

# Séchage du béton: analyse et modélisation

R. MENSI

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis BP 37, Belvédère, Tunis, Tunisie

P. ACKER, A. ATTOLOU

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 58 boulevard Lefebvre, 75015 Paris, France

*Le séchage naturel du béton est un phénomène très lent qui a des conséquences importantes sur son comportement physique et mécanique et plus particulièrement sur deux aspects spécifiques de ce matériau: les déformations différées (retrait, fluage) et sa durabilité (fissuration superficielle, pénétration d'agents agressifs). En plus de la modification des caractéristiques mécaniques et physiques locales qui résultent des variations de teneur en eau, la non-uniformité de ce paramètre au cours du temps induit un effet de structure particulièrement important (effet d'échelle pour le retrait et le fluage de dessiccation, et fissuration de retrait). A partir de l'analyse physique des mécanismes qui régissent les mouvements d'eau dans le matériau, on a développé un modèle de diffusion non-linéaire qui a été validé, grâce à la détermination expérimentale des distributions spatiales de teneur en eau, et de leur évolution au cours du temps, par la méthode de densimétrie par absorption des rayons gamma, au moyen d'un banc gamma rotatif. Le modèle ainsi validé permet d'une part d'extrapoler, dans certaines limites, les résultats expérimentaux, et d'autre part, il aide à exploiter et interpréter les essais de retrait et de fluage.*

## 1. IMPORTANCE DU SECHAGE NATUREL

Le béton est un matériau qui a une structure complexe. Divers processus influent sur lui: chimiques, tels que l'hydratation du ciment, et physiques, tels que les échanges thermique et hydrique. Ce dernier, qui a trait à l'évolution de la teneur en eau et de sa répartition dans un élément de béton, est d'une importance telle qu'il peut influencer beaucoup sur les caractéristiques mécaniques du béton.

En effet, dans les bétons courants, pour des raisons de maniabilité et de facilité de mise en place, on met lors de la fabrication, beaucoup plus d'eau qu'il n'en faut pour assurer la réaction d'hydratation du ciment. Cette réaction nécessite en réalité de 20 à 30% du poids de ciment alors que pour un béton normal d'ouvrage d'art, par exemple, on en met presque le double (rapport eau/ciment = 0,45).

De ce fait, dès son jeune âge, le béton se trouve en général en déséquilibre hygrométrique avec le milieu extérieur à cause du surplus d'eau contenu dans ses pores. Or le rétablissement de l'équilibre prend un temps très long [1,2] et influence beaucoup le comportement mécanique du béton [3,4].

Ce séchage entraîne des effets mécaniques très importants, effets qui peuvent être considérés comme résultant de champs de déformation imposés, et peuvent se traiter comme en thermo-élasticité. Mais, alors que le régime thermique courant d'un ouvrage d'art en service est de type cyclique, son état hygrométrique relève, sauf exception, du régime transitoire, du fait de la durée du séchage dans des conditions courantes.

La différence d'état hygrométrique entre l'intérieur d'un élément de béton qui reste longtemps saturé et sa périphérie qui sèche plus vite se traduit dans le cas du fluage, à partir d'une distribution initiale homogène, par une redistribution des contraintes entre la surface et l'intérieur et des effets complexes dus aux variations hygrométriques [5].

Cette contribution à l'étude du séchage du béton comprend quatre parties:

- (i) une étude théorique des migrations d'eau dans les matériaux poreux en général et dans le béton en particulier;
- (ii) la méthode de calcul utilisée et le programme BIDIF relatif à la diffusion de l'eau;
- (iii) une étude expérimentale;
- (iv) les résultats, leur interprétation et discussion.

## 2. ETUDE THEORIQUE

Le béton est un matériau poreux et cette porosité est généralement supérieure à 10%. Les pores forment des réseaux de vides plus ou moins compliqués qui ont une influence directe sur les phénomènes thermique et hydrique du béton.

### 2.1 Phénomènes de transport hydrique dans les matériaux poreux

Un matériaux poreux est composé d'au moins trois phases:

- (i) la matrice solide contenant les pores.

- (ii) le liquide qui est essentiellement de l'eau.
- (iii) la phase gazeuse qui est un mélange d'air et de vapeur d'eau.

Les pores ont des formes très accidentées et des dimensions très variables. Au moyen des mesures d'absorption sous vide de différents gaz [6], on obtient des distributions bimodales qui s'étendent de quelques Angströms au micromètre (Fig. 1). Traditionnellement on distinguait les pores ouverts, les pores en cul de sac et les pores 'fermés'. Mais cette représentation n'est pas pertinente, car un pore fermé communique toujours avec des pores d'un ordre de grandeur inférieur. Seul le concept d'*objet fractal* permet de représenter correctement la porosité des bétons. Ainsi Vandamme a obtenu des dimensions fractales comprises entre 2,90 et 2,97 selon le dosage initial en eau [7].

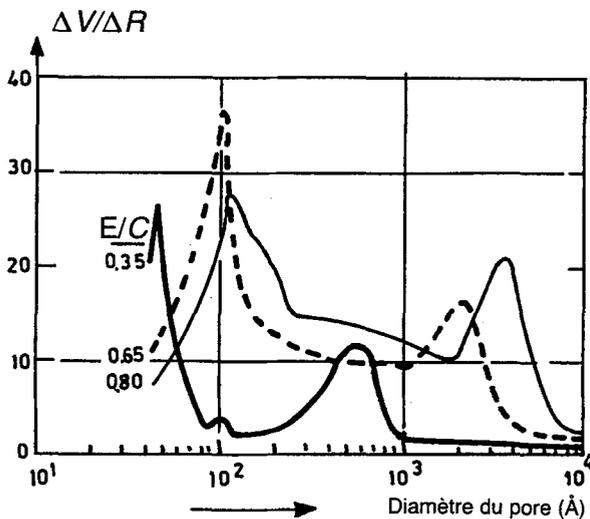


Fig. 1 Courbes de distribution de la porosité pour des pâtes de ciment à divers E/C (0,35; 0,65; 0,80) obtenues par Verbeck et Helmuth [6] au porosimètre à mercure; l'ordonnée représente la dérivée de la courbe  $V(R)$  (où  $V$  est le volume de mercure introduit, et  $R$  le rayon minimum des pores pénétrés par le mercure).  $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$ .

Dans des conditions normales de température et de pression, on distingue [8,9]:

- (i) la diffusion en phase gazeuse, qui est possible pratiquement dans tous les domaines de pores;
- (ii) l'écoulement laminaire, dans les macropores seulement;
- (iii) le transport de Knudsen, essentiellement dans les micropores.

