

# LA GAMMADENSIMETRIE ET SES APPLICATIONS

N. BELAS BELARIBI

Docteur de l'INSA de Toulouse, Maître assistante, Centre Universitaire de Mostaganem

T. KADRI

Phd de Saint Petersburg, Maître assistant, Centre Universitaire de Mostaganem

## Résumé :

*Le béton est un matériau qui a une structure complexe. Divers processus influent sur lui : chimiques, tels que l'hydratation du ciment ; physiques tels que les échanges thermiques et hydriques. Ces échanges hydriques qui résultent du mouvement de l'eau et de répartition dans un élément de béton sont d'une importance telle qu'elle puisse influencer sur les caractéristiques mécaniques du béton. En effet dans les bétons courants pour des raisons de maniabilité et de facilité de mise en œuvre, on met lors de la fabrication beaucoup plus d'eau qu'il n'en faut pour assurer la réaction d'hydratation du ciment. Dès son jeune âge, le béton se trouve alors en déséquilibre hygrométrique avec le milieu extérieur à cause du surplus d'eau contenu dans ses pores. Une des méthodes utilisées pour l'évaluation des variations hydriques responsables de la modification des propriétés des bétons est la densimétrie par absorption de rayons gamma : la gammadensimétrie. Nous présenterons cette technique efficace en expliquant son principe de fonctionnement et quelques unes de ses nombreuses applications.*

**Mots clés :** gammamétrie • gammadensimétrie • teneur en eau • humidité • mortier • pâte de ciment • masse volumique • diffusivité •

## 1 INTRODUCTION

Le séchage naturel du béton est un phénomène très lent qui a des conséquences importantes sur deux aspects spécifiques : les déformations différées (retrait, fluage) et la durabilité (fissuration superficielle, pénétration d'agents agressifs). Les modifications des caractéristiques mécaniques et physiques résultent principalement des variations de teneur en eau. Il est donc intéressant de déterminer expérimentalement les distributions spatiales de teneur en eau et leur évolution au cours du temps.

La méthode de densimétrie par absorption des rayons gamma au moyen d'un banc gammamétriques peut nous le permettre.

La gammamétrie ou la gammadensimétrie permet la mesure de l'évolution locale de la teneur en eau qui se traduit par des variations de masse volumique du matériau induisant une variation de l'atténuation subie par le faisceau de rayons gamma. Son intérêt réside surtout dans son caractère non destructif et ponctuel.

Elle permet, lorsque la phase solide peut être considérée comme invariante, de suivre les mouvements de l'eau dans les matériaux et d'en déduire donc leurs propriétés de transport. Nous avons utilisé de plus cette technique pour voir l'influence de la nature des granulats sur la pâte de ciment avec laquelle ils sont en contact.

## 2 LE DISPOSITIF DES MESURES GAMMADENSIMETRIQUES

La mesure de la densité d'un milieu par atténuation de rayonnement gamma nécessite un équipement tel qu'il est présenté sur les figures 1 à 3. Le dispositif comprend les éléments décrits ci-après :

- Une source radioactive constituée par l'Américium 241 émetteur de rayonnement gamma ;
- Deux collimateurs utilisés pour éliminer les photons gamma déviés de leur trajectoire d'origine par des interactions de type Compton<sup>1</sup>, sont positionnés devant la source et le détecteur. Ils ont des sections rectangulaires de 2 x 8 millimètres ;
- Un détecteur du type scintillateur, est constitué par un cristal d'Iodure de Sodium (INa), dont les atomes sont excités par les photons incidents. L'atome excité de INa, émet des photons d'énergie proportionnelle à celle du photon capturé. Un tube photomultiplicateur, placé derrière, transforme, par effet cascade, l'énergie du photon de fluorescence en une impulsion électrique d'amplitude proportionnelle à l'énergie du photon gamma détecté ;

- Analyseur multi-canaux : l'impulsion électrique sortant du photomultiplicateur est envoyée, une fois préamplifiée, à l'analyseur qui la comptabilise selon son amplitude. Seuls les photons dont l'énergie est comprise dans la fenêtre placée autour du pic caractéristique d'émission seront comptés (les photons Comptons étant éliminés). La somme des comptages comprise dans la fenêtre de pic 60 keV est envoyée pour stockage sur l'ordinateur de pilotage du système ;
- Sous-système de déplacement : une association moteur pas-à-pas et vis - mère permet de positionner l'ensemble source - détecteur avec une résolution de l'ordre du micron. Ceci permet au faisceau gamma de parcourir toute la longueur de l'échantillon, en se plaçant sur des positions précises de mesure (précision 1 $\mu$ ).

