

Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages

Bilan de cinq années de recherches et orientations futures

Véronique BAROGHEL-BOUNY
Thierry CHAUSSADENT

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Cet article a pour objet de synthétiser les principaux résultats scientifiques obtenus dans le cadre d'un thème de recherche piloté par le LCPC et d'en répertorier les produits directs, tels que les différentes méthodes d'essai développées. Les objectifs, ainsi que la démarche adoptée dans le cadre de cette action coordonnée associant de nombreux laboratoires, sont préalablement rappelés. Quelques résultats significatifs sont également présentés, relativement à la compréhension des mécanismes (transferts hydriques, carbonatation, pénétration des chlorures) ou aux outils de caractérisation de la microstructure et des paramètres liés à la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures. Parmi les exemples mentionnés figurent la quantification des interactions entre l'hydratation et le séchage exogène et leurs conséquences, ainsi que l'évaluation des interactions physico-chimiques entre les ions chlorure et la matrice cimentaire, l'influence déterminante du prétraitement des échantillons sur les résultats d'essai, ou encore la modélisation des transferts hydriques isothermes. Cette dernière a servi de base au développement, non seulement de modèles de transfert des ions (chlorures) en conditions non saturées, mais également d'une méthode indirecte de détermination de la perméabilité à l'eau liquide. Des pistes sont en outre proposées dans cet article, d'une part pour poursuivre les recherches dans le domaine de la durabilité des matériaux du génie civil, et, d'autre part, pour valoriser les travaux réalisés et transférer à la pratique les résultats déjà acquis.

DOMAINE : *Ouvrages d'art.*

ABSTRACT

TRANSFERS WITHIN CONCRETE AND STRUCTURAL DURABILITY. OVERVIEW OF FIVE YEARS OF RESEARCH AND OUTLOOK FOR THE FUTURE

This article is aimed first at synthesizing the main scientific results obtained within the framework of a research project directed by the LCPC laboratory, and then at drawing up a list of the direct products generated from this work ; these would include the various test methods developed. The objectives, along with the approach adopted as part of this coordinated project associating many laboratories, are recalled first. A sample of significant results is also presented, as regards the understanding of the mechanisms (moisture transfers, carbonation, chloride ingress) as well as the tools for characterizing the microstructure and the parameters involved in the durability to reinforcement corrosion. The examples cited include the quantification of interactions between hydration and exogenous drying and their consequences, along with an evaluation of physico-chemical interactions between chloride ions and the cementitious matrix, the determinant influence of specimen preconditioning on test results, and the modeling of isothermal moisture transfers. This last example has served as a basis for developing not just (chloride) ion transfer models under unsaturated conditions, but also an indirect method for assessing permeability to liquid water. In addition, a number of leads are proposed herein on the one hand, for pursuing research in the area of civil engineering material durability, and, on the other hand, for emphasizing the work conducted to date, and transferring the results to practical applications.

FIELD: *Structural engineering.*

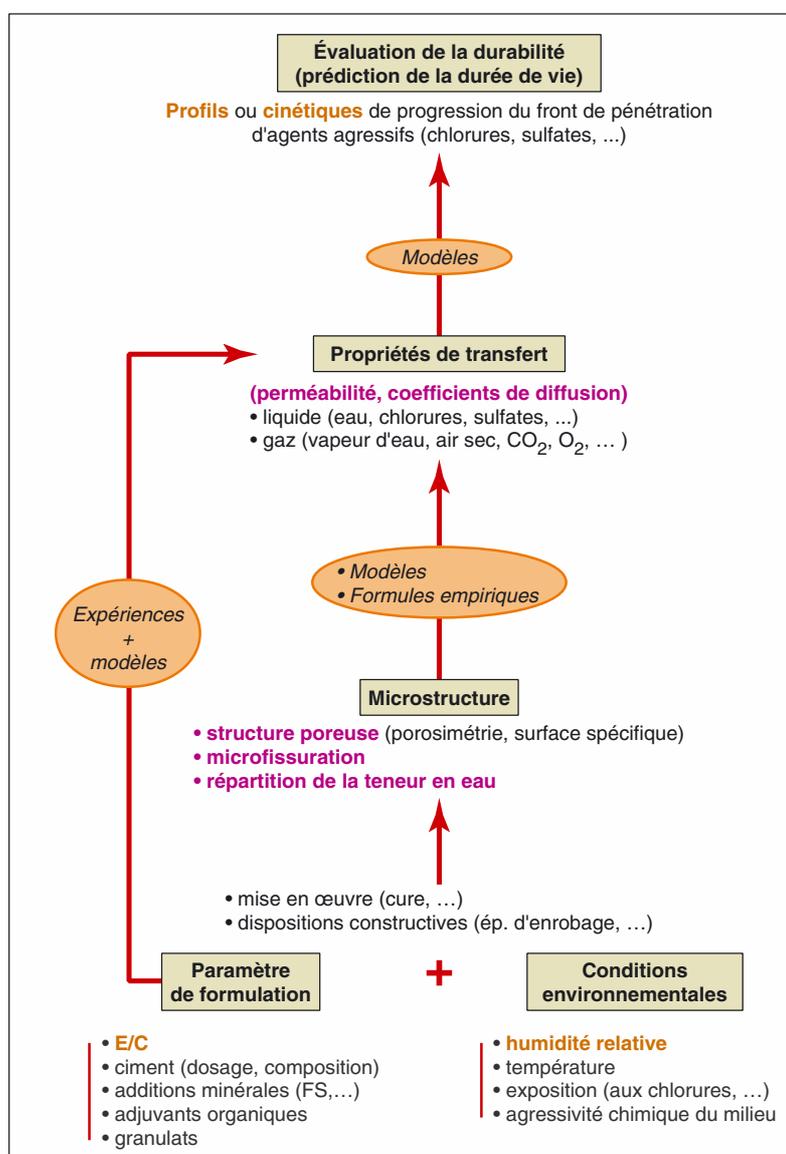
AVANT-PROPOS

Cet article a pour objet de résumer les principaux résultats scientifiques obtenus dans le cadre du thème de recherche piloté par le LCPC « Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages » et d'en répertorier les produits directs. Le contenu des travaux et l'ensemble des résultats ne sont pas explicités ici. Seuls quelques exemples significatifs sont présentés. Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer aux documents cités. Cet article rappelle au préalable les objectifs, ainsi que la démarche adoptée dans le cadre de ce projet. Des pistes sont en outre proposées, d'une part pour poursuivre les recherches dans le domaine de la durabilité des matériaux du génie civil et, d'autre part, pour valoriser les travaux réalisés et transférer à la pratique les résultats déjà acquis.

PRÉSENTATION, OBJECTIFS ET DÉMARCHE ADOPTÉE

Le thème de recherche piloté par le LCPC « Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages » a été lancé en 1995, pour une durée de cinq ans. À l'origine de ce projet résidait la volonté de mener une action coordonnée entre le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC), les Laboratoires universitaires ou du CNRS et l'industrie en pointe dans ce domaine, afin de parvenir à des résultats qui soient à la fois scientifiquement fondés, unanimement reconnus et facilement transférables à la pratique. À cette fin, cinq Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC), plusieurs équipes du LCPC et une dizaine d'équipes extérieures (CEA de Saclay, CRMD-CNRS d'Orléans, CSTB de Grenoble, ESPCI, LERM, LGCNSN-IUT de Saint-Nazaire, LETHEM-INSA de Toulouse, LMDC-INSA de Toulouse, LTHE de Grenoble et CTG Italcementi) ont été associés à ce programme.

À partir d'une connaissance précise du matériau (caractérisation de l'espace poreux, évaluation de la répartition de la teneur en eau, quantification du réseau de microfissures, etc. [1, 2]), les sujets proposés dans ce thème de recherche avaient pour objectif de quantifier et de prévoir l'aptitude aux transferts des bétons, sous forme liquide, ionique ou gazeuse (Fig. 1).



■ Fig. 1

Durabilité associée aux processus de transfert : démarche scientifique du thème de recherche.

L'approche adoptée, fondée sur les propriétés de transfert du matériau en conditions saturées ou non saturées et, plus précisément, sur la notion d'*indicateurs de durabilité*, comporte deux étapes-clés :

- L'analyse et la compréhension des mécanismes physico-chimiques intervenant dans les processus de carbonatation et de pénétration des chlorures, causes majeures de la corrosion des armatures du béton armé, ou encore, de façon plus fondamentale, dans le séchage du béton ;
- L'évaluation des moyens de détermination des propriétés de transfert (perméabilité, coefficients de diffusion), susceptibles d'être qualifiées d'*indicateurs de durabilité*. Ces propriétés sont notamment fonction des paramètres de formulation du matériau, des conditions de mise en œuvre et des conditions environnementales.

À partir de deux types d'outils, les expériences et les modèles explicatifs, l'objectif général était donc de fournir des éléments quantitatifs pour une meilleure maîtrise de la durée de vie des ouvrages en béton armé ou précontraint.

APPORTS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Ces recherches, consacrées à la durabilité du « matériau béton », ont permis de franchir une première étape essentielle dans le développement d'une approche performantielle et prédictive de la durabilité du béton armé sur la base d'indicateurs de durabilité. Elles ont en effet apporté des résultats nouveaux, tant au niveau de la compréhension des mécanismes que des outils de caractérisation.

Grâce aux nombreuses collaborations, une action concertée au niveau français a pu être menée, afin de bénéficier de différentes approches, ainsi que de la pluridisciplinarité et de la complémentarité de l'ensemble des acteurs au niveau des connaissances scientifiques et des moyens expérimentaux. Cela a par exemple rendu possible la mise en œuvre d'un large éventail de méthodes expérimentales, de façon complémentaire ou comparative, ainsi que le développement de méthodes associant modèle et expériences.