Un transport d'humidité s'effectue normalement sous l'impulsion:

- (i) de forces internes: forces de sorption et forces de ménisques;
- (ii) de forces extérieures: celles-ci sont appliquées soit mécaniquement soit thermiquement par l'extérieur sur le corps poreux.

Le séchage du matériau conduit à l'élimination partielle ou totale de l'humidité non combinée imprégnant les corps humides. Le phénomène de base de cette opération est que l'humidité qui arrive à la surface du corps se vaporise et se diffuse dans l'environnement.

Pendant toute la durée de cette évaporation, et donc de la perte en humidité du corps, il y a transfert d'humidité de l'intérieur du solide vers sa surface, du fait de l'existence d'un gradient de concentration  $C$ .

## 2.2 Application des lois de transport d'humidité au béton

Soit un corps de volume ( $\Omega$ ) limité par une surface ( $S$ ). Pendant un intervalle de temps  $dt$ , la conservation de la matière se traduit par:

Variation de la masse d'humidité dans le corps ( $\Omega$ )	=	Masse d'humidité sortant à travers la surface ( $S$ )	+	Masse d'humidité entrant dans l'hydratation du ciment
---	---	---	---	---

$$\iiint_{(\Omega)} \frac{-\partial C}{\partial t} d\Omega dt = \iint_{(S)} -D(C) (\text{grad } C) n dS dt + \iiint_{(\Omega)} P d\Omega dt$$

où  $D(C)$  est le coefficient de conduction de l'humidité et  $n$  est la normale à la surface  $S$ .

$P$  caractérise la loi d'hydratation du ciment; c'est une fonction du temps et des coordonnées du point où l'on se situe dans le béton:  $P(x, y, z, t)$ .

En utilisant le théorème d'Ostrogradski, le bilan devient

$$\iiint_{(\Omega)} \frac{-\partial C}{\partial t} d\Omega dt = \iiint_{(\Omega)} \{ \text{div}[-D(C) \text{grad } C] + P \} d\Omega dt$$

Sous forme locale, l'équation de transport s'écrit

$$\text{div}[-D(C) \text{grad } C] + P = -\frac{\partial C}{\partial t}$$

En fait, la loi d'hydratation dépend de la teneur en humidité, paramètre qu'il nous faut déterminer [10,11]. Du fait que le ciment est hydraté en grande partie dès les premiers jours de sa confection, on peut considérer, dans une première approche, que  $P$  est nul. On obtient, dès lors, une équation aux dérivées partielles de type parabolique et analogue à l'équation de transfert de chaleur (loi de Fourier):

$$\text{div} [D(C) \text{grad } C] = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Cette hypothèse simplificatrice n'est plus valable, bien sûr, si l'on s'intéresse au cas du béton très jeune.

### 2.2.1 Le coefficient de conduction de l'humidité

La complexité des phénomènes de transport et l'analyse des résultats expérimentaux a conduit Von Klopfer [12] à proposer un *coefficient de conduction* de l'humidité dépendant de la concentration sous forme exponentielle:

$$D(C) = \frac{\log \alpha}{\alpha - 1} \bar{D} \exp \left( \frac{C - C_1}{C_2 - C_1} \log \alpha \right)$$

où  $C_1$  et  $C_2$  sont les concentrations initiale et finale,  $\alpha = D_2/D_1$  avec  $D_1 = D(C_1)$  et  $D_2 = D(C_2)$ , et  $\alpha$  caractérise l'intensité de la variation du coefficient  $D(C)$ .  $\bar{D}$  est le coefficient de diffusion moyen:

$$\bar{D} = \frac{\alpha - 1}{\log \alpha} D_1 = \frac{\alpha - 1}{\alpha \log \alpha} D_2$$

### 2.2.2 Les conditions au contour

Lors du séchage des pièces de béton, il y a un échange d'humidité à l'état de vapeur entre le corps poreux et l'environnement. La condition au contour est déterminée sur la face en contact avec l'environnement par deux paramètres:

(a) la différence de concentration  $C_{D_0} - C_{D_\infty}$  entre la surface du corps et l'air environnant, et

(b) le coefficient de transfert  $\beta$  à la surface du corps.

Ce coefficient  $\beta$  fait intervenir la forme du corps, l'état de rugosité de sa surface ainsi que la vitesse de l'air dans l'environnement. Il est généralement déterminé par voie expérimentale.

La condition aux limites traduit, en fait, la continuité des flux massiques à la surface du corps:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Flux d'humidité à travers} \\ \text{la surface du corps} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Flux de vapeur transférée} \\ \text{à l'air environnant} \end{array} \right)$$

$$-D(C) \text{ grad } C = \beta (C_{D_0} - C_{D_\infty})$$

En introduisant la concentration de vapeur saturante  $C_{D_s}$  on a

$$-D(C) \text{ grad } C = \beta \cdot C_{D_s} \left( \frac{C_{D_0}}{C_{D_s}} - \frac{C_{D_\infty}}{C_{D_s}} \right)$$

où  $C_{D_0}/C_{D_s}$ , notée  $\psi(C_0)$ , est l'humidité relative au voisinage immédiat de la surface du corps et  $C_{D_\infty}/C_{D_s}$ , notée  $\psi_\infty$ , est l'humidité relative de l'air environnant, d'où la condition au contour:

$$-D(C) \text{ grad } C = \beta C_{D_s} [\psi(C_0) - \psi_\infty]$$

Notons toutefois que certaines discontinuités des conditions ambiantes imposées à la surface peuvent entraîner des écarts de température. Dans ce cas, il sera utile de prendre en compte les pressions de vapeur saturante.

## 3. CALCUL

On a à résoudre l'équation aux dérivées partielles, équation non linéaire du fait de la dépendance du

coefficient de diffusion  $D$  avec la variable, inconnue du problème

$$\text{div} [D(C) \text{ grad } C] = \frac{\partial C}{\partial t}$$

### 3.1 Hypothèses et modèle

Etant donné qu'il n'est pas possible de trouver une solution mathématique exacte à cette équation, on a été obligé de chercher une résolution numérique par la méthode des éléments finis (MEF) en utilisant un programme de calcul mis au point par la section des modèles numériques du LCPC.

BIDIF (ou BI-dimensionnel DIFfusion) est un programme de calcul par la méthode des éléments finis des problèmes de diffusion plane ou à symétrie de révolution, en régime permanent ou transitoire [13]. Il utilise des triangles linéaires à trois noeuds.

