon-Dioxide*, J. Res. Nat. Bur. Stand., 66A (1962), pp. 473-481.
- [15] E.G. SWENSON et P.J. SEREDA, *Mechanism of the Carbonation Shrinkage of Lime and Hydrated Cement*, J. Appl. Chem., 18 (1968), pp. 111-117.
- [16] G. VERBECK, *Carbonation of Hydrated Portland Cement*, ASTM Spec. Techn. Publ., N° 205 (1958), pp. 17-36.
- [17] P. PRIM et F.H. WITTMANN, *Structure and Water Absorption of Aerated Concrete*, in (F.H. Wittmann Ed.) *Autoclaved Aerated Concrete, Moisture and Properties*, Elsevier, Amsterdam (1983), pp. 55-69.
- [18] Y. HOUST, F. ALOU et F.H. WITTMANN, *Influence of Moisture Content on Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete* in (F.H. Wittmann Ed.) *Autoclaved Aerated Concrete, Moisture and Properties*, Elsevier, Amsterdam (1983), pp. 219-234.
- [19] A.M. NEVILLE et J.J. BROOKS, *Concrete Technology*, Longman Group, Harlow (1987), p. 255.

Adresse de l'auteur :

Y. Houst
EPFL - Laboratoire des Matériaux
de Construction
Ch. de Bellerive 32
1007 Lausanne



8. Représentation schématique du développement de fissures lors d'une contrainte de traction due au retrait qui est diminuée par le fluage [19].