

Solutions béton

Le cycle du calcium, la carbonatation et les ouvrages en béton P. 2

Les mécanismes de la carbonatation P. 3

Les bienfaits de la carbonatation pour le béton P. 5

Le piégeage du CO₂ dans les bétons de démolition P. 6



Carbonatation des bétons et Piégeage du CO₂

La **carbonatation du béton** est un phénomène indissociable de ce matériau de construction. Pendant la durée de vie de l'ouvrage, le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère pénètre dans le béton à partir de la surface du matériau. Le dioxyde de carbone peut alors réagir avec les produits résultant de l'hydratation du ciment. La carbonatation modifie progressivement la composition chimique et la micro-structure interne du béton. Durant la vie de l'ouvrage, le béton piège ainsi du dioxyde de carbone à hauteur de 10 à 15 % du CO₂ émis lors de la décarbonatation du calcaire nécessaire à la fabrication du ciment. Les ingénieurs ont, au cours du xx^e siècle, appris à maîtriser certaines conséquences problématiques du phénomène de carbonatation. À la fin de vie de l'ouvrage, la carbonatation peut, cette fois, être exploitée pour fixer du CO₂ dans la pâte de ciment durcie d'un béton de démolition. Des résultats récents montrent qu'il est alors possible de recapter jusqu'à 50 à 60 % de CO₂ supplémentaire. Par ailleurs, cette carbonatation est particulièrement favorable à une amélioration de la qualité du granulats recyclé issu du béton de démolition, facilitant ainsi sa réutilisation.

Texte : Nicolas Roussel

Le cycle du calcium, la carbonatation et les ouvrages en béton



→ Test à la phénolphtaléine montrant les zones non carbonatées dans un granulat recyclé de béton de démolition après 6 mois d'exposition au CO₂ atmosphérique.

L'homme n'est ni le premier ni le seul bâtisseur de notre planète à utiliser le calcium comme élément incontournable de ses constructions. Les mollusques ou les algues planctoniques sécrètent ainsi eux aussi majoritairement leurs coquilles à base de carbonate de calcium ou calcaire. Ces deux pratiques constructives ont pour point commun de s'inscrire dans le cycle du calcium à la surface de notre planète. Ce cycle est d'une importance primordiale dans les questions d'environnement actuelles puisque, tout d'abord, le calcaire est le composant dominant de notre croûte terrestre et que le cycle du calcium et le cycle du CO₂ sont, comme nous allons le voir, étroitement liés.

LE CALCAIRE, UNE RESSOURCE NATURELLE POUR FABRIQUER LE CIMENT

Là où les mollusques prélèvent du calcium en solution dans leur environnement et le carbonate à l'aide du CO₂ atmosphérique pour ensuite mourir et déposer leurs coquilles qui constitueront alors une source de calcium pouvant être lentement dissoute, l'homme, plus pressé, extrait du calcaire de notre croûte terrestre pour fabriquer des matériaux cimentaires.

La fabrication du clinker *Portland*, composant principal des ciments modernes depuis la fin du XIX^e siècle, nécessite ainsi la décarbonatation

du calcaire, forme la plus stable du calcium dans la nature, et sa cuisson en présence de silice. La réaction d'hydratation du clinker en présence d'eau conduit à la formation de composés minéraux (les hydrates) à l'origine des résistances des bétons ou des mortiers. Ces composés chimiques sont dits métastables. Ceci signifie qu'ils ne sont pas chimiquement stables mais que leur vitesse de transformation est tellement lente qu'ils présentent sur des échelles de temps d'observation suffisamment courtes une apparence de stabilité. La seule présence du CO₂ atmosphérique conduit pourtant à la carbonatation irréversible de ces hydrates sous forme de calcaire et de gel de silice, bouclant ainsi le cycle minéral du calcium sur une échelle de temps plus ou moins longue.

LA CARBONATATION, UN PHÉNOMÈNE NATUREL

La carbonatation des bétons est ainsi un phénomène incontournable participant au cycle du calcium à la surface de notre planète. La véritable question, dans ce cadre, n'est alors pas de savoir si un matériau cimentaire va ou non se carbonater, mais sur quelle échelle de temps il va le faire et quelles en seront les conséquences. Il est alors possible de distinguer deux échelles de temps fondamentales.

La première échelle de temps concerne la durée de vie du matériau cimentaire dans l'ouvrage construit ou le bâtiment en service. Cette échelle de temps est de l'ordre d'une centaine d'années. Pendant cette durée, le matériau se carbonate sous l'effet, en général, du CO₂ atmosphérique. Les conséquences de cette carbonatation, comme nous allons le voir plus loin, sont variées et

leurs prédictions sont complexes. Dans cette phase, les ingénieurs sont particulièrement attentifs aux modifications chimiques liées à la carbonatation de la composition de l'eau située dans la porosité du matériau. Si ces modifications dépassent certaines limites, une corrosion des armatures dans le cas d'un béton armé ou un développement de micro-organismes dans le cas d'un enduit de façade peuvent être favorisés.

L'OPTIMISATION DU PIÉGEAGE DU CO₂

La deuxième échelle de temps concerne le devenir du matériau lors de son recyclage ou de son stockage. Cette phase démarre à la fin de vie de l'ouvrage ou du bâtiment. En France, cette phase démarre en moyenne une centaine d'années après la phase de construction mais cette durée peut être extrêmement variable. La carbonatation peut, cette fois, être exploitée pour fixer dans la matrice cimentaire du CO₂ à la fin de la vie du produit. En terme de cinétique de carbonatation, la particularité du procédé de concassage du béton de démolition permet de multiplier par un facteur proche de 1 000 la surface offerte au CO₂ atmosphérique lors de la transformation d'un élément en béton armé de type voile ou dalle au sein d'une structure dont l'épaisseur typique est de l'ordre de 20 cm en granulats de taille centimétrique.