Principaux produits

Les principaux produits de ces recherches se déclinent en :

- séminaires scientifiques avec publication d'actes [3, 4, 5] ;
- stations d'essais mises en place dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) ou dans d'autres laboratoires, et publication des méthodes d'essais ou de mesures correspondantes [6] ;
- bases de données rassemblant :
 - des mesures en laboratoire (carbonatation accélérée, perméabilité aux gaz, porosimétrie au mercure, porosité à l'eau, etc.), dont le contenu est intégré à la base de données générale de la division « Bétons et composites cimentaires » du LCPC, qui sera accessible sur le réseau Internet,
 - des mesures sur ouvrages d'art (carbonatation *in situ*, ...) compilées par les LRPC [7] ;
- méthodes et codes de calcul ;
- rapports de recherche (par exemple publiés dans la collection « Études et Recherches des LPC ») sur les travaux bibliographiques, expérimentaux et de modélisation réalisés, et articles publiés dans des revues françaises ou internationales, ou dans des actes de conférences internationales.

Séminaires scientifiques

Deux manifestations, les journées « Durabilité » du réseau des LPC (8 et 9 mars 2000, CETE de Bordeaux) et le séminaire scientifique « Transferts 2000 » (6 et 7 avril 2000, Paris – Grande Arche de la Défense), ont été organisées à l'occasion de la clôture du projet.

Les journées « Durabilité » ont été consacrées à la présentation des méthodes de mesures et d'essais développées au sein du réseau des LPC et à la présentation des résultats expérimentaux obtenus avec ces méthodes dans le cadre du thème de recherche [3, 6]. Ces journées se sont notamment attachées à mettre en évidence l'intérêt pratique des travaux réalisés et les applications envisageables.

Le séminaire « Transferts 2000 » a, quant à lui, permis d'élaborer une synthèse des recherches sur la durabilité des bétons menées en collaboration avec les différents laboratoires associés dans le cadre

du projet. Les résultats théoriques et expérimentaux, ainsi que la démarche scientifique adoptée, ont notamment été présentés lors de cette manifestation [4, 5, 8].

Méthodes d'essais ou de mesures

La mise en place au sein du réseau des LPC d'un éventail complet de méthodes pertinentes de mesure et d'essais de laboratoire constituait un objectif prioritaire pour le thème de recherche. En effet, après avoir identifié les paramètres fondamentaux intervenant dans les processus mettant en jeu la durabilité du matériau béton et des structures en béton armé, il s'avérait nécessaire de pouvoir quantifier ces paramètres à partir de mesures ou d'essais simples, offrant une « précision » et une reproductibilité adéquates.

Les travaux menés dans le cadre du thème de recherche ont contribué à l'évolution des modes opératoires existants et à la préconisation de nouveaux essais, s'accompagnant de la mise au point des méthodes d'essais correspondantes et du développement des dispositifs expérimentaux requis. Le réseau des LPC s'est ainsi équipé de stations de perméabilité aux gaz (Fig. 2), de diffusion et de migration sous champ électrique des chlorures (Fig. 3), de carbonatation accélérée (Fig. 4), de « perméabilité » à la vapeur d'eau (méthode de la coupelle), etc.

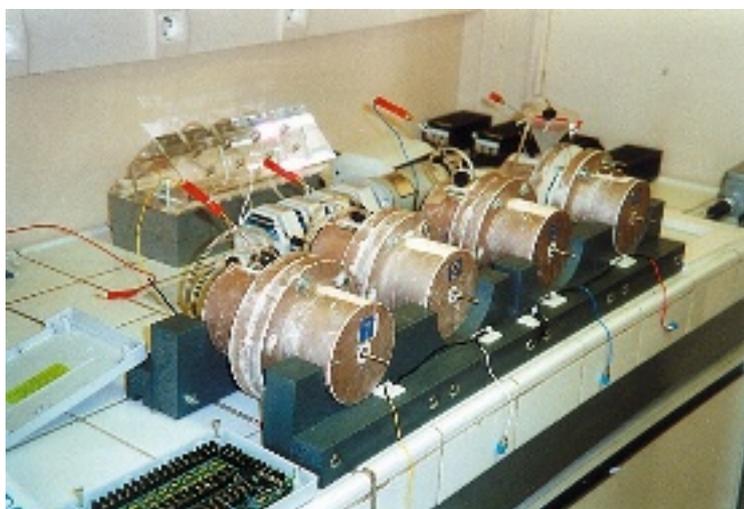
La plupart des méthodes de mesures et d'essais de laboratoire mises au point dans le cadre du thème sont décrites dans un recueil [6] structuré en deux parties. La première partie concerne les caractéris-

118

■ Fig. 2
Vue générale du perméamètre à gaz
à charge constante
« CEMBUREAU » du LCPC.



■ Fig. 3
Vue générale de l'installation de
migration des chlorures sous champ
électrique, en conditions saturées et
en régime stationnaire, en cours
d'essai au Laboratoire régional
de l'Est parisien (LREP).





← LREP Melun.



← LCPC Paris.



← LRPC Bordeaux.

■ **Fig. 4**
Les stations d'essais de carbonatation accélérée du réseau des LPC.

tiques microstructurales des matériaux à matrice cimentaire relatives, d'une part à l'état d'hydratation (degré d'hydratation du ciment, nature et répartition spatiale des phases anhydres et hydratées, etc.) et, d'autre part, à la structure poreuse (porosité totale, surface spécifique, rayon moyen des pores, distribution des volumes poreux, etc.). Les méthodes décrites dans la seconde partie ont pour objectif d'évaluer les propriétés ayant une influence majeure sur la durabilité du béton armé, en particulier sur le processus de corrosion des armatures (par exemple, mesure de la perméabilité aux gaz, essai de diffusion ou de migration sous champ électrique des chlorures, mesure des gradients de teneur en eau ou, encore, essai de carbonatation accélérée).

Les méthodes proposées dans ce recueil constituent des outils indispensables pour se prononcer avec fiabilité en matière de durabilité et pour répondre à différents problèmes pratiques : choix de formules de béton, comparaison des performances de différents bétons, spécification dans le cahier des charges, par le maître d'ouvrage, de critères de performances incluant des propriétés relatives à la durabilité, définition des conditions de mise en œuvre, etc., en amont de la construction d'un ouvrage. Ces méthodes peuvent également être utilisées lors de la mise en œuvre (sur éprouvettes de contrôle ou sur éléments témoins), ainsi que dans le cadre de la réception, du suivi (contrôle) ou de l'expertise d'ouvrages existants (diagnostic). Elles constituent donc également de précieux outils pour assurer une bonne gestion du patrimoine.

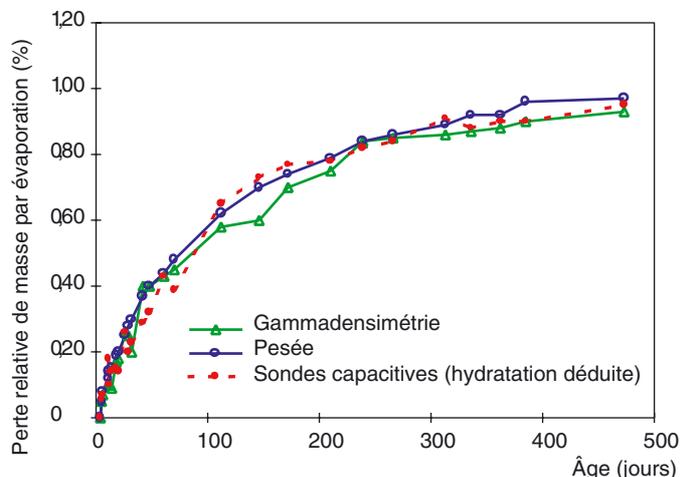
Par exemple, non seulement pour la compréhension des phénomènes, mais également pour la validation des modèles, il est nécessaire de pouvoir accéder expérimentalement aux cinétiques et aux profils de teneur en eau (ou d'humidité relative) régnant dans un élément de structure en béton. À cet effet, des sondes capacitives peuvent être introduites dans une éprouvette ou un élément de structure, par exemple pour suivre l'évolution de la teneur en eau évaporable après exposition à un séchage dès le jeune âge [6, 9, 10]. La validité de cette technique a pu être vérifiée en comparant la diminution de teneur en eau exclusivement due au séchage (par évaporation), déduite des mesures par sondes capacitives, aux mesures effectuées par pesée ou par gammadensimétrie (Fig. 5) [11].

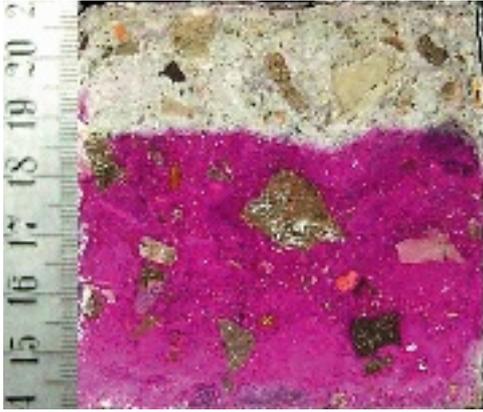
Par ailleurs, dans le cadre du projet, une analyse comparative de différentes méthodes, qualitatives ou quantitatives, de détermination de la zone carbonatée liée à la pénétration de gaz carbonique a été effectuée à la suite d'essais de carbonatation accélérée sur différents matériaux cimentaires. Les résultats ont montré que le front net observé par la méthode classique de pulvérisation d'un indicateur coloré (généralement la phénolphthaléine) permettait de suivre expérimentalement de façon simple la cinétique de carbonatation (Fig. 6). Des résultats intéressants sur l'influence du rapport eau sur ciment (E/C) et de la nature du liant ont de plus été mis en évidence [12, 13].