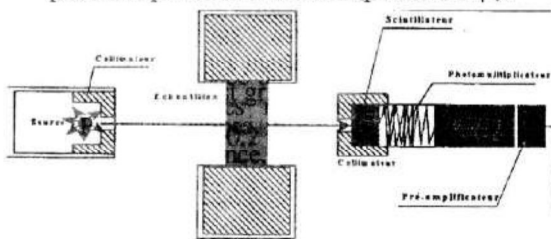


Figure 1 : Chaîne de détection des photos gamma

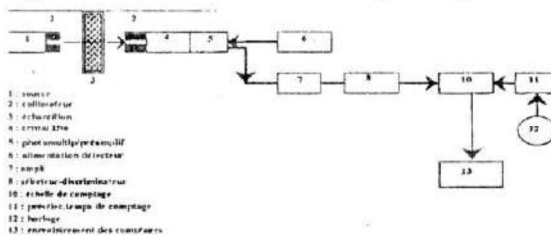


Figure 2 : Représentation schématique du dispositif de mesure

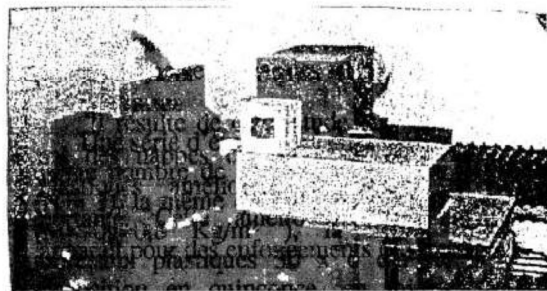


Figure 3 : Photo du support de mesure et d'une éprouvette d'essai (éprouvette mixte).

### 3 APPLICATIONS

#### 3.1 Aspect théorique

Une caractéristique fondamentale du rayonnement gamma est son absorption par la matière de façon exponentielle, décrite par la loi de Beer sous la forme

$$dI = -\mu \cdot \rho \cdot dl \quad (1)$$

Où  $dI$  est la réduction de l'intensité  $I$  d'un faisceau monoénergétique et parallèle de photons gamma qui traverse une épaisseur  $dl$  de matériau absorbant de masse volumique  $\rho$ , considéré comme homogène (fig. 1).

Le coefficient d'absorption massique,  $\mu$ , dépend de la nature de l'absorbant et de l'énergie du rayonnement absorbé. L'intégration de l'équation 1 sur une épaisseur  $l$  conduit à :

$$I = I_0 \exp(-\mu \cdot \rho \cdot l) \quad (2)$$

et dans un intervalle de temps  $\Delta t$ , elle conduit à :

$$N = N_0 \exp(-\mu \cdot \rho \cdot l) \quad (3)$$

Où  $N_0$  et  $N$  représentent respectivement le nombre de photons gamma à vide et à travers une épaisseur  $l$  pendant l'intervalle  $\Delta t=30s$ . Pour des matériaux hétérogènes, l'expression 3 s'écrit sous la forme :

$$N = N_0 \exp(-(\mu_s \rho_s + \mu_\omega \rho_\omega \omega) l) \quad (4)$$

Les indices  $s$  et  $\omega$  représentent les composants solide et liquide d'un milieu poreux d'épaisseur  $l$ ,  $\omega$  étant la teneur en eau volumique. Si les photons diffusés sont éliminés, soit par discrimination d'énergie soit par discrimination des trajectoires par le biais de collimateurs, et si on considère  $N_s$  le nombre de photons détectés lorsque le solide est sec, le comptage en milieu humide s'écrit :

$$N_h = N_s \exp(-\mu_\omega \rho_\omega \omega \cdot l) \quad (5)$$

Il est donc possible d'en déduire la teneur en eau  $\omega$  si on admet que la masse volumique de la phase solide reste constante :

$$\omega = \frac{1}{\mu_\omega \rho_\omega l} \ln \left[ \frac{N_s}{N_h} \right] \quad (6)$$