Des résultats récents montrent qu'il est alors possible, dans le cas de bétons traditionnels d'ouvrages des années 50-80, de recapter jusqu'à 50 à 60 % du CO₂ émis lors de la décarbonatation du calcaire. Cette carbonatation est particulièrement favorable à une amélioration de la qualité du granulat recyclé tiré du béton de démolition. ■

Les mécanismes de la carbonatation

L'atmosphère de notre planète contient en moyenne 0,03 à 0,04 % de CO_2 . Cette concentration en dioxyde de carbone varie localement avec la température, la pression atmosphérique et la proximité éventuelle d'une agglomération. Dans les zones fortement industrialisées, dans les parkings et aux abords des grands axes routiers, la quantité de CO_2 atmosphérique peut être multipliée par un facteur trois ou quatre pour atteindre 0,1 %.

LE CO_2 À L'ORIGINE DE LA CARBONATATION

Le CO_2 présent dans l'atmosphère peut être à l'origine d'une carbonatation des matrices cimentaires. Il se diffuse alors sous forme gazeuse dans la porosité du béton ou du mortier et se dissout en formant des acides au contact de la solution interstitielle contenue dans la pâte de ciment (avec une prédominance de H_2CO_3 , HCO_3^- ou CO_3^{2-} suivant la gamme de pH, schéma 1. Ce phénomène a pour conséquence d'abaisser le pH du milieu et de conduire à la dissolution des hydrates du ciment. L'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) est notamment

affecté. Plus communément appelé portlandite, cet hydrate joue un rôle fondamental dans le maintien d'un pH élevé protégeant les armatures du béton armé ou prévenant la formation de micro-organismes. Lorsque la portlandite a été entièrement consommée, ou qu'elle n'est plus suffisamment accessible pour réguler le pH par effet tampon, le milieu s'acidifie, permettant ainsi la corrosion des armatures. La carbonatation des silicates de calcium hydratés (C-S-H) est également possible. La carbonatation des C-S-H, qui contribue de manière non négligeable à la fixation du CO_2 dans la matrice cimentaire, est à l'origine d'importantes évolutions de la microstructure. Les C-S-H se carbonatent suivant un mécanisme progressif de décalcification, les ions calcium venant se précipiter dans la porosité avec les ions carbonates sous forme de carbonate de calcium. La décalcification conduit à la formation d'un gel de silice très amorphe (fortement polymérisé) et plus ou moins hydraté. La carbonatation de la portlandite et des C-S-H est inéluctable, même pour des concentrations très faibles en CO_2

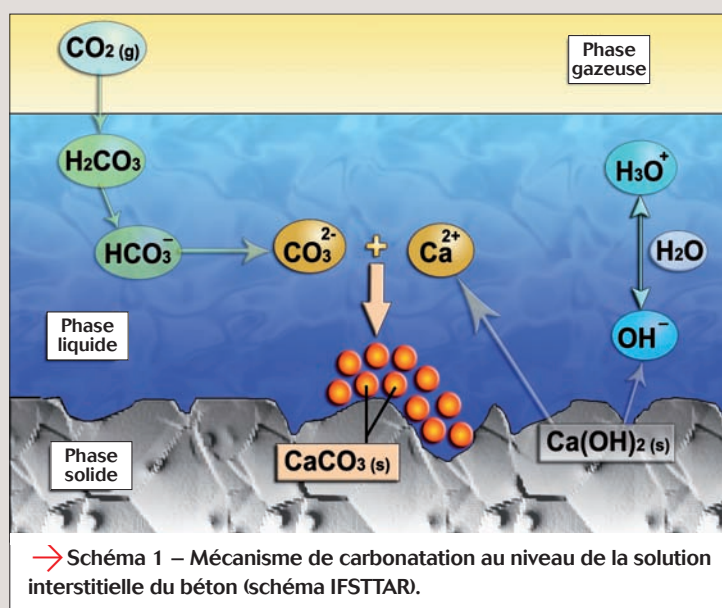
(0,03 %). La concentration en CO_2 venant simplement contrôler la vitesse à laquelle ce phénomène va avoir lieu et la vitesse avec laquelle il pénétrera dans le matériau (on parle alors de cinétique de pénétration).

LA CARBONATATION MODIFIE LE pH DU BÉTON

Notons que les ciments contiennent également des oxydes d'alcalins (Na_2O et K_2O) qui se retrouvent sous forme de bases alcalines dans la solution interstitielle (NaOH et KOH). Ces espèces alcalines permettent de maintenir une basicité au-delà de la valeur imposée par la portlandite (c'est-à-dire au-delà de 12,4 à 20 °C). Néanmoins, leur carbonatation est très rapide puisque les alcalins sont quasiment uniquement présents sous forme aqueuse et sont donc facilement lixiviés (on dit aussi lessivés) en présence de pluie. Au cours du processus de carbonatation, l'élément principal de transformation est le carbonate de calcium (CaCO_3) dont il existe plusieurs variétés polymorphiques : calcite, vaterite et aragonite. La calcite est la variété la plus stable et correspond à la forme du calcaire qui a servi à obtenir le clinker après cuisson du cru dans le four de la cimenterie.