Différentes méthodes ont été proposées pour l'évaluation des coefficients de diffusion *apparent* et *effectif* des chlorures en conditions saturées [6, 14-16]. Des comparaisons sur une même pâte de ciment durcie [17] ont montré que des essais de diffusion réalisés en régime *stationnaire* ou *non stationnaire* conduisaient aux mêmes résultats. Chaque méthode présente naturellement des avantages et des inconvénients. L'un des avantages du régime non stationnaire est le faible temps nécessaire pour l'obtention du coefficient de diffusion. Ce temps peut encore être nettement raccourci si l'on pratique un essai de migration sous champ électrique au lieu d'un essai de diffusion. En outre, les

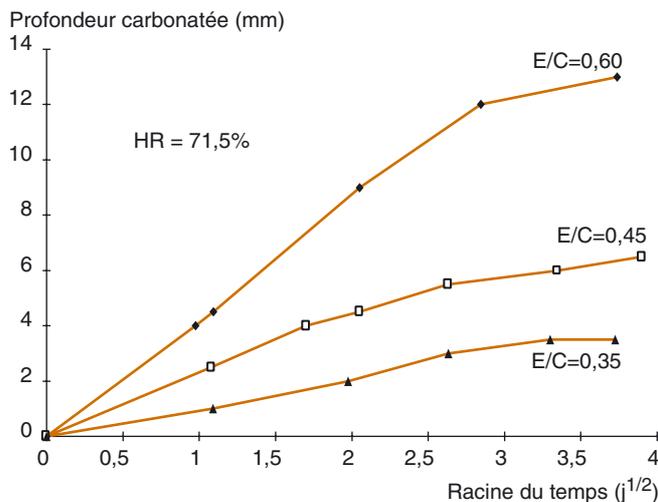
■ Fig. 5

Perte relative de masse d'eau par évaporation d'une éprouvette de béton soumise à un séchage à HR = 50 ± 5 % par une face, dès le démoulage. Comparaison des mesures effectuées par pesée, sondes capacitives et gammadensimétrie. Dans le cas des sondes capacitives, la diminution d'eau évaporable due aux réactions d'hydratation a été déduite de la diminution totale d'eau évaporable directement mesurée, sur la période 0-112 jours.





a) Test à la phénolphthaléine.



b) Cinétiques.

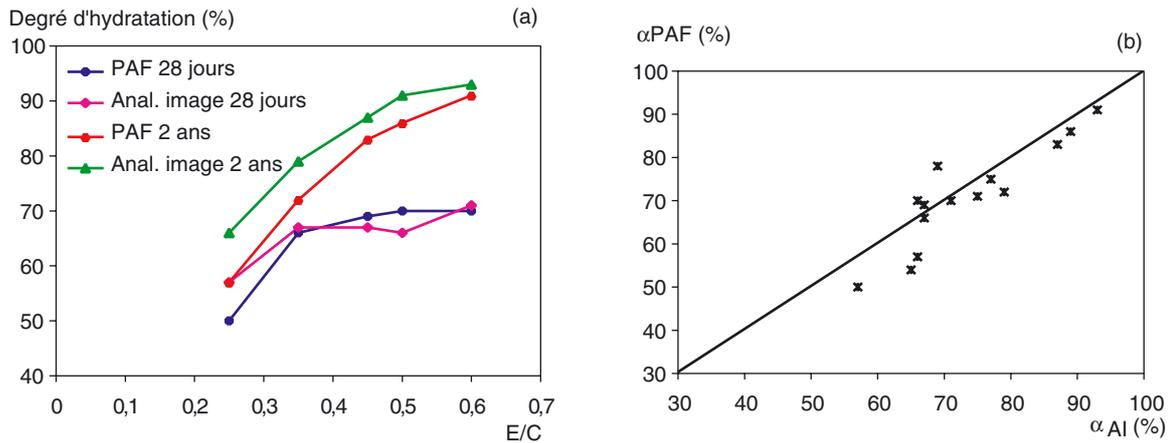
■ Fig. 6

Cinétiques de carbonatation (essai accéléré à HR = 71,5 % et à $[CO_2] = 50\%$) de pâtes de ciment de différents rapports E/C et de même ciment CEM I, obtenues à partir de la pulvérisation de phénolphthaléine à différentes échéances.

travaux réalisés ont confirmé qu'en milieu saturé le coefficient de diffusion était une fonction décroissante de la concentration en chlorures de la solution interstitielle du matériau. Les coefficients de diffusion effectifs présentant des évolutions similaires pour tous les matériaux étudiés, la décroissance du coefficient avec la concentration pouvait donc être attribuée à la solution elle-même et aux éventuelles interactions avec la matrice. Par ailleurs, une méthode a été proposée en conditions non saturées [18].

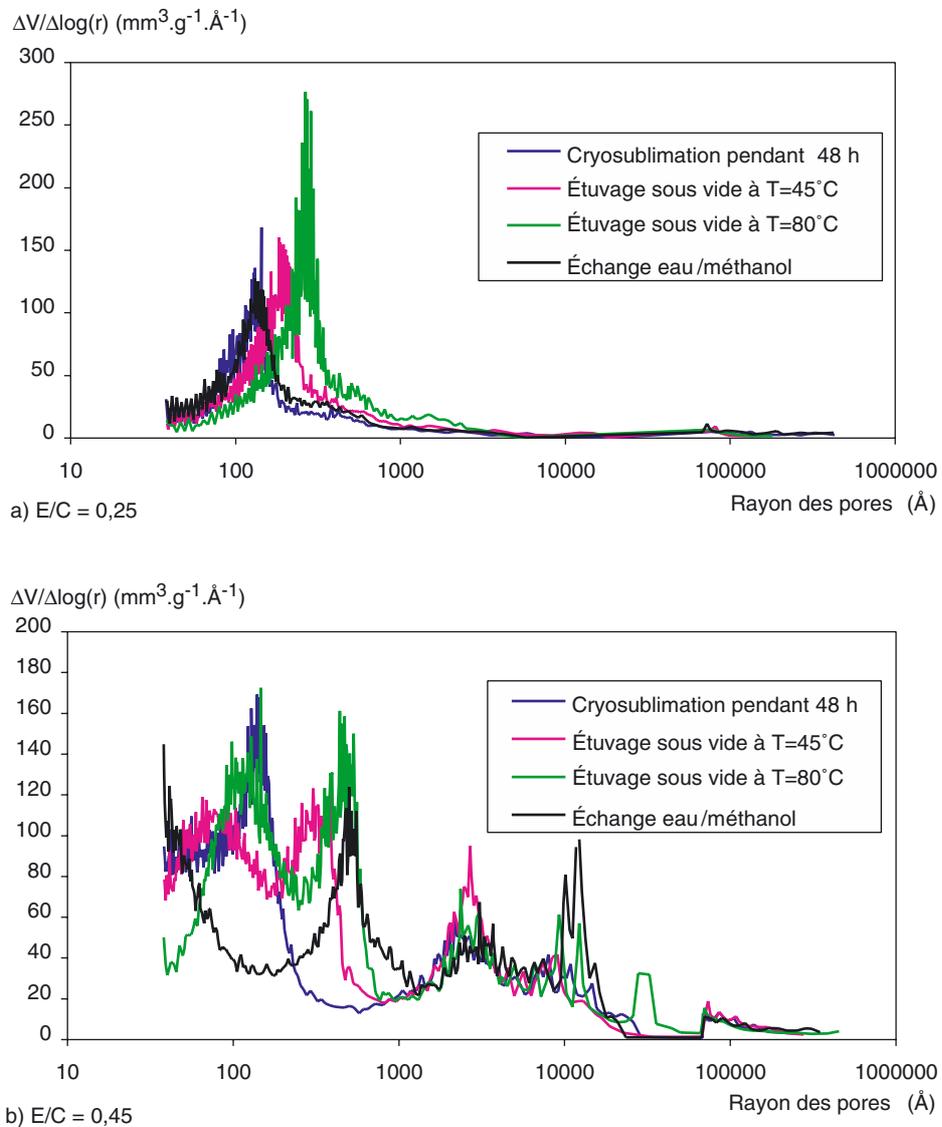
Des méthodes originales ont été développées pour la mesure des déformations libres des matériaux à base de ciment, telles que par exemple la mesure des déformations unidimensionnelles endogènes de pâtes de ciment dès le début de prise [19, 20], ou encore la mesure du retrait de dessiccation « pur » sur échantillons très minces de béton ou de pâte de ciment durcis [21].

En ce qui concerne le degré d'hydratation du ciment, paramètre fondamental régissant à la fois la résistance mécanique du béton et son « potentiel d'auto-réparation » physico-chimique (par hydratation différée), deux méthodes ont été comparées. Il s'agit de l'analyse d'images obtenues au microscope électronique à balayage et de la perte au feu, cette dernière technique présentant l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et peu coûteuse [6]. La figure 7a montre l'évolution du degré d'hydratation mesuré par chacune des deux méthodes en fonction du rapport E/C de pâtes de ciment CEM I à deux échéances. Une bonne corrélation est observée, pour ce type de ciment, entre ces deux méthodes dont les principes, les traitements des données et les coûts sont très différents (Fig. 7b). Lorsque les ciments utilisés sont plus complexes, la méthode fondée sur l'analyse d'images semble la plus appropriée, dans la mesure où celle-ci ne fait aucune hypothèse quant aux produits d'hydratation formés [22, 23].



■ Fig. 7

Comparaison des degrés d'hydratation du ciment déterminés par perte au feu (α_{PAF}) et par MEB associé au traitement d'images (α_{AI}), pour des pâtes de ciment CEM I de différents E/C et aux échéances de 28 jours et 2 ans.



■ Fig. 8

Distributions des volumes poreux d'une même pâte de ciment CEM I 52,5 âgée de 6 mois, obtenues par intrusion de mercure après différents types de prétraitement.