Du fait de la complexité du problème qu'on traite, nous avons été conduits à adopter les hypothèses suivantes [14]:

1. Calcul du cas bidimensionnel:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D_x(C) \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y(C) \frac{\partial C}{\partial y} \right) = \frac{\partial C}{\partial t}$$

2. On suppose que le béton est isotrope:

$$D_x = D_y = D$$

3. On assimile la vapeur d'eau qui passe de la surface du corps à l'environnement à un gaz parfait.

4. La condition d'échange adoptée est

$$-D(C) \text{ grad } C = h(C) (C - C_e)$$

où  $h(C)$  est le coefficient d'échange surfacique et  $C_e$  est la concentration d'équilibre.

### 3.2 Données du calcul

Teneur en eau initiale dans le béton:	$C = 145 \text{ kg m}^{-3}$
Température ambiante de séchage:	$T_\infty = 20^\circ\text{C}$
Hygrométrie relative de l'ambiance:	$\psi_\infty = 50\%$
Coefficient de transfert de chaleur (pour une atmosphère calme):	$\alpha = 3,14 \text{ kcal m}^{-2} \text{ h}^{-1} (\text{°C})^{-1}$
Coefficient de transfert de masse:	$\beta = 12,56 \text{ m h}^{-1}$
Concentration de vapeur saturante (à une température de $20^\circ\text{C}$ ):	$C_{D_s} = 0,0173 \text{ kg m}^{-3}$
Concentration d'équilibre (d'après l'isotherme de désorption du béton utilisé):	$C_e = 51 \text{ kg m}^{-3}$

Coefficient de conduction  
de l'humidité:

$$D(C) = 1,042 \times 10^{-13} \exp(0,05 C) \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Coefficient d'échange:

$$h(C) = 3,356 \times 10^{-9} (239 - C) \text{ m s}^{-1}$$

## 4. ETUDE EXPERIMENTALE

L'étude expérimentale a pour objectif de valider le modèle proposé et, le cas échéant, de calibrer certains paramètres mal définis. Il s'agit donc de suivre l'évolution dans le temps de la teneur en eau et de sa répartition à l'intérieur d'éprouvettes en béton par la méthode de gammadensimétrie [15].

### 4.1 Préparation des essais

#### 4.1.1 Caractéristiques des éprouvettes

On a pris en compte deux facteurs:

1. Le facteur porosité, en utilisant deux types de béton:

(i) un béton courant d'ouvrage d'art (noté *D*), dosé à  $400 \text{ kg m}^{-3}$  de ciment et de rapport  $E/C = 0,45$ ; de porosité 13,6% (déterminée par absorption d'eau sous vide selon la norme NF P18-554, 1979) et de résistance 55 MPa (résistance moyenne à la compression à 28 jours).

(ii) un béton poreux (noté *P*) dosé à  $300 \text{ kg m}^{-3}$  de ciment, de rapport  $E/C = 0,58$ ; exempt de fines de sable, de porosité 15,5% et de résistance 38 MPa.

2. Le facteur dimension, en utilisant des éprouvettes cylindriques de diamètres 11, 16 et 21 cm.

#### 4.1.2 Préparation des éprouvettes

Avant de commencer les essais, les éprouvettes de béton, (des cylindres  $\Phi 16 \text{ cm} \times 32 \text{ cm}$ ) ont subi deux opérations:

(i) le sciage qui a consisté à ramener les hauteurs des cylindres à 15 cm afin d'optimiser le temps et la précision des mesures;

(ii) l'enduction de résine, en badigeonnant les deux faces sciées de l'éprouvette dans le but d'avoir un séchage uniquement radial.

### 4.2 Principe de la mesure

Le banc gamma rotatif permet des mesures non destructives présentant une grande précision [16]. La méthode de mesure utilisée est basée sur l'absorption d'un faisceau étroit de photons gamma d'énergie donnée et d'intensité  $I_0$ . Les photons émis par la source radioactive traversent le matériau sans être diffusés ni absorbés:

$$I = I_0 \exp(-\mu' \gamma x)$$

où  $\gamma$  = masse volumique du matériau et  $x$  son épaisseur, et  $\mu'$  = coefficient d'absorption massique qui dépend de l'énergie du rayonnement gamma et de la composition chimique du matériau.

### 4.3 Réalisation des essais

Dans nos mesures, on doit déterminer la densité en fonction du rayon des éprouvettes cylindriques à ausculter. Le faisceau de rayons gamma (Figs 2 à 4) doit donc balayer successivement des couronnes concentriques de l'éprouvette. Le faisceau étant fixe, le

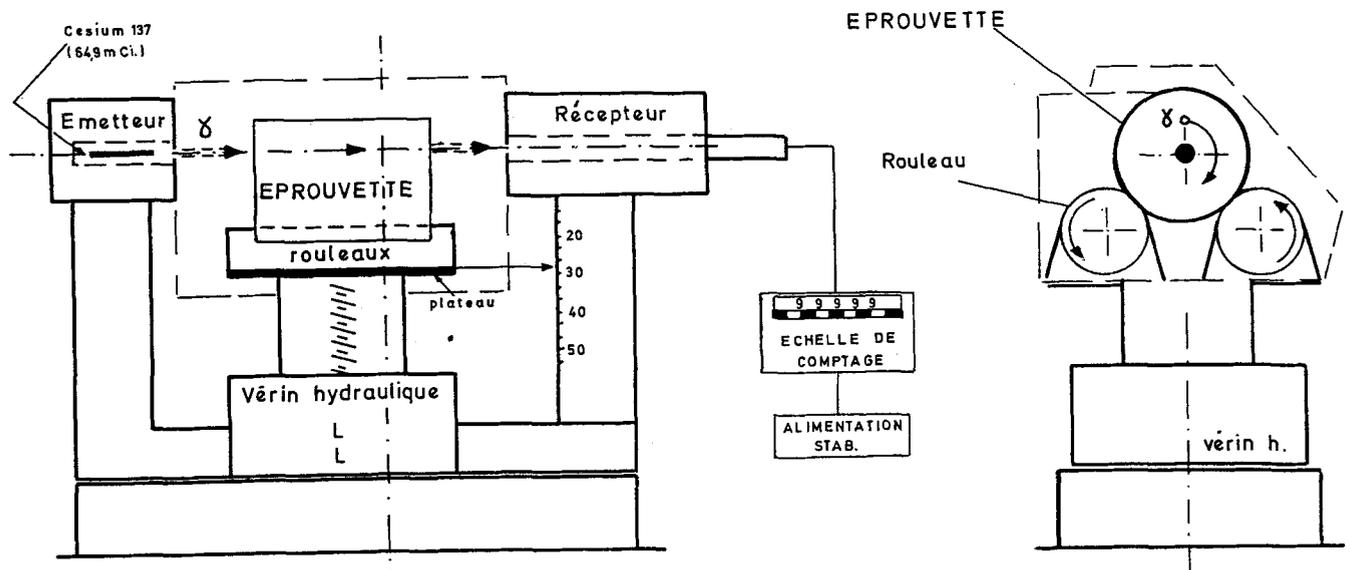


Fig. 2 Gammadensimètre à béton: schéma de principe.