Du point de vue des structures en béton armé ou précontraint, la carbonatation est un phénomène délétère qui progresse de l'extérieur (parement) vers l'intérieur, à travers la zone d'enrobage des armatures, selon un processus physico-chimique qui associe la diffusion du CO_2 à travers la porosité et les réactions chimiques de fixation du CO_2 dans les hydrates. La neutralisation de l'alcalinité du milieu qui en découle devient problématique lorsqu'elle atteint le premier lit des armatures. En effet, si le pH diminue trop, la couche de passivation des aciers constituée d'oxydes et d'hydroxydes ferreux

devient instable. Il s'ensuit une corrosion rapide, dite généralisée, sur toute la surface de l'armature. Les produits de corrosion, qui sont expansifs, endommagent le parement (fissuration, épaufrures, etc.), forment des coulées de rouilles inesthétiques et conduisent à la réduction de la section d'acier des armatures. La valeur de pH seuil en dessous de laquelle la carbonatation peut conduire à une corrosion marquée des armatures fait encore débat dans la littérature. Situé entre 9 et 11, ce seuil dépend de la nature du ciment et surtout de l'état hydrique du béton ; il faut notamment suffisamment d'eau liquide pour faciliter les échanges ioniques au niveau des micropiles qui apparaissent sur la surface de l'acier, sans pour autant bloquer la diffusion de l'oxygène corrosif en phase gazeuse. Il est possible de réaliser un diagnostic de l'état de carbonatation du béton en prélevant depuis un parement une carotte qui est fendue en deux et sur laquelle un indicateur colorimétrique de pH (phénolphthaléine) est pulvérisé. La partie carbonatée apparaît incolore et le noyau non carbonaté, c'est-à-dire très basique, se colore en rose (la zone de virage est voisine de $\text{pH} = 9$). Toutefois il est stipulé dans la réglementation européenne REACH que la phénolphthaléine a un caractère cancérigène. Son utilisation doit être limitée ou sévèrement contrôlée. C'est pourquoi la communauté scientifique se penche sur l'utilisation d'un nouvel indicateur coloré de pH. La méthode colorimétrique ne renseigne pas sur la forme véritable du front de carbonatation comme cela est illustré sur le schéma 2 où les armatures apparaissent protégées, car étant situées à l'aval du front détecté par projection de phénolphthaléine, alors qu'en réalité le niveau



de carbonatation y serait suffisant pour initier la corrosion. Pour gagner en précision, il existe des méthodes plus coûteuses telles l'analyse thermogravimétrique (réalisée sur une succession de fines tranches de matériau prélevées par sciage depuis la surface) et la gamma-densimétrie (méthode non destructive). L'utilisation de plusieurs indicateurs colorés présentant des zones de virage de pH différentes pourrait également être une solution à condition que les contrastes de coloration entre les zones saine et carbonatée soient suffisamment marqués.

L'humidité de l'air est un facteur très important puisque la carbonatation est lente, voire absente, dans une atmosphère saturée d'eau (la diffusion du CO₂ en phase gazeuse est alors quasiment impossible si la

porosité du béton est saturée) et dans une atmosphère trop sèche (la dissolution du CO₂ en phase aqueuse n'a pas lieu car elle est cinétiquement très limitée). Ce comportement conduit à une carbonatation optimale pour une humidité relative comprise entre 50 et 70 %. En revanche, notons que la corrosion sera quant à elle optimale pour une humidité relative avoisinant 90 %-95 %.

Du point de vue normatif, le risque de carbonatation est pris en compte pour formuler un béton (E/C, dosage en ciment et teneur en additions minérales) au travers de la norme *NF EN 206-1*. Il est intéressant de noter que la classe d'exposition la plus préjudiciable vis-à-vis de la carbonatation (XC4) correspond à un climat avec alternance de phases

sèches et humides. Cette situation n'est certes pas la plus favorable du seul point de vue de la carbonatation ; en revanche, eu égard au risque de corrosion, elle maximise la cinétique. Notons également l'existence de normes (*Eurocode 2*) permettant le dimensionnement de l'épaisseur d'enrobage en fonction de la classe de résistance du béton et de l'agressivité de l'environnement vis-à-vis de l'attaque du CO₂.