Enfin, il est important de rappeler que le prétraitement des échantillons est une étape préalable indispensable à la caractérisation microstructurale des matériaux cimentaires durcis. Dans le cadre du projet, différentes méthodes ont été étudiées et comparées en vue de mettre au point et/ou d'optimiser une ou plusieurs techniques de prétraitement pertinentes vis-à-vis des techniques classiques d'investigation de la structure poreuse que sont l'intrusion de mercure (pour la détermination de la porosité et de la distribution des volumes poreux) et la sorption d'azote (pour la détermination de la surface spécifique). D'une façon générale, le prétraitement doit répondre aux critères suivants, pas toujours facilement conciliables :

- faible altération de la microstructure,
- efficacité pour le séchage et l'élimination des fluides contenus dans l'espace poreux,
- rapidité,
- facilité de mise en œuvre.

Il a été constaté que, suivant le type de prétraitement appliqué (étuvage, lyophilisation/cryosublimation ou échange eau-alcool), et même pour un type de prétraitement donné, suivant le protocole appliqué, de grandes différences pouvaient être enregistrées sur les caractéristiques structurales mesurées. La figure 8 illustre le fait que, pour un même matériau (ici une pâte de ciment durcie), les résultats obtenus par intrusion de mercure sont conditionnés par le prétraitement. Les différences sont plus ou moins marquées suivant la composition du matériau. L'influence du rapport E/C est par exemple illustrée par la comparaison entre les figures 8a et 8b. Dans le cas où $E/C = 0,25$, un décalage et une réduction de l'amplitude de l'unique mode poreux sont observés. Dans le cas où $E/C = 0,45$, on constate de plus la disparition de l'un des modes poreux, lorsque l'on applique une cryosublimation pendant 48 heures.

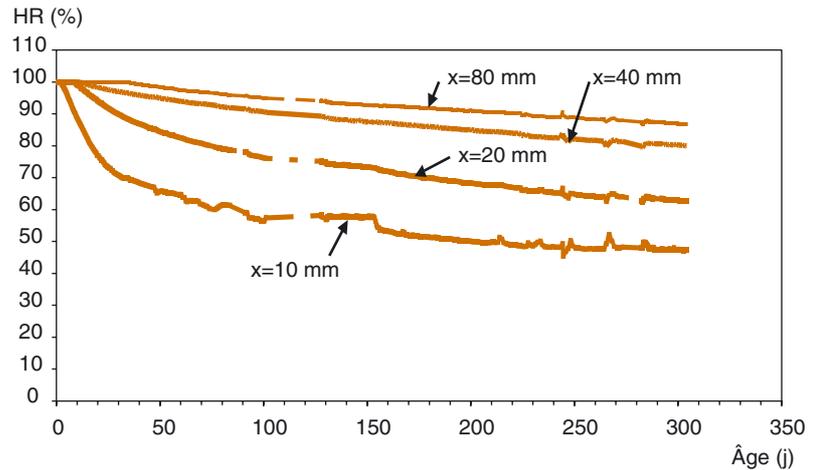
Exemples de résultats scientifiques et applications pratiques

Prise en compte des interactions physico-chimiques – Évaluation des gradients de propriétés

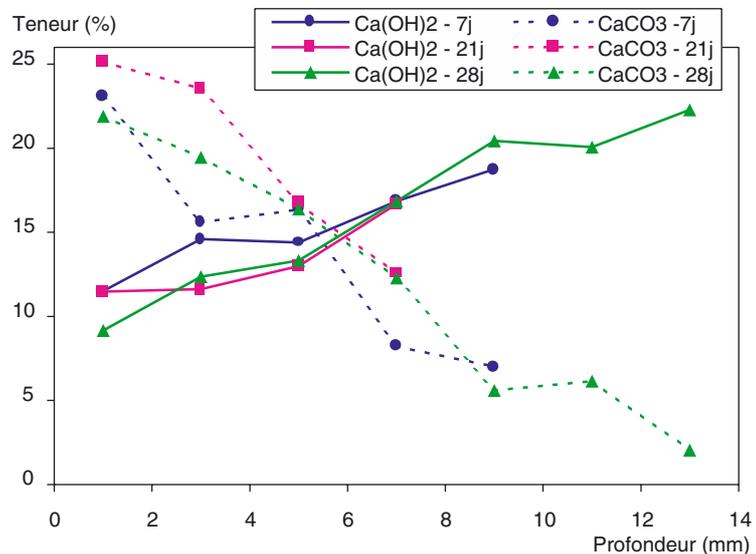
L'hydratation du ciment et le séchage du béton interviennent de façon concomitante dès le décoffrage dans la plupart des structures en béton. Une analyse précise des interactions existant entre ces deux processus a donc été réalisée. Cette démarche est indispensable pour comprendre, puis prévoir, les phénomènes observés sur les structures, en particulier les déformations différentielles des dalles en béton, ainsi que, par exemple, pour adapter de façon pertinente les conditions de cure *in situ*. Ces interactions se traduisent par l'apparition de gradients de propriétés et, en particulier, par une hydratation gênée par le séchage dans la zone proche de la surface des structures. Celles-ci ont été mises en évidence à partir de la mesure, sur éprouvettes et sur dalle, des caractéristiques microstructurales, hydriques et thermophysiques du béton en fonction de la distance à la surface exposée au séchage, ainsi que des propriétés de transfert et des déformations [10, 11]. Il a ainsi été observé, sur les courbes illustrant la diminution de l'humidité relative interne du béton en fonction du temps, une première phase résultant d'un effet combiné de l'hydratation et du séchage, et une seconde phase au cours de laquelle l'hydratation devenait très faible voire négligeable devant le séchage « pur » (Fig. 9).

En ce qui concerne les processus de carbonatation, les résultats expérimentaux de carbonatation accélérée ont mis en évidence une divergence, à partir d'une certaine durée d'essai, par rapport à la loi en racine de t communément admise pour la cinétique de carbonatation sur la base d'un mécanisme de diffusion « pure » (cf. Fig. 6). Ce comportement peut être notamment attribué à la modification de la structure poreuse dans la zone carbonatée. De plus, des analyses plus approfondies, par thermogravimétrie, ont permis de quantifier la calcite formée lors des réactions de carbonatation et de montrer qu'un profil de carbonatation existait au sein des éprouvettes (Fig. 10). La détermination des teneurs en portlandite résiduelle et en calcite formée a par ailleurs mis en évidence qu'une proportion importante (de 20 à 30 %) de la calcite formée provenait de la carbonatation de composés autres que la portlandite (les C-S-H, essentiellement). Ces observations ont été validées par d'autres méthodes d'analyse : dosage isotopique du carbone et de l'oxygène, dosage du CO_2 par volumétrie et examens par microscopie optique en lumière transmise ou par microscopie électronique à balayage [8, 24]. Ces résultats devraient permettre de développer des modèles pertinents, prenant en compte les mécanismes physico-chimiques réels et les différentes espèces chimiques impliquées, pour quantifier et prédire la cinétique et le profil de carbonatation dans les bétons.

■ **Fig. 9**
Évolution de l'humidité relative interne (HR) d'un béton ordinaire, mesurée par sondes thermohygrométriques implantées à différentes profondeurs (x) dans une dalle de dimensions 1 x 1 x 0,16 m exposée à un séchage à $HR = 50 \pm 5 \%$ par sa face supérieure dès le coulage.

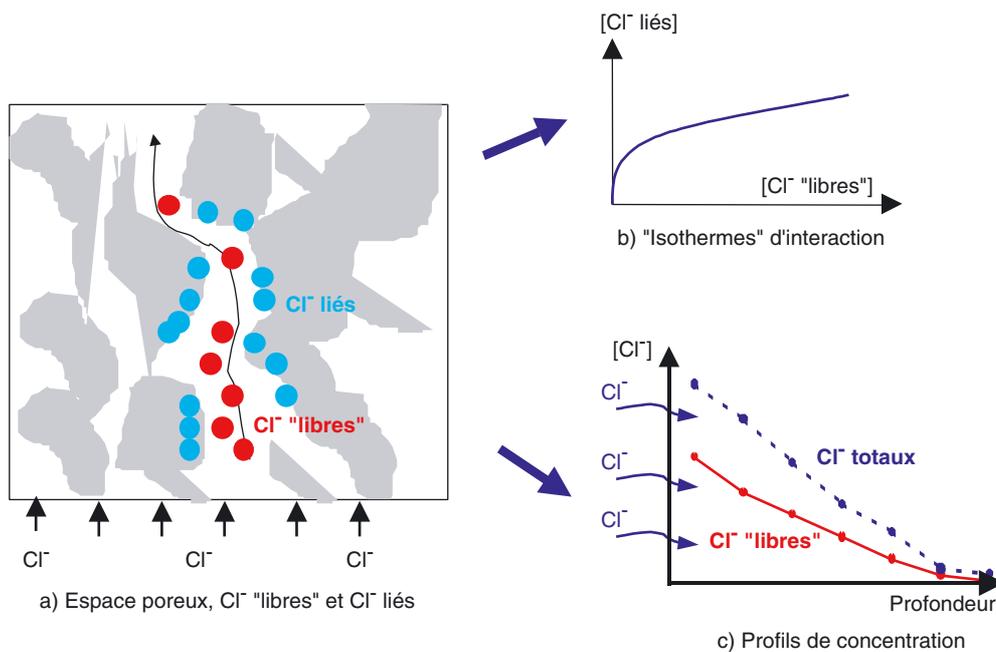


■ **Fig. 10**
Profils de teneur en portlandite $Ca(OH)_2$ résiduelle et en calcite $CaCO_3$ formée, obtenus par thermogravimétrie dans une éprouvette de pâte de ciment de rapport E/C = 0,45, à différentes échéances au cours d'un essai de carbonatation accélérée.