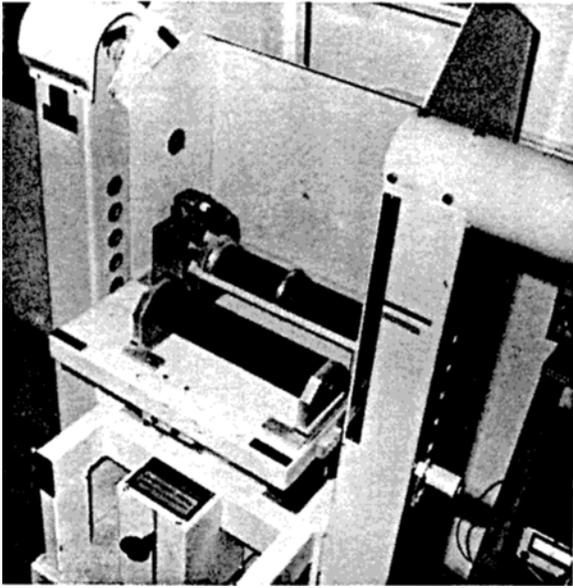


Fig. 3 Vue générale du banc gamma en position ouverte.

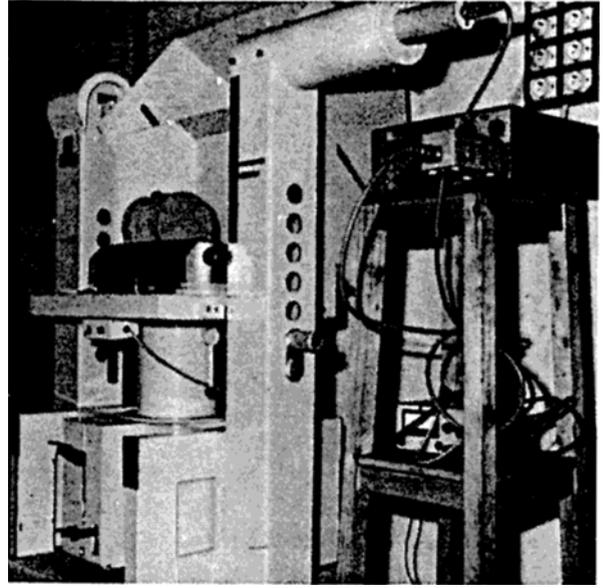


Fig. 4 Vue du banc gamma avec éprouvette normalisée en place (mesures courantes).

balayage se fait par rotation de l'éprouvette grâce à deux cylindres sur lesquels l'éprouvette est posée. Les radiations traversant l'échantillon sont transformées en impulsions électriques qui sont affichées sur une chaîne électronique. On fait alors deux lectures:  $N_0$  à vide et  $N$  pour chaque couronne auscultée, et la valeur de la densité est donnée par

$$\gamma = -\frac{1}{\mu'x} \text{Log} \left( \frac{N}{N_0} \right)$$

## 5. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION

### 5.1 Les résultats expérimentaux

Les Figs 5 à 12 donnent, pour différentes durées de séchage, la répartition de la perte en poids le long d'un rayon de l'éprouvette. Les parties en tireté correspondent aux zones carbonatées, mises en évidence, après fendage, par un réactif coloré.

Ces résultats mettent clairement en évidence la lenteur du phénomène, puisqu'en deux mois le séchage n'affecte sensiblement qu'une zone superficielle de l'ordre de deux centimètres de profondeur. Ils montrent également une influence marquée de la taille de l'éprouvette, ainsi que de la porosité du matériau.

Enfin il nous a paru intéressant de vérifier si l'on retrouvait avec nos résultats expérimentaux la dépendance, classique dans les phénomènes de diffusion, entre la dimension et la racine carrée du temps (Fig. 13).

### 5.2 Les résultats du calcul

Le maillage adopté pour le calcul représente un quart de la section de l'éprouvette (maillage destiné à être

réutilisé avec d'autres conditions aux limites, sans étanchéité par exemple).

Les longueurs des côtés des mailles sont en progression géométrique de pas égal à 0,8 de l'axe de révolution ( $Oy$ ) vers la périphérie et de l'extrémité (face badigeonnée) vers le centre de l'éprouvette.

Les résultats expérimentaux et numériques ont été reportés sur un graphique à la même échelle. On voit ainsi que les courbes théoriques se trouvent en bonne concordance avec les courbes expérimentales.

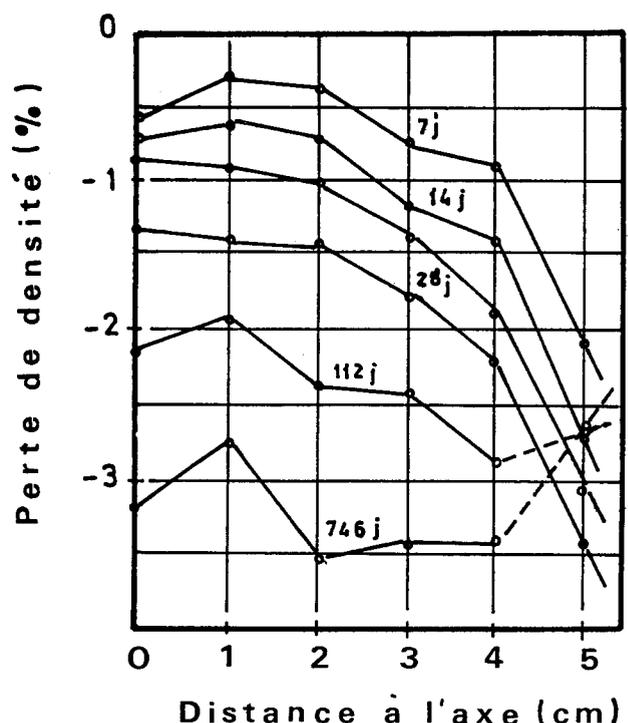


Fig. 5 Evolution dans le temps et distribution de la teneur en eau pour une éprouvette en béton poreux de diamètre 11 cm.