PLUSIEURS PARAMÈTRES INFLUENT SUR LA CINÉTIQUE DE CARBONATATION

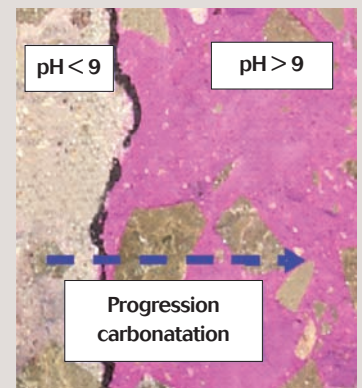
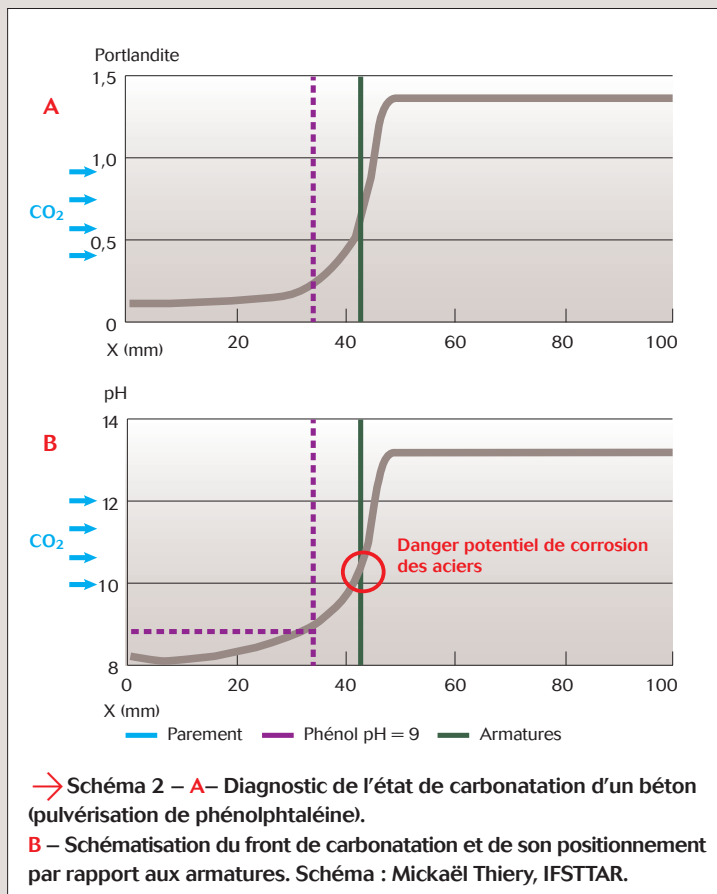
Il existe de nombreux modèles de carbonatation qui traduisent, plus ou moins directement, la résistance physico-chimique du béton contre la pénétration du front de carbonatation. Les paramètres utilisés se rapportent à :

- la porosité du béton qui conditionne la résistance « physique » du matériau à la diffusion du CO₂ ;
- la teneur en hydrates carbonatés : plus elle est élevée, plus le béton est capable de freiner « chimiquement » la pénétration du front de carbonatation ;
- la microstructure du matériau (taille des pores) dont dépend l'état hydrique du matériau qui conditionnera la cinétique de pénétration du phénomène. C'est alors essentiellement la perméabilité à l'eau liquide du matériau qui sera un indicateur de durabilité pertinent.

Ces modèles aboutissent généralement à une évolution lente en racine carrée du temps de la profondeur de carbonatation. Pour fixer les idées, avec un béton ordinaire conservé dans un environnement dont l'humidité relative est comprise entre 50 et 70 %, la profondeur de carbonatation est de 5 mm après un an, 10 mm

au bout de 4 ans et 25 mm après 25 ans. Les modèles sont utilisés pour prédire la durée de vie du matériau béton vis-à-vis de l'initiation de la corrosion par carbonatation. Ils ont donc souvent comme défaut de ne pas tenir compte de la cinétique de corrosion et, dès lors, ils conduisent à un surdimensionnement de l'épaisseur d'enrobage et à une formulation souvent trop sécuritaire du béton. Cette approche de la conception du béton est de plus en plus remise en cause dans le contexte actuel de préservation des ressources non renouvelables et de limitation de l'empreinte carbone de la construction en béton.

La carbonatation peut également être à l'origine de désordres au niveau des enduits de façade correspondant généralement à des mortiers à fort dosage en chaux grasse (Ca(OH)₂) partiellement carbonatée. L'acidification du milieu qui découle de l'attaque du CO₂ peut être à l'origine du développement de micro-organismes (lichens, mousses, algues, etc.) qui ne croissent pas dans un milieu fortement basique. Ces micro-organismes sont à l'origine de salissures inesthétiques. Il est possible d'enlever temporairement ces traces par un lavage du mur avec de l'eau de Javel diluée ou en utilisant un produit fongicide adapté. ■



→ Progression du front de carbonatation.

Les bienfaits de la carbonatation pour le béton

À l'inverse des conséquences néfastes de la carbonatation sur la pérennité des structures en béton, la carbonatation est plutôt un phénomène bénéfique du seul point de vue du matériau béton lui-même. Il est en effet reconnu que la carbonatation des matrices cimentaires à base de ciment de type CEM I se fait avec un gain de masse correspondant à la fixation du CO_2 dans les hydrates. Le fait que le volume molaire du carbonate de calcium formé soit supérieur à celui des hydrates conduit à un colmatage de la microstructure qui rend le béton moins perméable aux agents agressifs (en l'occurrence les gaz CO_2 et O_2 , mais aussi les ions sulfates, les chlorures, et plus généralement, les eaux agressives de type eau de mer, eaux séléniteuses ou magnésiennes, etc.). Il a même été montré que la carbonatation permettait d'accroître la résistance mécanique des bétons (compression, chocs, usure, etc.) et de rendre le matériau plus stable chimiquement vis-à-vis des réactions de gonflement (réaction sulfatique interne ou externe, réaction alcali-granulats, etc.). En revanche, le module de rigidité ou module d'élasticité est augmenté, ce qui n'est pas toujours perçu comme un avantage car cela peut conduire à une fragilisation des pièces minces et à une hétérogénéité de résistance et de retrait dans le cas des enduits de façade partiellement carbonatés où on peut observer des fissures de surface qui s'arrêtent au niveau de la zone interne non carbonatée.