Cette teneur en eau locale représente une moyenne sur l'épaisseur  $l$ . Lorsque l'hypothèse de phase solide constante n'est plus valable ce qui est le cas des matériaux évolutifs dans le temps, il est possible, grâce à la technique d'atténuation de rayonnement gamma, de tracer les profils de densité apparente. En considérant  $N(x,t)$  le nombre de photons détectés à la position  $x$  et à l'instant  $t$ , la valeur de la masse volumique apparente locale est donnée par :

$$\rho(x,t) = \frac{1}{\mu_\omega \rho_\omega l} \ln \left[ \frac{N_s}{N_h} \right] \quad [7]$$

La densité mesurée représente également une moyenne sur l'épaisseur  $l$ . Cette écriture nécessite néanmoins de connaître le coefficient d'atténuation massique  $\mu_s$  de la phase solide. Lorsque celui-ci est variable d'un point à l'autre, comme c'est le cas en toute rigueur pour un matériau évolutif, nous

donnons donc à  $\mu_s$  une valeur moyenne obtenue pour l'ensemble de l'échantillon.

### 3.2 Mesures préliminaires

#### 3.2.1 Mesures à vide

On a observé le comportement du rayonnement gamma en présence d'un obstacle en fonction de la température ambiante. Pour une série de température de 15, 20, 25 et 30°C, la moyenne globale du nombre de coups par minute est validée avec une incertitude de  $\pm 3\%$ . Pour une température de 20°C, l'atténuation à vide du rayonnement gamma donne une valeur moyenne de 12075 Cps/mm avec un écart type de 198.5 Cps/mm, soit une incertitude relative de 5% [1].

#### 3.2.2 Atténuation du rayonnement gamma par l'eau libre

La relation 6 permettant le calcul de la teneur en eau volumique nécessite la connaissance du coefficient d'atténuation massique de l'eau,  $\mu_{\omega}$ . En interposant différentes épaisseurs  $l$  d'eau entre la source et le détecteur, la valeur de ce coefficient peut être déterminée par la pente de droite  $\ln(N_0/N)=f(l)$ .  $N_0$  représente le comptage à vide (réservoirs vides) et  $N$  est le comptage à travers les réservoirs pleins d'eau. La figure 4 montre l'obtention de la valeur de  $\mu_{\omega}$  par une droite de régression.

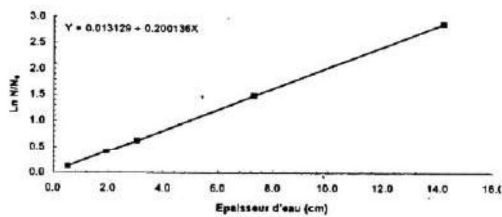


Figure 4 : Coefficient d'atténuation linéaire de l'eau par le rayonnement gamma.

Une valeur de  $2.010E-02m^2kg^{-1}$ , proche de la valeur théorique de  $2.040E-02m^2kg^{-1}$  et de celle de Bellini [2] de  $2.0025E-02m^2kg^{-1}$ , a été obtenue pour  $\mu_{\omega}$ .

### 3.3 Calcul des coefficients d'atténuation massique des matériaux

Comme dans le cas de la détermination du coefficient d'atténuation massique de l'eau, nous avons calculé ce coefficient pour différents matériaux, à savoir des pâtes de ciment durcies et des mortiers. Les compositions des pâtes et des mortiers sont décrites dans le tableau 1.

Désignation	PCN	MRT I	MRT II
Ciment C(kg/m <sup>3</sup> )	450	450	450
Eau E (Kg/m <sup>3</sup> )	225	225	225
Sable (Kg/m <sup>3</sup> )	-	230	1307
Eau/(ciment)	0.5	0.5	0.5
Masse volumique Apparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1595	1836	2107

Tableau 1 : Description des compositions

Nous avons procédé à la détermination du coefficient d'atténuation massique moyen des matériaux (tableau 2).