Les interactions physico-chimiques entre les ions chlorure et la matrice cimentaire (schématisées sur la figure 11a) dépendent de la composition chimique de la solution en contact avec le matériau et de celle de la matrice. Ces interactions sont à prendre en considération, dans la détermination (expérimentale) du coefficient de diffusion (suivant la méthode choisie), ainsi que dans la modélisation de la pénétration des chlorures dans le béton. Des méthodes ont été proposées pour quantifier ces interactions, par la détermination expérimentale d'« isothermes » d'interaction au moyen d'un essai d'immersion (Fig. 11b) [16, 25], ou par la comparaison entre les concentrations en chlorures totaux et en chlorures « libres » (solubles dans l'eau) mesurées par dosage à l'issue d'un essai de diffusion en régime non stationnaire (Fig. 11c) [14]. Les résultats obtenus ont confirmé que le processus de fixation des ions sur la matrice était fortement non linéaire [26]. Des investigations ont en outre été menées relativement :

- à l'influence de la teneur en C_3A sur la quantité de chlorures piégés sous forme de chloroaluminates de calcium [25, 27] ;
- à l'influence de la présence des différents ions sur les réactions d'hydratation du ciment ;
- aux modifications de la microstructure du béton engendrées par la présence de NaCl (structure poreuse, nature et quantité des composés formés).



■ Fig. 11

Schématisation des interactions chlorures-matrice dans le béton et de leur quantification.

Approche en conditions non saturées – Analyse des transferts couplés

On imagine aisément l'intérêt d'une approche en conditions non saturées [28] en constatant qu'*in situ* la plupart des structures sont soumises à des processus de transfert multiphasiques. À titre d'exemple, les agents agressifs pour le béton armé (gaz carbonique, ions chlorure, etc.) pénètrent le plus souvent dans le béton alors que ce dernier est en cours de séchage ou subit des cycles d'humidification-séchage.

Dans un premier temps, il apparaissait donc essentiel de résoudre correctement le problème des transferts d'humidité dans les bétons et d'être en mesure de prédire correctement le processus de séchage. À cette fin, une modélisation à l'échelle macroscopique des transferts hydriques isothermes a été réalisée sur la base d'une approche thermodynamique des transferts de masse dans les milieux poreux continus [29]. Ces travaux ont fourni des conclusions majeures pour l'analyse des transferts d'humidité, illustrant l'intérêt des modèles explicatifs. Ainsi, l'existence de surpressions de gaz au cours du séchage d'un matériau faiblement perméable implique que l'hypothèse couramment admise de constance de la pression n'est pas valide. Il est donc nécessaire d'effectuer l'analyse et la modélisation des transferts d'humidité à pression non constante pour parvenir à rendre compte correctement des cinétiques observées expérimentalement. Il en a résulté un éclairage nouveau sur l'importance relative des différents modes de transport de l'humidité au cours du séchage d'un matériau peu perméable. Seuls les mouvements d'humidité sous forme liquide selon la loi de Darcy contribuent dans ce cas significativement aux transferts, à moyen et long terme [30]. Pour ces matériaux, un modèle simplifié a donc pu être élaboré.

L'approche en conditions non saturées a ensuite été appliquée au cas de la pénétration des chlorures [29, 31]. Un modèle macroscopique de transfert couplé d'eau liquide et de sel a ainsi été développé [26, 32]. Les résultats numériques ont été comparés à l'expérience pour des cycles d'imbibition-séchage. Cela a permis de tirer des conclusions importantes d'un point de vue pratique. Ainsi, par exemple, il a pu être constaté que le phénomène de convection était plus rapide et plus préjudiciable que la diffusion : l'humidification d'un matériau sec avec une solution saline durant une journée pouvait faire pénétrer les chlorures plus profondément que ne le feraient plusieurs mois de diffusion en milieu saturé (Fig. 12). D'autre part, l'influence de la présence de chlorure de sodium (NaCl) sur les propriétés hydriques d'équilibre du matériau, telles que les isothermes de sorption de vapeur d'eau [33], et sur la cinétique de séchage [34], a également été quantifiée. À une température donnée, du fait de la diminution de l'humidité relative régnant dans la phase gazeuse située au-dessus d'une solution dont la concentration en sel augmente, on enregistre une modification des isothermes de

sorption de vapeur d'eau. Cela est illustré sur la figure 13 pour un mortier, en fonction de la teneur en NaCl introduit préalablement par imbibition. Ce phénomène a également pu être modélisé (cf. Fig. 13). Le coefficient de décalage des isothermes en fonction de la concentration en sel a ainsi été déterminé [33]. La figure 14 montre l'influence de la présence de NaCl sur le profil hydrique,

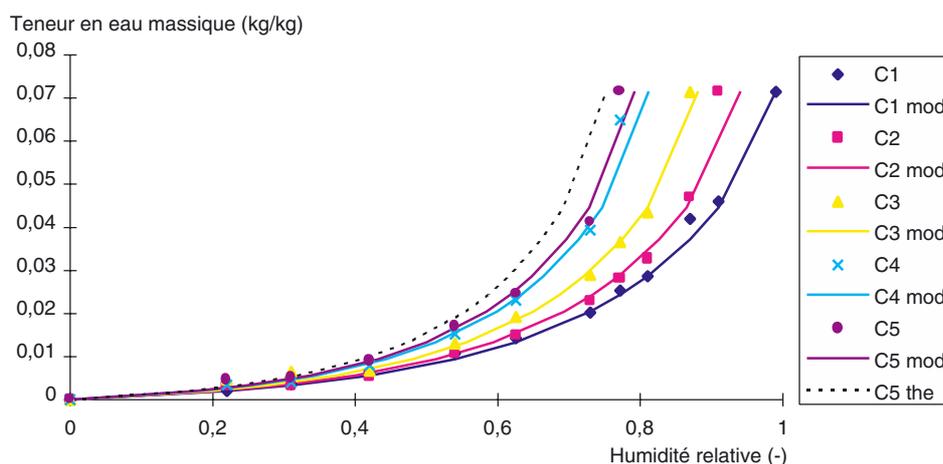
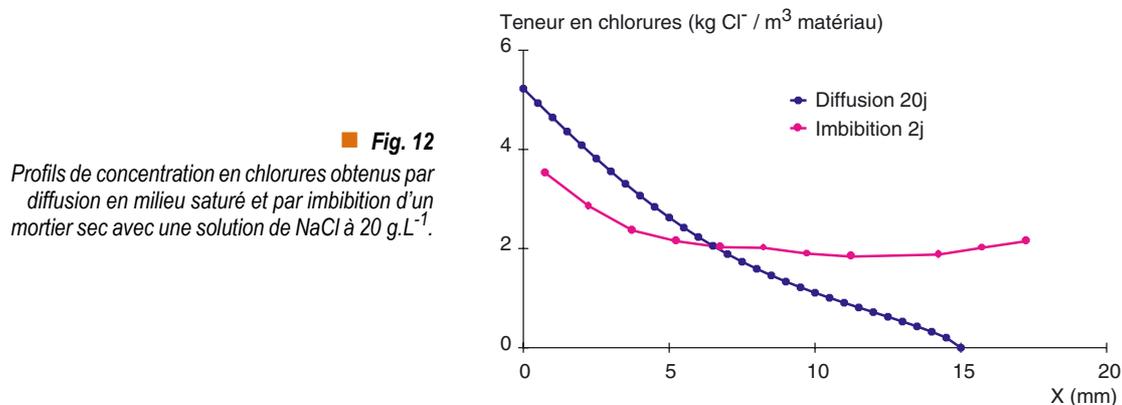
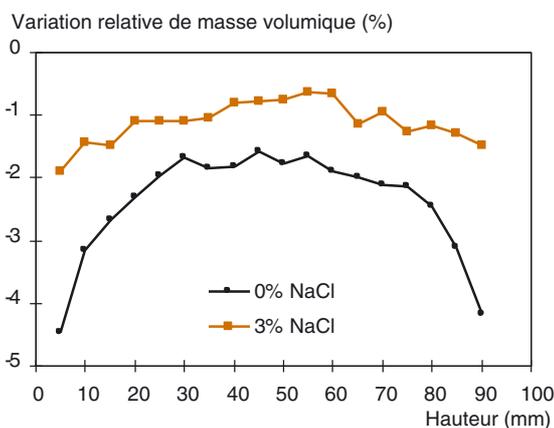


Fig. 13
 Isothermes d'adsorption de vapeur d'eau d'un mortier, modélisées et expérimentales, en fonction de la teneur initiale en NaCl (C1 = 0, C2 = 20, C3 = 80, C4 = 160 et C5 = 314 g.L⁻¹).

Fig. 14
 Profils hydriques obtenus par gammadensimétrie, après exposition à HR = 53,5 ± 5 % et à T = 20 ± 2 °C pendant deux ans, d'une pâte de ciment durcie gâchée avec E/C = 0,35 et 0 ou 3 % NaCl par unité de masse de ciment. (Les deux faces planes des éprouvettes cylindriques sont exposées au séchage, le pourtour étant protégé des échanges hydriques par deux feuilles superposées d'aluminium autocollant).



obtenu par gammadensimétrie, d'une éprouvette cylindrique de pâte de ciment durcie de rapport $E/C = 0,35$, soumise à un séchage par ses deux faces planes. La figure 14 illustre clairement que cette influence n'est pas négligeable et que, par conséquent, le « couplage » humidité-sel (ou eau-ions) doit être pris en compte dans la modélisation des transferts d'humidité, y compris pour les matériaux à faible E/C (et donc faiblement perméables), lorsque des sels sont initialement présents.

Évaluation des propriétés de transfert – Sélection d'indicateurs de durabilité

Une application originale et intéressante sur le plan pratique des travaux théoriques évoqués dans la section précédente peut être citée ici. Il s'agit de la mise au point d'une méthode simple, mais indirecte de détermination de la perméabilité à l'eau liquide, combinant modèle et expérience, pour les matériaux cimentaires faiblement perméables. Ce paramètre est obtenu à partir du suivi de la perte relative de masse d'une éprouvette soumise à un séchage à humidité relative contrôlée et du modèle simplifié de transport d'humidité élaboré, moyennant la connaissance de la porosité et de l'isotherme de désorption de vapeur d'eau du matériau (Fig. 15) [35]. Il devient ainsi possible d'accéder à la perméabilité à l'eau pour bon nombre de formules de béton et, en particulier, pour les BHP, pour lesquels la mesure directe de cet indicateur de durabilité est très difficile.