UNE PROPRIÉTÉ EXPLOITÉE PAR LES ANCIENS

Cette amélioration des propriétés du béton a même été mise à profit dans certains pays pour la préfabri-

cation de blocs par autoclavage en utilisant de fortes concentrations de CO_2 . On sait aussi que les anciens (Étrusques, Phéniciens, Grecs, Romains, et même Chinois) utilisaient la carbonatation atmosphérique pour confectionner des jointages de maçonnerie et des enduits à base de mortier de chaux grasse (ou éteinte, c'est-à-dire Ca(OH)_2). Le durcissement avait lieu par carbonatation sous l'action du CO_2 de l'atmosphère. Cette chaux grasse ne pouvait pas faire prise dans l'eau, mais uniquement dans l'air, d'où son nom de « chaux aérienne » et la qualification de « prise aérienne » dans ce cas. Le durcissement était rapide en surface, puis la vitesse de carbonatation freinée par la couche dense de carbonate de calcium formée. Cette croûte avait une imperméabilité telle que l'on peut retrouver encore actuellement au cœur des murs anciens épais de la chaux grasse encore plastique et non carbonatée à l'arrière d'une couche compacte de calcite. Actuellement, on constate une recrudescence de l'utilisation de mortiers et peintures à prise aérienne dans le domaine du bâtiment.

En terme de distribution de la taille des pores dans la matrice cimentaire, la carbonatation conduit à un réarrangement de la répartition porale avec la création de macropores (principalement pour des matrices à fort E/C exposées à de fortes teneurs en CO_2), et cela en dépit d'une réduction globale de porosité. Ce phénomène est illustré sur le schéma ci-contre dans le cas d'un béton de bâtiment à fort E/C = 0,84.

Soulignons que les aspects positifs de la carbonatation qui viennent d'être décrits sont essentiellement caractéristiques des systèmes cimentaires contenant un fort dosage en

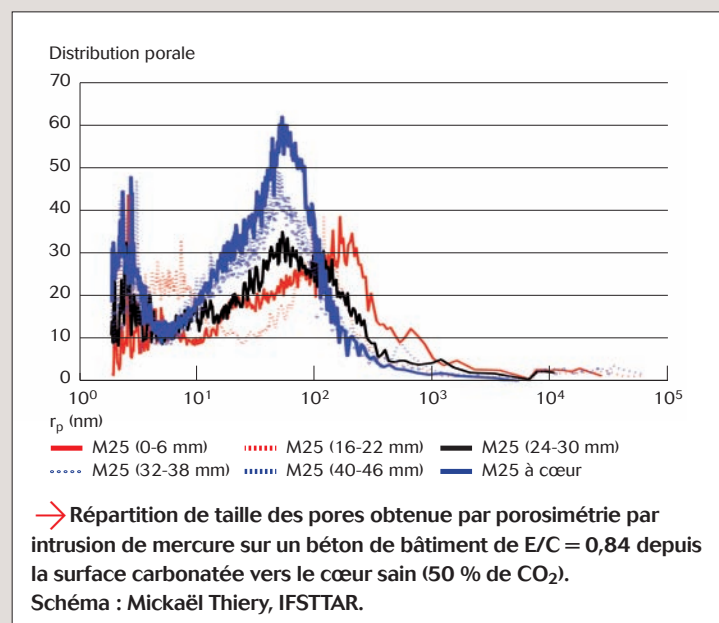
ciment de type CEM I. Dès qu'une part importante de laitier de haut fourneau, de cendres volantes ou de fumée de silice est ajoutée, les propriétés du matériau se dégradent à la suite de la carbonatation : baisse de la densité, réduction de la résistance, ouverture significative de la porosité, etc. Il semblerait que cette particularité soit à corréluer au fait que les hydrates de type C-S-H formés à partir des additions perdent, au cours de la carbonatation, une quantité importante d'eau de structure chimiquement liée.

TIRER AVANTAGE DE LA CARBONATATION

Enfin la carbonatation est responsable d'efflorescences blanchâtres de carbonate de calcium à la surface des parements, sans aucun inconvénient, si ce n'est d'un point de vue esthétique. Ce phénomène se produit si la portlandite est dissoute par l'eau d'imprégnation pendant les phases climatiques humides et que les ions calcium migrent vers la surface par capillarité pendant les phases de séchage. Chassés vers

l'extérieur, les ions calcium se carbonatent à l'air. Des traînées de calcite se voient alors sur les parois des ouvrages au voisinage des fissures et comblent les zones les plus poreuses. On peut remarquer dans les galeries de barrage la formation de stalactites de calcite provenant du délavage de la portlandite.

Ce faisant, la carbonatation du béton peut être un mal ou un bien, suivant la conception et la destination des ouvrages. La bonne connaissance de ce phénomène permet de mettre à profit cette propriété, soit en protégeant le béton de cette carbonatation (mise en peinture adaptée par exemple), soit en la limitant (accroissement de l'épaisseur d'enrobage du béton armé, amélioration de la qualité du béton d'enrobage, etc.), soit au contraire en la favorisant (grâce à une carbonatation accélérée). Tirer avantage de la carbonatation est surtout utile pour améliorer les propriétés des systèmes cimentaires non armés, mais aussi pour piéger du CO_2 qui est un aspect environnemental loin d'être négligeable. ■



Le piégeage du CO₂ dans les bétons de démolition



→ Stock de bétons de démolition avant traitement.

Les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'augmentation de la part d'énergies renouvelables ou de protection des espèces menacées sont autant de réponses politiques et législatives aux préoccupations de la société civile relatives aux impacts environnementaux de l'activité humaine. Ces objectifs impactent, de manière générale, notre développement futur, mais aussi, de manière spécifique, la façon dont nous construisons nos bâtiments et nos infrastructures. En France, la majorité des ouvrages d'art, 80 % des logements individuels et 90 % des logements collectifs sont construits en béton. Dans le monde, avec trois tonnes par personne et par an, le béton est le matériau manufacturé le plus utilisé. Cette position trouve sa justification dans le faible coût énergétique et donc économique lié à sa fabrication ainsi que dans la disponibilité de ses composants partout à la surface de notre planète. Cependant, dans un objectif de Développement Durable, une telle position en termes de fabrication et de consommation fait de la relation avec l'environnement de ce matériau une question majeure.