Désignation	PCN	MRT I	MRT II
$\mu_s (m^2.kg^{-1})$	0.040	0.037	0.032

Tableau 2 : Valeurs des coefficients d'atténuation massique.

La différence entre les coefficients d'atténuation massique est due à la différence des compositions de ces matériaux. Les mortiers étant composés d'une plus grande quantité de sable donnent les plus faibles valeurs de coefficient d'atténuation massique. Donc plus le matériau est dense plus sa capacité d'absorption des photons gamma est grande.

### 3.4 Détermination des masses volumiques locales des matériaux

L'utilisation de l'atténuation massique moyenne des matériaux et de la relation 7 permet de déterminer les variations locales de masses volumiques. Ces variations sont donc relatives à une valeur moyenne. Les figures 5.a et 5.b [3] montrent le résultat des calculs pour la pâte pure de ciment (PCN) et mortier MTR II.

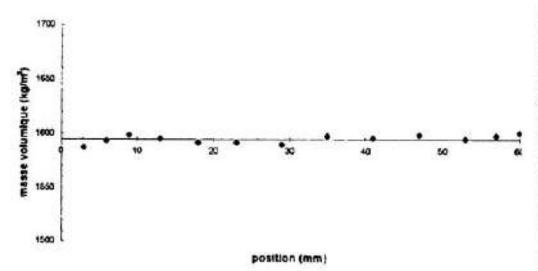


Figure 5.a : Fluctuation des masses volumiques à l'état sec : cas d'une pâte pure de ciment

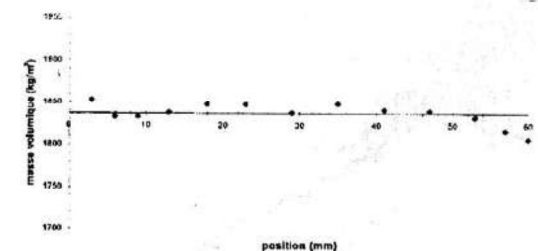


Figure 5.b : Fluctuation des masses volumiques à l'état sec : cas d'un mortier.

Ce mortier présente des fluctuations de masse volumique apparente très variées. Celui-ci contient du sable qui se présente sous forme de grains roulés avec une quantité de fractions fines très faible. L'incidence du rayonnement gamma sur ce mortier est donc influencée par la diversité de ces grains et de leur répartition à l'intérieur de l'éprouvette. La gammamétrie permet donc d'évaluer le caractère d'homogénéité des matériaux poreux.

### 3.5 Suivi de l'imbibition et du séchage des pâtes et mortiers.

Les matériaux ont été latéralement recouvert d'une fine couche de résine afin de favoriser un transfert monodirectionnel. Le principe d'imbibition consiste à mettre une des faces libres de l'éprouvette au contact direct avec l'eau, l'autre étant exposée à l'air. L'ensemble est stocké dans une enceinte contrôlée en température (20°C). Une fois le matériau saturé, on procède à un séchage (35°C, 3%HR).

La technique de l'atténuation gammamétrique permet d'évaluer localement la teneur en eau à l'intérieur du matériau. Il est ainsi possible d'en déduire, à un instant donné, les profils hydriques à l'intérieur des éprouvettes et d'en suivre l'évolution dans le temps. Les figures 6 et 7 [3] représentent des profils hydriques types, obtenus respectivement, lors de l'imbibition et du séchage d'une pâte de ciment durcie.

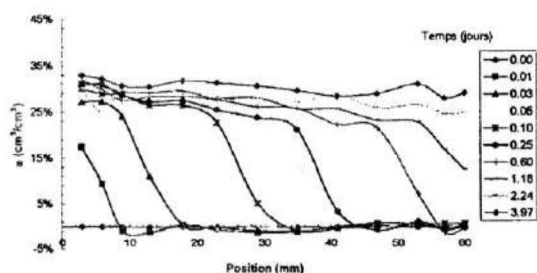


Figure 6 : Profils hydriques bruts en imbibition : cas d'une pâte pure de ciment durcie.