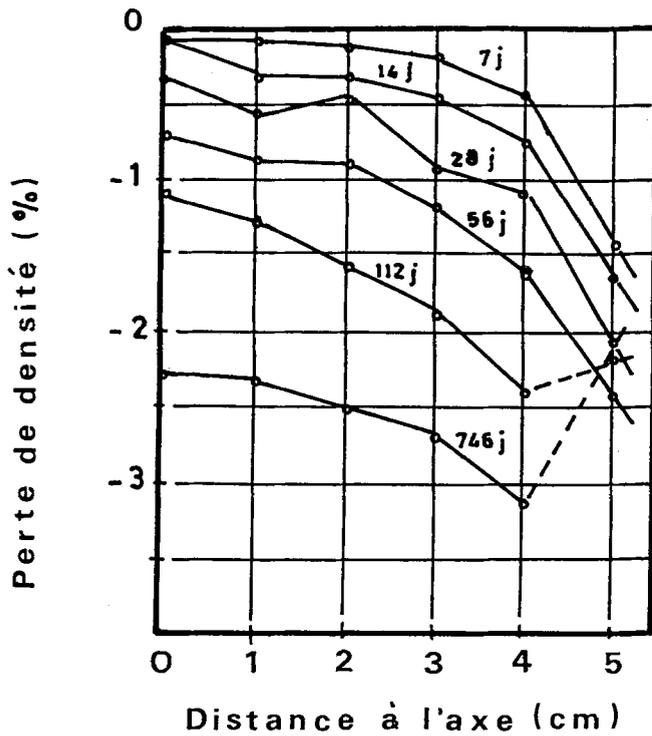


Fig. 6 Evolution dans le temps et distribution de la teneur en eau pour une éprouvette en béton normal de diamètre 11 cm.

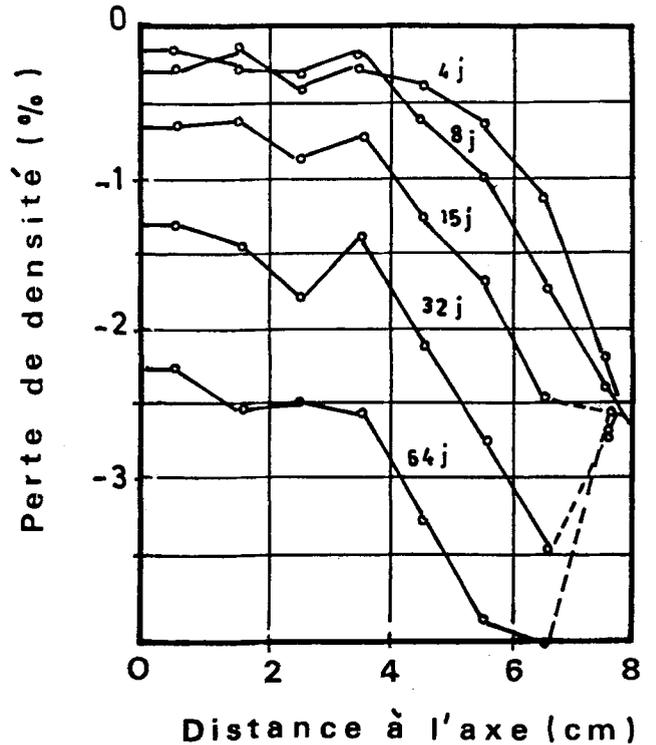


Fig. 7 Evolution dans le temps et distribution de la teneur en eau pour une éprouvette en béton poreux de diamètre 16 cm.

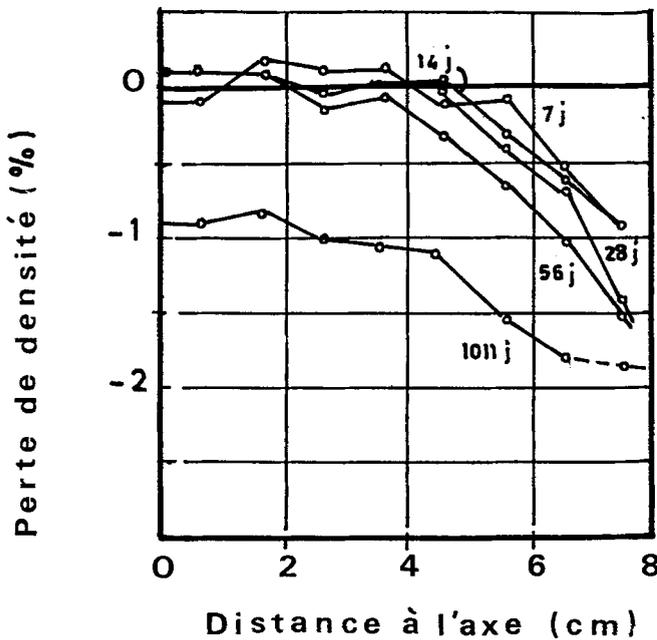


Fig. 8 Evolution dans le temps et distribution de la teneur en eau pour une éprouvette en béton normal de diamètre 16 cm.

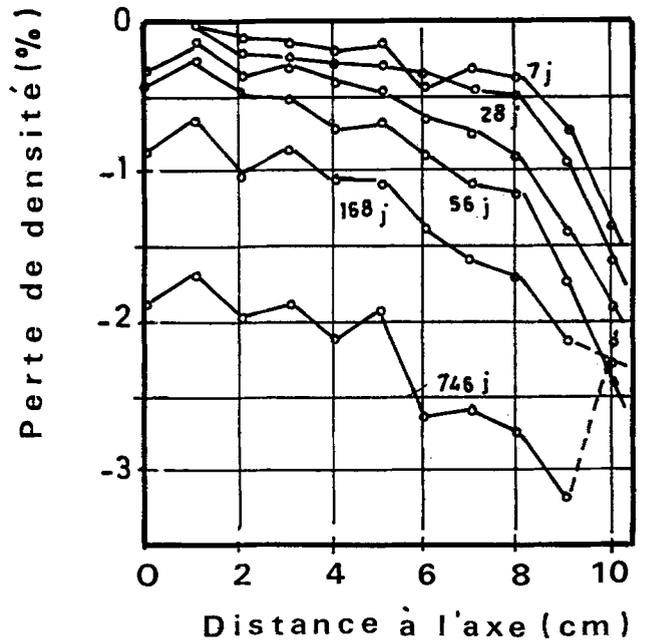


Fig. 9 Evolution dans le temps et distribution de la teneur en eau pour une éprouvette en béton poreux de diamètre 21 cm.