DES EFFORTS POUR DIMINUER LES ÉMISSIONS

La fabrication du clinker *Portland* représente ainsi entre 5 et 7 % du CO₂ produit par l'homme et ses activités. Ces émissions de CO₂ sont, d'une part, associées au processus de préparation et de cuisson du cru et, d'autre part, au processus de décarbonatation du calcaire nécessaire à la production du clinker. Malgré les efforts des cimenteries européennes pour diminuer leurs émissions en améliorant l'efficacité des fours et en augmentant la quantité de matériaux de substitution, la fabrication d'une tonne de ciment en France émet 600 kg de CO₂ (pour une moyenne mondiale de 1 000 kg). Il est possible d'anticiper une partie des évolutions des ciments qui découleront de la mise en place de politiques de réduction des impacts environnementaux. Il a pu ainsi être montré récemment que l'industrie actuelle, en prenant en compte sa croissance et son évolution technique potentielle, pourrait produire des matériaux cimentaires répondant aux critères de diminution des émissions de CO₂ fixés pour l'étape intermédiaire de 2020¹.

LA VALORISATION DES BÉTONS DE DÉMOLITION

Dans le même temps, les déchets de démolition de bâtiments en béton qui, en région Île-de-France par exemple, s'élèvent à plusieurs millions de tonnes par an sont, au pire, transportés de plus en plus loin de la capitale pour être enterrés ou, au mieux, recyclés comme matériau de remblais à faible valeur ajoutée dans le domaine du terrassement routier. L'utilisation de granulats de bétons recyclés dans la production de nouveaux bétons suit de peu l'invention du béton lui-même² mais les raisons qui ont poussé les gouvernements et les industriels à encourager le recyclage des matériaux de démolition se sont amplifiées au cours du temps. Les granulats naturels représentent désormais une ressource non renouvelable dont l'accessibilité diminue³. Par ailleurs, l'évolution anticipée des volumes de béton en fin de vie indique clairement que, lorsque les bâtiments construits massivement dans les années 50-80 arriveront en fin de vie, les volumes de béton à recycler seront tels qu'ils ne pourront pas être entièrement et uniquement utilisés en sous-couche routière. Des problèmes techniques subsistent cependant dans les approches existantes de recyclage. Les granulats issus du concassage d'un béton présentent une porosité supérieure aux granulats naturels et des propriétés mécaniques inférieures. Par ailleurs, un obstacle majeur réside dans le mode de production des bétons à base de granulats recyclés. L'absorption d'eau de ces granulats est forte (entre 5 et 10 %) et lente (elle a lieu sur une période de l'ordre d'une vingtaine de minutes). Un béton de granulats recyclés malaxés dans des conditions traditionnelles voit ainsi son

ouvrabilité fortement chuter lors de la phase de transport du matériau.

La fabrication du clinker *Portland* nécessite la décarbonatation du calcaire, forme stable du calcium dans la nature, et sa cuisson en présence de silice. La réaction d'hydratation conduit à la formation d'hydrates métastables à l'origine des résistances du béton. La seule présence du CO₂ atmosphérique conduit à la carbonatation irréversible de ces hydrates sous forme de calcaire et de gel de silice, bouclant ainsi le cycle minéral comme décrit en introduction.

Cette réaction, très lente, est problématique comme nous l'avons vu pendant la phase de service d'une structure en béton armé mais peut être exploitée pour fixer du CO₂ à la fin de la vie de la structure.

PIÉGEAGE DU CO₂ PENDANT LA VIE DE L'OUVRAGE

Le captage du CO₂ a tout d'abord lieu pendant la phase de service du matériau dans la structure, même s'il faut bien reconnaître que l'avancée de la carbonatation doit être freinée pendant cette période pour protéger la structure. Des simulations numériques ont été réalisées dans le but d'évaluer la capacité de fixation en CO₂ d'un élément de structure simple : un mur de bâtiment de

1 – G. Habert, N. Roussel, Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives, *Cement & Concrete Composites*, 31 (2009) 397–402.

2 – Saint Léger, 1827, *Brevet d'invention et de perfectionnement remis à M. Saint Léger, sur l'autorisation spéciale de M. Vicat, 25 mai 1827. Archives nationales, F 13 959.*

3 – UNICEM, 2005. *Granulats en Île-de-France, mieux prendre en compte la ressource en matériaux dans les documents d'urbanisme.*

20 cm d'épaisseur se carbonatant sur ses deux faces avec un enrobage de 3 cm. Trois bétons ont été étudiés (classe de résistance C25/30, C40/50, C50/60). Ces bétons sont formulés à partir d'un ciment *Portland* de type CEM I et présentent des dosages en ciment respectivement égaux à 230, 300 et 410 kg/m³. Nous supposons par ailleurs que la durée d'utilisation est atteinte lorsque la profondeur de carbonatation atteint la profondeur d'enrobage. Les cinétiques de piégeage du CO₂ sont représentées sur le schéma 1. Ces premiers calculs ont montré que la carbonatation joue de manière non négligeable sur le bilan carbone des matériaux à base de ciment, puisque, pendant la phase de service, le matériau est capable de capter 10 à 15 % du CO₂ initialement dégagé pour la fabrication du ciment. Ces chiffres dépendent bien sûr du caractère plus ou moins massif de l'élément de structure considéré. Pour un élément massif d'ouvrage d'art (pile par exemple), le rendement de piégeage du CO₂ pendant la phase de service serait bien plus faible.