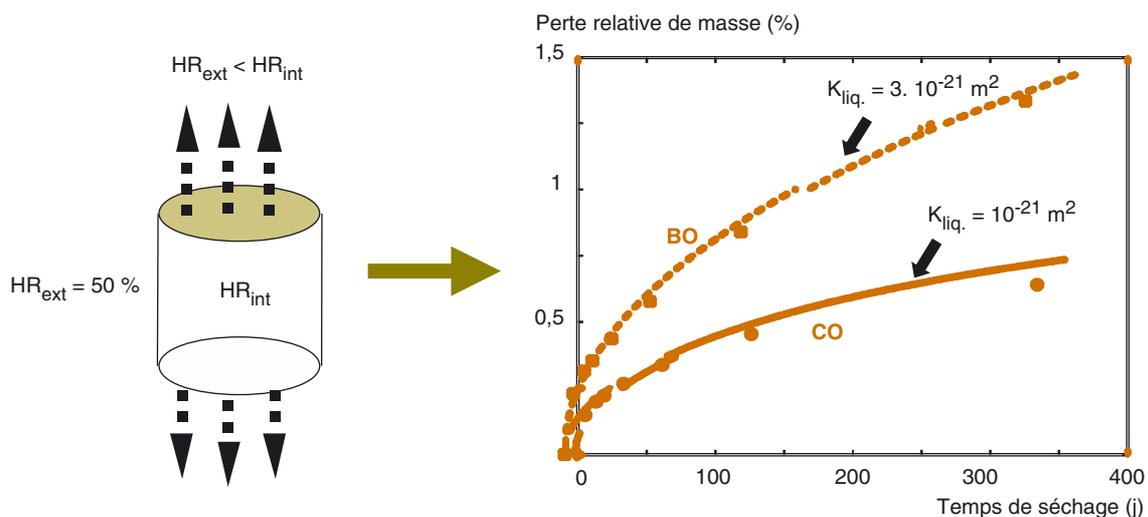
Le degré de saturation jouant un rôle fondamental vis-à-vis des propriétés de transfert, l'évolution de ces propriétés en fonction du degré de saturation (ou de l'humidité relative) a été étudiée, comme illustré sur les figures 16a et 16b pour la perméabilité intrinsèque aux gaz, respectivement d'un béton ordinaire BO et d'un béton à hautes performances BH [36]. Les courbes de la figure 16, qui peuvent être approchées par des courbes logarithmiques, ont été obtenues en combinant deux modes opératoires :

- le mode opératoire AFPC-AFREM [37], où les mesures de perméabilité sont réalisées à des échéances imposées au cours d'un processus d'étuvage ;
- un mode opératoire où les mesures sont effectuées après séchage à différents paliers d'humidité relative imposée.

Ces courbes constituent elles aussi des données très utiles pour la modélisation des transferts dans les bétons.

Par ailleurs, les coefficients de diffusion hydrique de pâtes de ciment durcies, mesurés par différentes méthodes (désorption de vapeur d'eau, diffusion d'eau tritiée, RMN, « coupelle ») [4, 38] ont été comparés. En raison :

- de la complexité des mécanismes physico-chimiques mis en jeu dans les expériences les plus simples à réaliser ;
- ou, inversement, de la difficulté de mise en œuvre d'expériences n'activant qu'un seul mécanisme ;

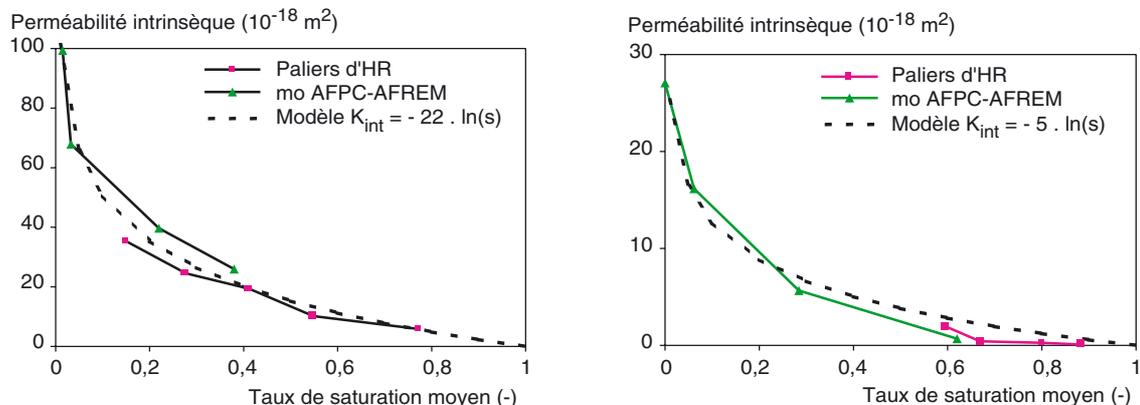


■ Fig. 15

Illustration, pour un béton ordinaire (BO) et une pâte de ciment (CO), de la méthode d'évaluation de la perméabilité à l'eau liquide (K_{liq}), combinant modèle et expérience.

➤ de l'écart important constaté au niveau des résultats fournis par les différentes techniques, justement du fait de la différence de mécanismes mis en jeu ;

il a été conclu qu'un tel paramètre, bien qu'utile dans de nombreux cas de figures, ne pouvait être considéré comme un indicateur de durabilité général.



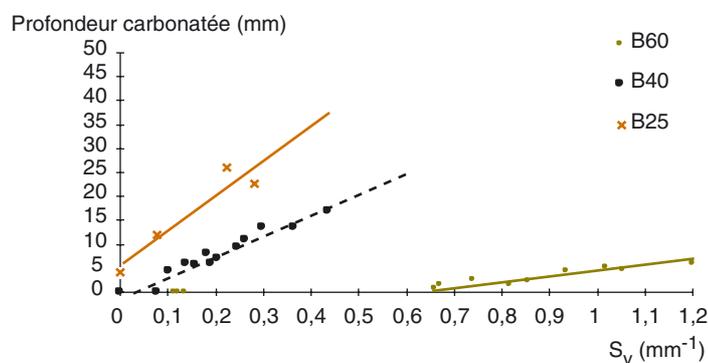
■ Fig. 16

Évolution de la perméabilité intrinsèque aux gaz (K_{int}) en fonction du taux de saturation moyen (s) de l'éprouvette.

Influence des paramètres de formulation – Effets de seuil

Différentes méthodes d'analyse ont été utilisées sur une large gamme de pâtes de ciment durcies, afin de caractériser complètement leur microstructure. Les résultats obtenus pour le degré d'hydratation, la structure poreuse, la morphologie des hydrates formés et la répartition des éléments Ca et Si ont notamment mis en évidence une valeur seuil pour le rapport E/C [39].

Par ailleurs, l'influence de la microfissuration sur la profondeur carbonatée a été analysée sur des bétons durcis de résistances variables (B25, B40 et B60) [2]. Préalablement microfissurés par des traitements spécifiques, ces bétons ont été soumis à un essai de carbonatation accélérée. La figure 17 montre l'évolution de la profondeur carbonatée en fonction de la surface spécifique de microfissuration. Pour les bétons B25, la microfissuration superficielle a peu d'influence sur la profondeur carbonatée, compte tenu de la forte porosité initiale de ce type de matériau. Pour les bétons B60, un seuil de densité de microfissures a été mis en évidence, en dessous duquel les bétons ne se carbonatent pas. Au-delà de ce seuil, les vides créés par la microfissuration peuvent avoir une influence significative sur la progression de la carbonatation.



■ Fig. 17

Évolution de la profondeur carbonatée de différents types de béton en fonction de la surface spécifique de microfissuration (S_v), après trois mois d'essai accéléré.

POURSUITES ENGAGÉES ET ORIENTATIONS FUTURES

De nouveaux besoins ont été identifiés et de nouvelles orientations ont pu être définies, relativement aux recherches sur la durabilité des bétons, pour les années à venir, sur la base des nombreux résultats issus du thème de recherche « Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages ».

Les travaux menés au cours de ce projet s'appuyaient notamment sur les méthodes développées et les résultats obtenus dans le cadre d'une précédente recherche menée au LCPC [40]. Ces travaux ont à leur tour constitué les bases scientifiques de projets lancés depuis, par exemple :

- par le LCPC, dans le cadre des opérations de recherche du réseau des LPC, en particulier de l'opération « *Durabilité du béton armé et de ses constituants : maîtrise et approche performantielle* » ;
- par l'Association Française de Génie Civil (AFGC), en particulier pour l'élaboration du document « *État de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité* », dans le cadre du groupe de travail AFGC « *Indicateurs de durabilité* » [41].

Les recherches réalisées par le LCPC dans le cadre du thème de recherche ont également permis d'enrichir les travaux de groupes internationaux, tels que par exemple les Comités RILEM « *Testing and Modelling Chloride Ingress into Concrete* » (TC-178-TMC) ou « *Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems* » (TC-181-EAS).

D'un point de vue pratique, ce projet a en particulier permis de dresser le canevas de stratégies qui pourraient être proposées aux maîtres d'œuvre.

Évaluation et prédiction de la durabilité des matériaux nouveaux

C'est grâce à une durabilité nettement améliorée que les bétons à hautes performances, les bétons autoplaçants (BAP), et même les *nouveaux* bétons tels que les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) ou encore les bétons aux polymères, par exemple, sont susceptibles de trouver une place de choix dans le monde du génie civil et du bâtiment.