L'analyse des résultats nous a permis de dégager les conclusions suivantes:

1. Le choix du coefficient de diffusion  $D(C)$  est acceptable.
2. Les renseignements qu'on peut tirer des courbes théoriques ont une validité réelle, notamment en ce qui

concerne les interpolations et les prévisions à moyen terme.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et les calculs numériques montrent que le modèle rend bien compte de l'allure générale, tant pour l'allure des distributions (amplitude, gradients), que pour leur évolution dans le temps. Parallèlement on voit que les

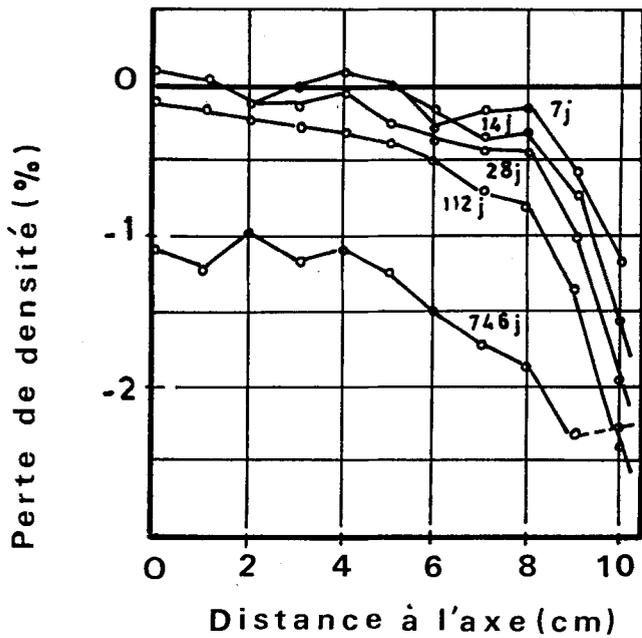


Fig. 10 Evolution dans le temps et distribution de la teneur en eau pour une éprouvette en béton normal de diamètre 21 cm.

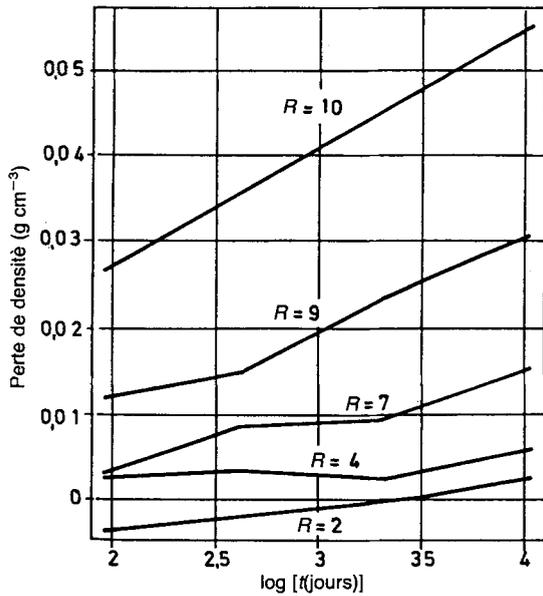


Fig. 11 Evolution dans le temps des teneurs en eau dans une éprouvette en béton de diamètre 21 cm (béton normal).

résultats expérimentaux sont relativement dispersés et on peut penser qu'une plus grande précision du modèle analytique serait illusoire.

Cependant, il faut noter qu'une telle modélisation, purement phénoménologique (puisque'elle est fondée sur une relation concentration/diffusivité qui ne correspond à aucune loi physique) n'autorise aucune extrapolation hors du domaine dans lequel elle a pu être calibrée, donc notamment en dehors du domaine accessible à la mesure. Si ce modèle offre un bel outil de lissage des résultats expérimentaux et de simulation

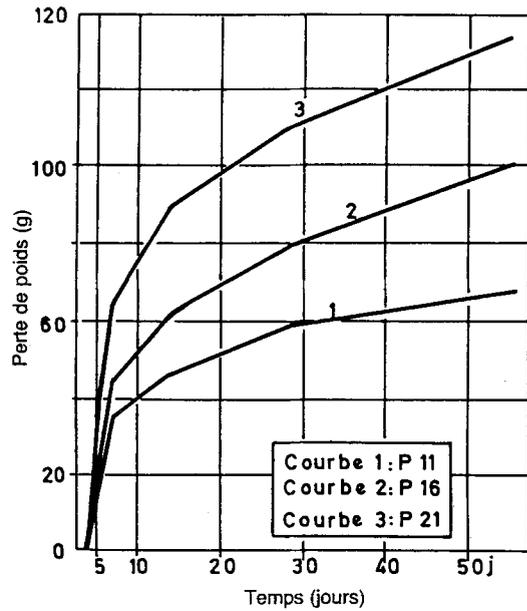


Fig. 12 Evolution dans le temps de la perte en poids globale des éprouvettes en béton (béton poreux): courbe 1, éprouvette de diamètre 11 cm; courbe 2, diamètre 16 cm; courbe 3, diamètre 21 cm.

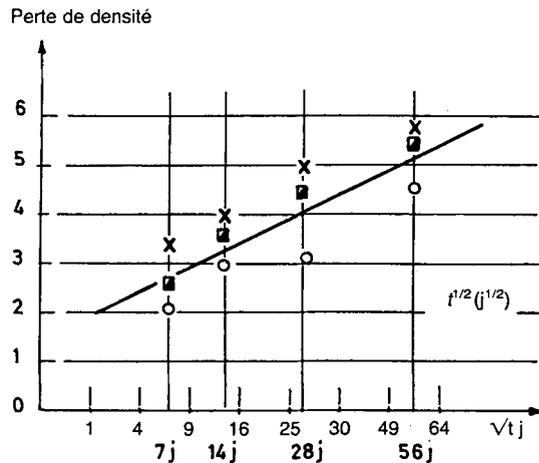


Fig. 13 Evolution de la perte en eau mesurée dans des éprouvettes de diamètre 11, 16 ou 21 cm, en fonction de la racine carrée de la durée de séchage. Diamètre (x) 11, (o) 16, (■) 21 cm.

pour les effets mécaniques dans des cas courants, il ne peut être qu'indicatif pour l'extrapolation à long terme ou pour l'analyse des effets locaux (gradients en surface, effet d'une fissure . . .).