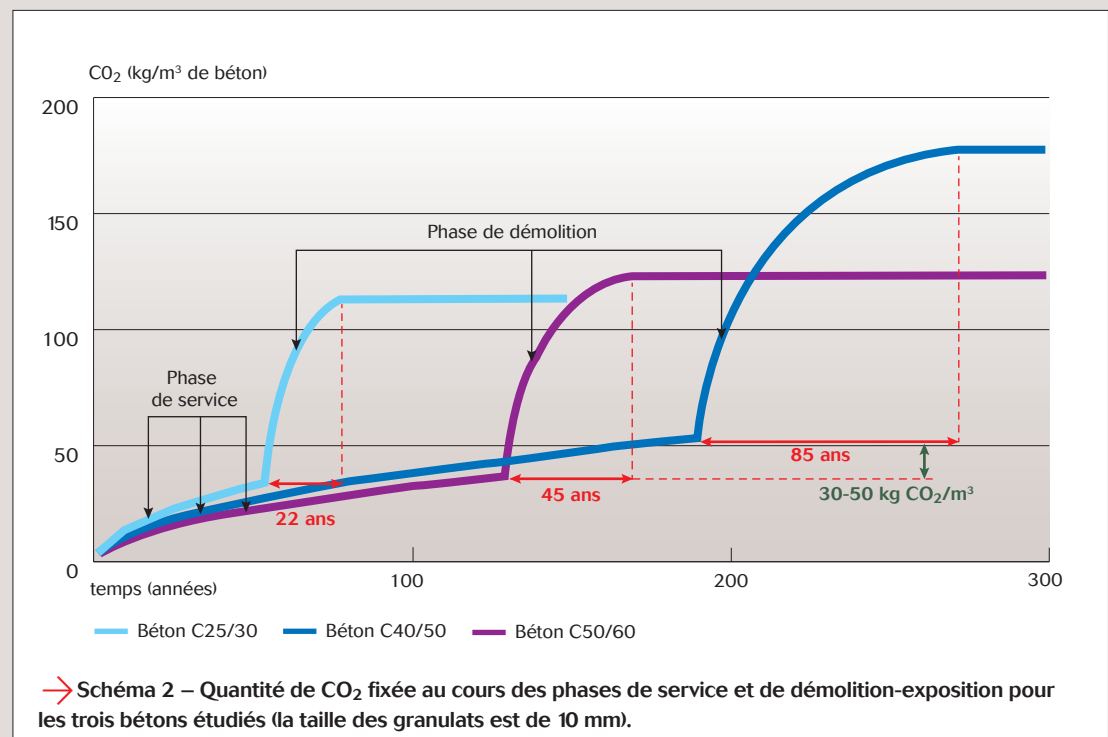
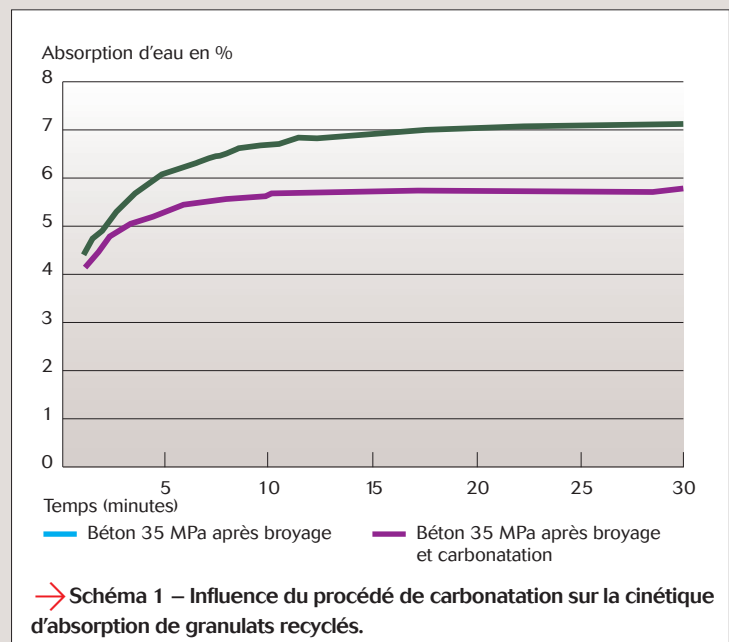
PIÉGEAGE DU CO₂ PENDANT LA PHASE POSTSERVICE