Revenons par exemple sur le cas des BAP. Ces bétons ont vu le jour au Japon dans les années 80, afin d'être utilisés dans des structures à réseau d'armatures très dense. Ces matériaux se caractérisent par une grande aptitude à l'écoulement et par une bonne résistance à la ségrégation. Ils ne nécessitent donc pas de vibration lors de leur mise en place. Ils peuvent ainsi de surcroît permettre de réduire la durée des phases de coulage, les nuisances sonores et le coût des chantiers de construction. Cependant, la formulation particulière de ces bétons nécessite par exemple d'adapter les procédures de cure (en particulier leur durée), afin de garantir une évolution satisfaisante des propriétés au cours du temps et donc une bonne durabilité. Dans cet objectif, il semble nécessaire de mener des études de durabilité spécifiques, en adoptant une approche similaire à celle du thème de recherche décrit ici.

En ce qui concerne les BFUP, ceux-ci soulèvent également des problèmes de durabilité spécifiques (corrosion des fibres, etc.). Ils nécessitent en outre le développement de méthodes d'essais particulières, du fait notamment de leur très forte compacité, afin de quantifier les paramètres (tels que les *indicateurs de durabilité*) nécessaires à l'élaboration et à la mise en œuvre de modèles prédictifs.

Enfin, rappelons que, de nos jours, les exigences de durabilité pour le matériau et la structure entrent dans une approche globale qui inclue également des critères économiques (coûts de construction, d'entretien et de réparation), sociaux (impact sur le cadre de vie de l'esthétique, en particulier de l'aspect des parements, de la réduction des périodes de travaux de construction et de réparation, etc.) et environnementaux (insertion de l'ouvrage et préservation des sites naturels, recyclage des matériaux, utilisation de sous-produits industriels). Il convient donc de chercher à concevoir des formules de béton (parfois qualifiées de bétons « verts ») permettant d'optimiser ces critères, et de vérifier précautionneusement leur durabilité.

Le même raisonnement serait en outre applicable pour des matériaux non cimentaires.

L'évaluation et la prédiction de la durabilité des matériaux nouveaux constituent donc une suite logique aux travaux réalisés dans le cadre du thème de recherche.

Prédiction de la durabilité des ouvrages neufs

Sur la base des travaux menés dans le cadre du thème de recherche, l'aspect *durabilité des ouvrages neufs* constitue la prochaine étape à franchir en vue de la mise en pratique effective d'une approche performantielle pour la maîtrise et l'évaluation quantitative de la durabilité, fondée sur des paramètres objectifs et fondamentaux (les *indicateurs de durabilité*). Bien que ce travail soit déjà engagé, il reste encore à développer ou à valider en conditions réelles, suivant les cas, des modèles de prédiction de la durée de vie des ouvrages. Outre le passage du matériau à la structure, toujours difficile à négocier, cette étape nécessite de disposer de données récoltées *in situ*. L'étude expérimentale sur sites de vieillissement initiée dans le cadre du Projet National BHP 2000 (quatre sites différents et quinze formulations de béton) répond toutefois déjà au moins partiellement à cet objectif [42].

D'autre part, des mécanismes restent à élucider ou au moins à préciser dans l'optique d'une prise en compte dans les modèles, par exemple, de l'accroissement et de l'accélération des dégradations constatés sous cycles climatiques réels (humidification-séchage, variations de température, variations de concentration en sels, etc.), ou encore de la (micro)fissuration. Cette démarche nécessite d'avoir recours à des mesures fines et donc à des équipements sophistiqués, pour aller plus loin dans l'explication des phénomènes. De plus, il est nécessaire de continuer à développer l'approche multiphasique initiée, afin de bâtir des modèles susceptibles de rendre compte du comportement réel du matériau et des structures, soumis par exemple à des transferts couplés d'eau, de chlorures et de gaz carbonique.

En parallèle, des outils opérationnels simples (incluant par exemple des méthodologies de formulation et d'essai) pourraient être développés à l'intention du praticien, sur la base des résultats déjà disponibles et de l'expérience acquise dans le cadre du thème de recherche et du groupe de travail AFGC « *Indicateurs de durabilité* ».

Gestion optimisée et prédiction de la durée de vie résiduelle des ouvrages existants

La conservation du patrimoine étant désormais au centre des préoccupations de notre société, l'évaluation de l'état des ouvrages existants et la prédiction de leur durée de vie résiduelle revêt une importance particulière. Ce champ est plus difficile à couvrir que celui des ouvrages neufs car l'état de référence des ouvrages à étudier fait souvent défaut. On dispose en outre à l'heure actuelle de peu de méthodes d'auscultation non destructives praticables *in situ* sur les parements des ouvrages et fournissant des données utilisables pour prévoir la durabilité relative aux processus de transfert. Pour le réseau des LPC, on ne peut guère citer que les mesures de « perméabilité » de surface par la sonde BT-CRIS, de résistivité du béton d'enrobage et de « teneur en eau » de surface par sondes capacitatives, qui présentent en outre encore des faiblesses. Il est donc indispensable que des efforts soient désormais portés dans cette direction. Ce travail pourrait être associé aux recherches menées sur la protection et la réparation des structures en béton (matériaux composites de réparation à matrice organique, bétons fibrés projetés, traitements électrochimiques, etc.).

Partenariats et ouverture européenne

Ce thème de recherche a montré tout l'intérêt du développement des partenariats à la fois avec le milieu universitaire et les laboratoires privés. Il reste toutefois à élargir les collaborations avec des partenaires européens dans un projet futur. En ce qui concerne « l'exportation » à l'étranger de la démarche française, il est certain que la France est susceptible de jouer un rôle moteur, notamment dans le cadre de la normalisation. Il apparaît en effet opportun de profiter de la prochaine révision de la norme européenne « béton » EN 206 pour introduire dans cette dernière l'approche développée sur la base des travaux de ce thème de recherche et dans le cadre du groupe de travail AFGC « *Indicateurs de durabilité* », ainsi que les résultats de ces recherches. Des éléments quantitatifs en termes de durabilité (spécifications et critères performantiels [41]) pourraient à cette échéance être inclus dans le texte de norme.

Remerciements. Les résultats scientifiques décrits dans cet article sont le fruit de la collaboration de nombreux chercheurs. Les auteurs tiennent à remercier ici tous les participants du thème de recherche « Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages » pour leur contribution et leur motivation tout au long du projet.

Le projet ayant reçu le soutien de la mission Génie civil de la DRAST du ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, les auteurs remercient également Messieurs J. Laravoire et B. Halphen, pour l'intérêt constant qu'ils ont porté à ce travail et pour leur confiance.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BAROGHEL-BOUNY V., AMMOUCHE A., HORNAIN H., Matrices cimentaires. Analyse de la microstructure et propriétés de transfert, Numéro spécial, Transferts dans les bétons et durabilité, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, 2-3 (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Hermès Science Publications, Paris, 2001, pp. 149-177.
- [2] CASTEL A., ARLIGUIE G., CHAUSSADENT T., BAROGHEL-BOUNY V., La microfissuration superficielle a-t-elle une influence sur la profondeur de carbonatation des bétons ? Numéro spécial, Transferts dans les bétons et durabilité, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, 2-3 (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Hermès Science Publications, Paris, 2001, pp. 231-248.
- [3] Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages – Évaluation expérimentale des paramètres déterminants, *Journées « Durabilité »*, 8-9 mars 2000, CETE du Sud-Ouest, Bordeaux, France (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Collection Actes des Journées Scientifiques du LCPC, 2001, 163 pages.
- [4] Séminaire Scientifique « Transferts 2000 » de clôture du Thème de Recherche OA9 « Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages », 6-7 avril 2000, Grande Arche de la Défense, Paris, France (sous la direction de V. Baroghel-Bouny, LCPC), 2000, 206 pages.
- [5] Transferts dans les bétons et durabilité, Numéro spécial, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, 2-3 (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Hermès Science Publications, Paris, 2001, 396 pages.
- [6] BAROGHEL-BOUNY V., CHAUSSADENT T., CROQUETTE G., DIVET L., GAWSEWITCH J., GODIN J., HENRY D., PLATRET G., VILLAIN G., *Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons – Méthodes de mesure et d'essais de laboratoire*, Techniques et Méthodes des LPC, Méthodes d'essai 58 LCPC, Paris, 2002, 88 pages.
- [7] TONNOIR B., Influence des paramètres environnementaux sur la carbonatation du béton. Bilan d'une étude sur 48 ouvrages de l'A21, *Journées « Durabilité »*, 8-9 mars 2000, CETE du Sud-Ouest, Bordeaux, France (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Collection Actes des Journées Scientifiques du LCPC, 2001, pp. 145-152.
- [8] RAFAÏ N., HORNAIN H., VILLAIN G., BAROGHEL-BOUNY V., PLATRET G., CHAUSSADENT T., Comparaison et validité des méthodes de mesure de la carbonatation, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 6, 2, 2002, pp. 251-274.
- [9] GODIN J., PITHON M., Évaluation des gradients de teneur en eau dans un béton par gammadensimétrie et par sondes capacitives, *Journées « Durabilité »*, 8-9 mars 2000, CETE du Sud-Ouest, Bordeaux, France (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Collection Actes des Journées Scientifiques du LCPC, 2001, pp. 91-97.
- [10] KHELIDJ A., BASTIAN G., BAROGHEL-BOUNY V., GODIN J., Séchage d'une dalle en béton. Etude expérimentale des gradients induits, Numéro spécial, Transferts dans les bétons et durabilité, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, 2-3 (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Hermès Science Publications, Paris, 2001, pp. 285-305.
- [11] KHELIDJ A., BAROGHEL-BOUNY V., BASTIAN G., GODIN J., VILLAIN G., *Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages. Détermination expérimentale des gradients résultant d'une interaction hydratation-séchage dans une dalle en béton*, Études et Recherches des LPC, Série Ouvrages d'Art, OA 39, LCPC, Paris, 2002, 83 pages.
- [12] CHAUSSADENT T., BAROGHEL-BOUNY V., PLATRET G., RAFAÏ N., HORNAIN H., AMMOUCHE A., *Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages. Paramètres utiles pour l'étude de la carbonatation : influence du rapport E/C sur les propriétés microstructurales des pâtes de ciment durcies*, Rapport de synthèse LCPC/LERM (Thème de Recherche OA9 – Sujet n° 2 – Programme 2.1), juin 1999, 33 pages.
- [13] OUNOUGH K., CHAUSSADENT T., BAROGHEL-BOUNY V., GAWSEWITCH J., CROQUETTE G., *Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages. Influence du rapport eau/ciment, du type de ciment et de la microstructure sur la carbonatation des bétons*, Rapport de synthèse LRPC Bordeaux/LCPC/LREP (Thème de Recherche OA9 – Sujet n° 2 – Programme 2.2), janvier 2000, 32 p. + annexes.