Les problèmes technologiques (et économiques) importants posés par le comportement à long terme du béton (gestion du patrimoine, et notamment des ponts en béton précontraint), d'une part, ceux posés par le comportement de la peau du béton (diagnostic et réparation des ouvrages fissurés), d'autre part, nécessitent la mise au point d'un modèle fondé sur des bases physiques.

Un tel modèle est en cours de développement, en

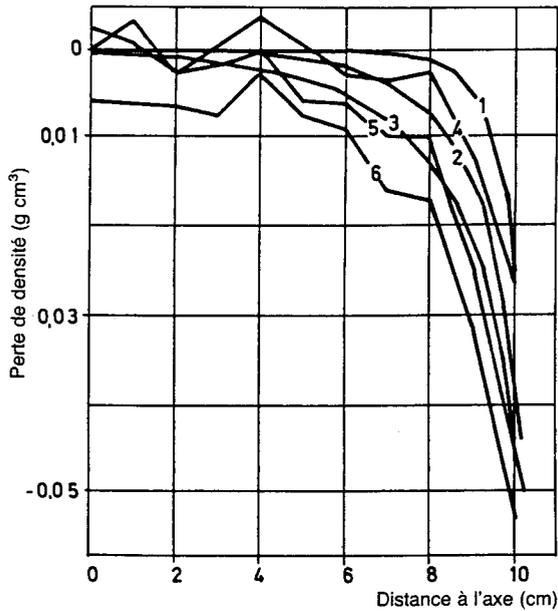


Fig. 14 Comparaison calcul-mesure de l'évolution dans le temps de la distribution de la teneur en eau dans une éprouvette de diamètre 21 cm: courbes 1-2-3, calcul à 7, 28 et 56 jours; courbes 4-5-6, mesure à 7, 28 et 56 jours.

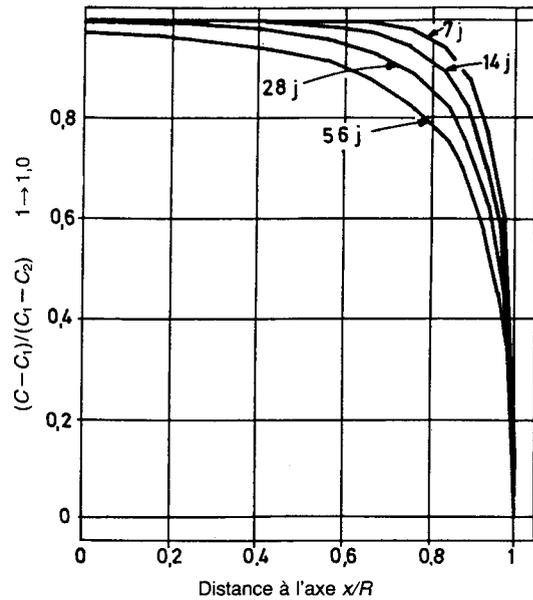


Fig. 15 Evolution dans le temps de la distribution de la teneur en eau calculée par BIDIF pour une éprouvette de diamètre 16 cm (la teneur en eau est donnée ici en pourcentage: les valeurs sont adimensionnelles).

liaison avec le Service de Mathématiques du LCPC [17], sur les bases suivantes:

1. Au moment où commence le séchage (en général au décoffrage), à cause du phénomène d'auto-dessiccation, la phase gazeuse (air et vapeur d'eau saturante) est connexe, au moins par les plus gros pores.

2. Le front de séchage part de la surface et se propage vers l'intérieur; dans cette zone périphérique, on a deux phénomènes concomitants: diffusion gazeuse, selon la loi de Fick, et évaporation à partir des plus petits pores, encore remplis d'eau liquide, qui jouent le rôle d'une réserve d'eau évaporable.

3. Le modèle prend en compte le changement de phase (comme dans le modèle de gel des sols mis au point par la même équipe), ce qui permet d'avoir l'hystérésis observée dans les essais de sorption-désorption.

## 6. CONCLUSION

Les premières observations que l'on peut faire portent sur la cinétique du phénomène et, notamment, sur sa durée:

1. Le séchage dure plusieurs années pour les éprouvettes normalisées qui servent aux essais mécaniques du béton, plusieurs décennies pour les petits éléments de structure, et dépasse largement la durée de vie prévisible des pièces épaisses.

2. Les résultats expérimentaux montrent que les gradients restent longtemps très forts, et localisés au voisinage de la surface.

Le modèle numérique proposé, calibré et validé sur des résultats expérimentaux, apporte une contribution

réelle à la connaissance de la cinétique de dessiccation et conforte les observations expérimentales.

Ceci permet notamment de dégager le résultat suivant: l'influence du facteur d'échelle vérifie une loi en  $t^{1/2}$  classique dans les phénomènes de diffusion; on peut dire que ce qui se passe dans une éprouvette de dimension donnée  $\phi_1$  à un âge donné  $t_1$  se passera ou s'est passé dans une éprouvette de géométrie homothétique de dimension  $k$ ,  $\phi_1$  à un âge égal à  $k_2 t_1$ .

Les conséquences de cet effet d'échelle sont considérables pour les pièces en béton: si l'on distingue les phases de construction (quelques semaines) et de service (quelques dizaines d'années), on voit clairement que les effets du séchage sur le comportement mécanique du béton ne sont pas de même nature, dans chacune de ces phases, selon la taille de l'élément considéré. La phase pendant laquelle le séchage n'affecte qu'une zone superficielle dure quelques semaines pour les éprouvettes de laboratoire ou d'essais contractuels, plusieurs années pour les éléments de structure courants, et dépasse la durée de vie prévisible pour les pièces les plus massives (pont-dalle, enceinte de réacteur nucléaire...).

Au-delà de la période de fabrication, le retrait du béton est dû, pour l'essentiel, au séchage. Celui-ci n'a pas du tout la même évolution, ni par conséquent les mêmes effets mécaniques, dans les pièces massives (déformation totalement empêchée, en peau), dans les petites éprouvettes de labo (retrait apparent, fissuration invisible), et dans les pièces de taille courante (dans lesquelles la fissuration conditionne la répartition entre retrait effectif et contraintes résiduelles).