Il est aussi possible de considérer le piégeage du CO₂ pendant la phase postservice correspondant à la démolition et au stockage des granulats de démolition. Les simulations réalisées ont permis de quantifier de telles possibilités. Après démolition, le matériau est supposé être concassé en granulats (de taille de l'ordre du centimètre) exposés à la carbonatation naturelle tout en étant protégés des intempéries afin d'accélérer le captage de CO₂. L'épaisseur du lit de granulats de béton de

démolition est considérée à titre d'exemple comme étant de 20 cm. Le schéma 2 illustre alors la quantité de CO₂ fixée par les trois bétons précédents pendant la phase de démolition-exposition. Il est à noter que la cinétique de carbonatation durant cette dernière phase est bien sûr plus rapide que la cinétique de carbonatation pendant la phase de service, ce qui est justifié par l'augmentation de la surface exposée au CO₂ après concassage. En effet, le procédé de concassage du béton de démolition permet de multiplier par un facteur proche de 1 000 la surface offerte au CO₂ atmosphérique lors de la transformation d'un élément en béton armé de type voile ou dalle d'une épaisseur typique de l'ordre de 20 cm en granulats de taille centimétrique. Quantitativement, un état de carbonatation total est atteint pendant la phase de démolition-exposition au bout de 22 ans pour le béton de classe de

résistance 25/30, 45 ans pour le C40/50 et 85 ans pour le C50/60. À l'issue de cette période, la quasi-intégralité de la quantité de CO₂ émise pendant la phase de décarbonatation en cimenterie est récu-

pérée par le matériau de démolition puisque l'hydroxyde de calcium et les silicates de calcium ont atteint un état de carbonatation total. Ces durées sont bien sûr incompatibles avec les pratiques de stockage de



granulats de béton de démolition. Si nous considérons des durées d'exposition de l'ordre de quelques mois à quelques années, il est possible de montrer que l'exposition des granulats de béton recyclés à l'atmosphère pourrait permettre de capter environ entre 30 et 50 kg/m³ supplémentaires.

OPTIMISATION DES CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS CARBONATÉS

Comme décrit plus haut, il a pu être montré que la carbonatation de la matrice engendre une diminution de la porosité associée à une augmentation de la taille moyenne capillaire. L'absorption d'eau du granulat

traité est ainsi plus faible, mais aussi plus rapide. Ainsi, 90 % de l'absorption a lieu pendant les deux premières minutes pour le granulat carbonaté alors qu'il faut près de 15 minutes pour le granulat non carbonaté comme le montre le schéma 1. Ceci le rend beaucoup plus adapté à une production tradi-

tionnelle de béton. D'un point de vue mécanique, le traitement de carbonatation a permis de mesurer des réductions d'un facteur 2 des valeurs d'usure Micro-Deval. Enfin, une stabilisation chimique des granulats recyclés est à anticiper au vu des résultats de la littérature sur la carbonatation. ■

Point de vue de l'expert

MICKAËL THIERY

Chercheur à l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR, ex-Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), il est un spécialiste de la durabilité des matériaux à base de ciment.

Alors que la carbonatation est surtout connue pour être responsable de la corrosion des armatures du béton armé durant la phase de service des structures, ce phénomène semble actuellement être mis à profit pour la capacité qu'il offre de piéger du CO₂ dans les matériaux cimentaires.

Il est possible désormais en suivant les prescriptions des normes, de maîtriser les effets de la carbonatation des bétons sur les armatures pendant la durée d'utilisation de l'ouvrage en ajustant la formulation des bétons et en optimisant la valeur de l'enrobage des armatures en fonction des diverses attaques et agressions (traduites par la notion de classe d'exposition) que va subir le béton. De plus, les ingénieurs ont actuellement à disposition des outils performants basés sur l'évaluation d'indicateurs de durabilité (porosité, perméabilité, teneur en portlandite, etc.) et des modèles prédictifs qui permettent de dimensionner

au mieux les formules de béton et l'épaisseur d'enrobage en fonction de la durée de vie attendue et suivant l'agressivité du milieu.

Dans la pratique, sous quelle forme ce piégeage du CO₂ pourrait-il se manifester à court terme ?

Nous pouvons imaginer dès demain la réalisation, par exemple, d'écrans acoustiques ou de gabions à l'aide de granulats recyclés de béton de démolition implantés au plus près des axes de transport. Le bruit émis par les transports est la principale nuisance environnementale perçue par les habitants en site urbain. Ces axes de transport génèrent localement du CO₂ qui pourra être piégé dans les granulats de béton de démolition. Nos travaux récents sur ce sujet ont été financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et ont reçu le premier prix du trophée Eugène Freyssinet récompensant une contribution concrète au Déve-

loppement Durable. Ces travaux ont montré que la cinétique de carbonatation d'une couche de granulats de béton de démolition était optimale pour une épaisseur de l'ordre de 20 cm. La réalisation d'équipements urbains tels que des écrans acoustiques permet, par ailleurs, d'épargner nos ressources en granulats naturels. Au bout de quelques années, les granulats totalement carbonatés pourront être une source de matériaux pour la fabrication de nouveaux bétons. Des projets de ce type sont d'ailleurs déjà en cours dans certaines agglomérations françaises. Certaines équipes de recherche européennes (UNIVPM-Ancona par exemple) travaillent aussi sur le piégeage du CO₂ dans des écrans acoustiques réalisés à partir de bétons très poreux à base de chaux hydraulique ou de ciment classique. Des équipes de recherche françaises travaillent aussi sur le piégeage du CO₂ dans des bétons de démolition directement à la

sortie d'usines émettrices de dioxyde de carbone telles les cimenteries. Les concentrations locales élevées en CO₂ permettent l'immersion des granulats de béton de démolition dans du CO₂ supercritique rendant ainsi la carbonatation quasiment instantanée. Le but, à plus long terme, est de permettre la production de bétons à partir de granulats de bétons de démolition. La ville pourrait alors se reconstruire à partir de ses propres déchets tel un écosystème urbain. Une fois ces techniques généralisées, ce piégeage pourra être pris en compte dans l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) du béton et les Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES) des produits en béton. Actuellement, il n'est uniquement possible d'intégrer dans ces documents que le piégeage du CO₂ pendant la vie de l'ouvrage. ■