- [14] HENRY D., BAROGHEL-BOUNY V., CHAUSSADENT T., Détermination des profils de pénétration et de la diffusivité apparente des ions chlorure dans les bétons en régime non stationnaire, *Journées « Durabilité »*, 8-9 mars 2000, Bordeaux, France (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Collection Actes des Journées Scientifiques du LCPC, **2001**, pp. 47-55.
- [15] RAHARINAIVO A., BAROGHEL-BOUNY V., OLIVIER G., CROQUETTE G., Détermination de la diffusivité des ions chlorure par migration sous champ électrique en régime stationnaire. Exemple d'application dans le cadre du Projet National BHP 2000, *Journées « Durabilité »*, 8-9 mars 2000, Bordeaux, France (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Collection Actes des Journées Scientifiques du LCPC, **2001**, pp. 57-63.
- [16] BAROGHEL-BOUNY V., CARÉ S., RICHEL C., LOVERA P., FRANÇOIS R., FRANCY O., *Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages. Transfert des chlorures en milieu saturé*, Rapport de synthèse LCPC/CEA/LMDC (Thème de Recherche OA9 – Sujet n° 3 – Programme 3.1), janvier **2000**, 49 pages.
- [17] FRANÇOIS R., FRANCY O., CARÉ S., BAROGHEL-BOUNY V., LOVERA P., RICHEL C., Mesure du coefficient de diffusion des chlorures. Comparaison entre régime permanent et régime transitoire, Numéro spécial, *Transferts dans les bétons et durabilité*, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, **2-3** (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Hermès Science Publications, Paris, **2001**, pp. 309-329.
- [18] DAÏAN J.F., MADJOUJ N., Diffusion de sels dans les matériaux humides. Analyse des processus couplés et étude expérimentale, Numéro spécial, *Transferts dans les bétons et durabilité*, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, **2-3** (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Hermès Science Publications, Paris, **2001**, pp. 331-335.
- [19] KHEIRBEK A., BAROGHEL-BOUNY V., DUVAL R., Mesure des déformations endogènes des pâtes de ciment, *Journées « Durabilité »*, 8-9 mars 2000, CETE du Sud-Ouest, Bordeaux, France (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Collection Actes des Journées Scientifiques du LCPC, **2001**, pp. 81-90.
- [20] KHEIRBEK A., *Influence des paramètres de formulation sur les retraits endogène et de dessiccation de la pâte de ciment*, Thèse de doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, novembre **1999**, 143 pages.
- [21] BAROGHEL-BOUNY V., GODIN J., Mesure du retrait de dessiccation des pâtes de ciment et des bétons durcis, *Journées « Durabilité »*, 8-9 mars 2000, CETE du Sud-Ouest, Bordeaux, France (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Collection Actes des Journées Scientifiques du LCPC, **2001**, pp. 107-116.
- [22] AMMOUCHE A., RAFAÏ N., HORNAIN H., CHAUSSADENT T., PLATRET G., BAROGHEL-BOUNY V., Comparaison de différentes méthodes de mesure du degré d'hydratation de pâtes de ciment Portland durcies, Numéro spécial, *Transferts dans les bétons et durabilité*, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, **2-3** (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Hermès Science Publications, Paris, **2001**, pp. 149-177.
- [23] CHAUSSADENT T., DAVY J.-P., DIVET L., MASSIEU E., PLATRET G., Suivi de l'hydratation de différents ciments par trois méthodes (perte au feu, analyse thermique et microscopie), *Journées « Durabilité »*, 8-9 mars 2000, CETE du Sud-Ouest, Bordeaux, France (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Collection Actes des Journées Scientifiques du LCPC, **2001**, pp. 73-80.
- [24] RAFAÏ N., HORNAIN H., VILLAIN G., BAROGHEL-BOUNY V., PLATRET G., CHAUSSADENT T., *Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages. Mesures comparatives du taux de carbonatation de pâtes, mortiers et bétons*, Rapport de synthèse LERM/LCPC (Thème de Recherche OA9 – Sujet n° 2 – Programme 2.1), mars **2001**, 54 pages.
- [25] CHAUSSADENT T., BAROGHEL-BOUNY V., CARÉ S., PERRIN B., BONNET S., FRANÇOIS R., FRANCY O., *Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages. Analyse des interactions physico-chimiques entre les chlorures et le béton*, Rapport de synthèse LCPC/LETHEM/LMDC (Thème de Recherche OA9 – Sujet n° 3 – Programme 3.1), janvier **2000**, 41 pages.
- [26] FRANCY O., *Modélisation de la pénétration des ions chlorures dans les mortiers partiellement saturés en eau*, Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, Toulouse, décembre **1998**, 171 pages.
- [27] CHAUSSADENT T., Limitation de la pénétration des chlorures par les aluminates du ciment, *Journées « Durabilité »*, 8-9 mars 2000, CETE du Sud-Ouest, Bordeaux, France (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Collection Actes des Journées Scientifiques du LCPC, **2001**, pp. 31-35.
- [28] BAROGHEL-BOUNY V., COUSSY O., DAÏAN J.-F., *Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages. Transport couplé d'humidité et de chlorures en milieu non saturé. I. Éléments pour l'étude et la modélisation des transports d'humidité et de solutés*, Rapport de synthèse LCPC/LTHE (Thème de Recherche OA9 - Sujet n° 3 – Programme 3.1), mars **2000**, 14 pages.
- [29] MAINGUY M., *Modèles de diffusion non linéaires en milieux poreux. Application à la dissolution et au séchage des matériaux cimentaires*, Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris, septembre **1999**, 255 pages.
- [30] MAINGUY M., COUSSY O., EYMARD R., *Modélisation des transferts hydriques isothermes en milieu poreux. Application au séchage des matériaux à base de ciment*, Études et recherches des LPC, Série Ouvrages d'Art, **OA 32**, LCPC, **1999**, 130 pages.
- [31] DAÏAN J.-F., *Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages. Transport couplé d'humidité et de chlorures en milieu non saturé. II. Données expérimentales et analyse des phénomènes de diffusion de chlorures*, Rapport de synthèse LTHE (Thème de Recherche OA9 – Sujet n° 3 – Programme 3.1), mars **2000**, 35 pages.
- [32] FRANCY O., FRANÇOIS R., BONNET S., PERRIN B., *Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages. Transport couplé d'humidité et de chlorures en milieu non saturé. III - Données expérimentales et analyse des phé-*

nomènes d'imbibition et de séchage, Rapport de synthèse LMDC/LETHEM (Thème de Recherche OA9 – Sujet n° 3 – Programme 3.1), mars 2000, 30 pages.

- [33] BONNET S., *Influence du chlore sur le comportement à l'équilibre et sur les propriétés de transfert des matériaux du génie civil*, Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, décembre 1997, 252 pages.
- [34] BAROGHEL-BOUNY V., CHAUSSADENT T., RAHARINAIVO A., Étude expérimentale des effets couplés des transferts d'humidité et d'ions chlorures dans le béton jeune, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 206, novembre-décembre 1996, pp. 75-83.
- [35] COUSSY O., BAROGHEL-BOUNY V., DANGLA P., MAINGUY M., Évaluation de la perméabilité à l'eau liquide des bétons à partir de leur perte de masse durant le séchage, Numéro spécial, Transferts dans les bétons et durabilité, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, 2-3 (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Hermès Science Publications, Paris, 2001, pp. 269-284.
- [36] VILLAIN G., BAROGHEL-BOUNY V., KOUNKOU C., HUA C., Mesure de la perméabilité aux gaz en fonction du taux de saturation des bétons, Numéro spécial, Transferts dans les bétons et durabilité, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, 2-3 (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Hermès Science Publications, Paris, 2001, pp. 251-268.
- [37] Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, *Compte-rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM « Durabilité des Bétons »*, 11-12 décembre 1997, Toulouse, France (LMDC, Toulouse, 1998).
- [38] DAÏAN J.-F., *Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages. Coefficients de transfert : application des modèles et comparaison avec les mesures*, Rapport de synthèse LTHE (Thème de Recherche OA9 – Sujet n° 1 – Programme 1.1), décembre 1999, 31 pages.
- [39] CHAUSSADENT T., BAROGHEL-BOUNY V., RAFAÏ N., AMMOUCHE A., HORNAIN H., Influence du rapport E/C sur l'hydratation, la microstructure et les déformations endogènes de pâtes de ciment durcies, Numéro spécial, Transferts dans les bétons et durabilité, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, 2-3 (sous la direction de V. Baroghel-Bouny), Hermès Science Publications, Paris, 2001, pp. 217-230.
- [40] BAROGHEL-BOUNY V., *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, Analyse, Interprétations*, LCPC, Paris, 1994, 468 pages.
- [41] BAROGHEL-BOUNY V. et al., *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction – État de l'art et guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité*, Documents scientifiques et techniques de l'Association Française de Génie Civil, AFGC, 2004, 251 pages.
- [42] BAROGHEL-BOUNY V., GAWSEVITCH J., OUNOUGH K., ARNAUD S., OLIVIER G., BELIN P., Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI^e siècle. IV. Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 249, 2004 (à paraître).