Enfin, il faut souligner que, si les modèles actuels de

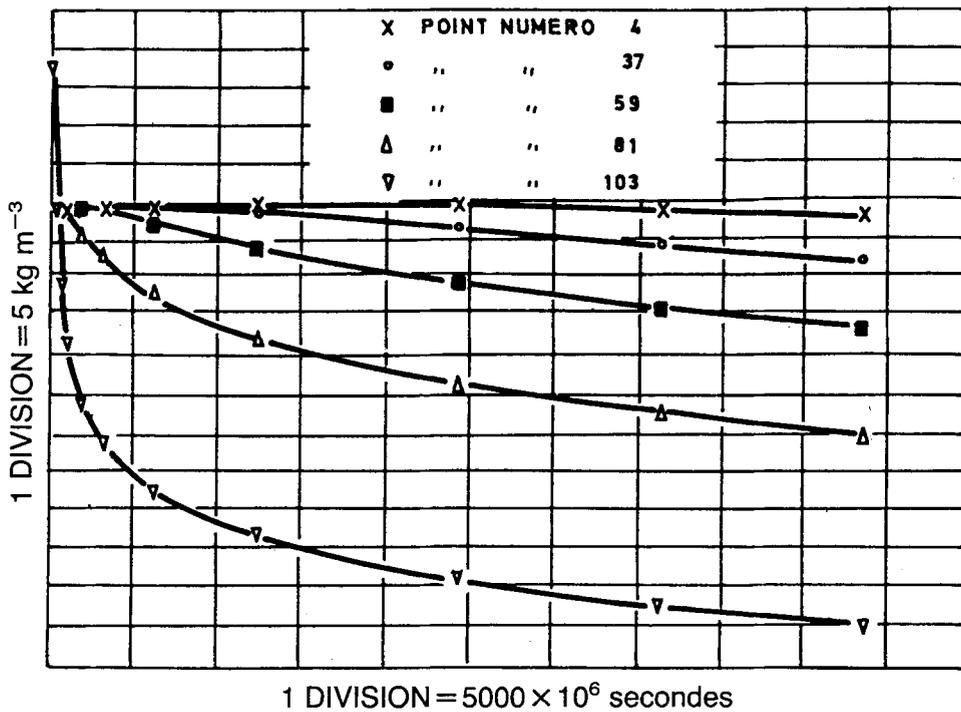


Fig. 16 Tracé des profils dans le temps (perte de densité en fonction du temps), calculés avec le programme BIDIF, en différents points d'une éprouvette de diamètre 16 cm; ces courbes sont à comparer avec celles de la Fig. 11. Point numéro (x) 4, (o) 37, (■) 59, (△) 81, (▽) 103.

transfert de l'humidité dans le béton donnent une bonne image de la cinétique de dessiccation, dans des conditions simples, seul un modèle *fondé physiquement* (prenant en compte notamment les changements de phase) permettrait de traiter d'importantes questions qui restent posées (extrapolation à long terme, optimisation des essais de désorption, effets de surface, cycles climatiques).

## REFERENCES

- Mamillan, M. et L'Hermite, R., 'Répartition de la teneur en eau dans le béton durci', *Annales de l'ITBTP* No. 309-310 (1973).
- Bazant, Z.P. and Najjar, L.J., 'Non linear water diffusion in non saturated concrete', *Matér. Constr.* 5 (25) (1972) 3-20.
- Acker, P. et Barral, A., 'Etude critique des essais classiques de fluage et de relaxation du béton durci', *Cahiers du groupe français de rhéologie*, tome VI, (4) (1983).
- Bazant, Z.P. and Raftshol, W.J., 'Effect of cracking in drying and shrinkage specimens', *Cem. Concr. Res.* 12 (1982) 209-226.
- Acker, P., 'Critique des modèles de calcul actuels, orientations pour la recherche future', *Annales de l'ITBTP* No. 456 (journée d'étude du 7 mai 1985, *Le Point des Connaissances sur le Fluage du Béton*, série Béton 248 (Septembre 1987).
- Verbeck, G.J. and Helmuth, R.H., 'Structures and physical properties of cement paste', in *Proceedings of 5th International Symposium on the Chemistry of Cement*, Session III.1, Cement Association of Japan Tokyo, (1968).
- Regourd, M., 'Microstructure of cement blends including fly ash, silica fume, slag and fillers', *Materials Research Society, Fall meeting, Seminar M (invited talk), Boston, December 1986*.
- Gertis, K. et Werner, H., 'La problématique de l'analyse poreuse des matériaux de construction', UTI, traduction 77/1, traduit de *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, No. 258 (1976) pp. 5-36.
- Gertis, K. et Kiessl, K., 'Transport d'humidité isotherme dans les matériaux poreux de construction', UTI, traduit de *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, No. 258 (1976) pp. 88-110.
- Harmathy, T.Z., *Moisture and Heat Transport with Particular Reference to Concrete* (Committee on performance of Concrete, Division of Building Research, National Research Council of Canada, 1970).
- Huang, C.L.D. and Young, J.F., "Drying shrinkage of Portland cement Paste. I. Microcracking during drying", *Cem. Concr. Res.* 14 (1984) 585-594.
- Von Klopfer, H., *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen* (Bauverlag, Berlin, 1974).
- Humbert, P., Buisson, J.L. et Guenot, A., 'Le programme BIDIF, notice d'utilisation', *C. R. LCPC* (août, 1980).
- Mensi, R., *Etude du Comportement Hygrométrique du Béton* (Mémoire de DEA, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 1983).
- Radioisotopes II* (Numéro spécial du bulletin de liaison des Laboratoires Routiers Ponts et Chaussées, Oct. 1970).
- Attolou, A., 'Etude du séchage du béton par gammaden-simétrie', *C. R. LCPC*, AER 130114 (juin 1985).
- Fremond, M. et Nicolas, P., 'Hystérésis dans les milieux poreux humides non saturés', *C. R. Acad. Sci.* (1987) 741-746.

## SUMMARY

### **Drying of concrete: analysis and modelling**

Natural drying of concrete is a very slow phenomenon involving important consequences on the physical and mechanical behaviour of this material and affecting more particularly two specific aspects: different strains (shrinkage, creeping) and the durability (surface cracking, infiltration of aggressive agents). In addition to the modification of local mechanical and physical properties resulting from the variations in water content, the non-uniformity of this parameter as a function of the time induces a structural effect which is particularly

important (scale effect for shrinkage and creep in the course of desiccation, shrinkage cracking). From a physical analysis of the mechanisms governing water movements within the material a model of non-linear diffusion has been developed and validated by means of the densimetry method using gamma-ray absorption (with a rotative gamma-ray bench) which experimentally determines space distributions of water content and their evolution as a function of time. The model thus validated allows us on one hand to extrapolate, with certain limitations, experimental results and on the other hand it helps us to make use of and to interpret shrinkage and creep test results.