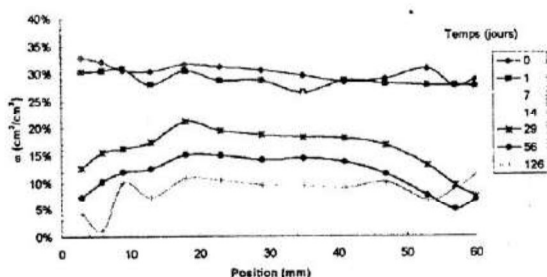


Figure 7 : Profils hydriques bruts lors d'un séchage : cas d'une pâte pure de ciment durcie

Les profils hydriques permettent de déterminer les propriétés de transport qui caractérisent le comportement en régime dynamique des matériaux.

L'un des paramètres essentiels de transfert global d'humidité est la diffusivité hydrique. Ce paramètre, fonction de la teneur en eau, n'est pas unique. Il peut dépendre des effets d'hystérésis, de

la nature du traitement thermique que les matériaux ont pu subir. Nous pouvons également parler de l'histoire thermique des éprouvettes, mais aussi de la nature de la sollicitation hydrique [3].

La diffusivité hydrique est l'un des coefficients phénoménologiques nécessaire à la mise en œuvre de tout modèle physique macroscopique permettant de simuler la réponse des milieux poreux à des sollicitations hydriques [4].

La gammamétrie permet également de mettre en évidence l'influence de la nature du granulat sur les variations hydriques de la pâte de ciment avec laquelle il est en contact (figure 3). Pour ce faire, des mesures de teneurs en eau ont été réalisées sur des modèles diphasiques cubiques qui se présentent sous forme illustrée à la figure 8 : un granulat prismatique de 2x2x4 cm est noyé dans une pâte de ciment de rapport eau/ciment de 0.38 [5].

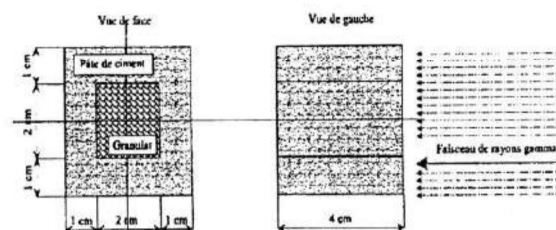


Figure 8 : Eprouvettes cubiques utilisées pour les mesures gamma.

La figure 9 donne un exemple de profil hydrique donnant les variations de teneur en eau locales. Une étude plus approfondie sur l'influence de la nature des granulats dans le comportement hydrique de la pâte de ciment avec laquelle ils se trouvent en contact, a montré qu'il existe des transferts d'humidité entre la structure poreuse des granulats calcaires et celle de la pâte contrairement aux granulats siliceux de diabase. Ces transferts sont la cause de multiples variations hydriques qui ont une influence directe sur le comportement mécanique.

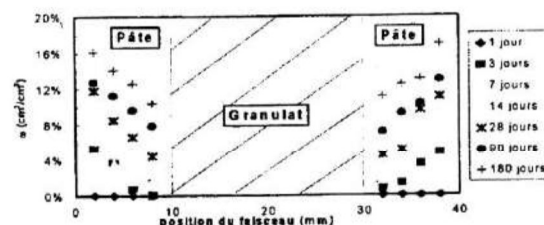


Figure 9 : Mise en évidence de l'effet du granulat sur les profils de teneur en eau.

#### 4 CONCLUSION

La technique de gammadensimétrie nous a permis de quantifier les fluctuations de densité locale ainsi que leur évolution au cours du temps et d'évaluer l'hétérogénéité des matériaux de construction. D'autre part, la mesure en continu a permis de reconstituer des profils hydriques lors de diverses sollicitations hydriques. Ces profils sont indispensables dans la détermination des paramètres de transfert utilisés dans la description de modèles physiques [1], [2], [6], [7]. Enfin, la gammadensimétrie est une méthode efficace pour la mise en évidence de l'influence des granulats sur la pâte de ciment durcie. Ainsi, on a conclu que la nature minéralogique, mais, surtout la structure poreuse des granulats sont des paramètres importants dont on doit tenir compte dans la description du comportement mécanique des matériaux [5]. L'absorption par rayonnement gamma reste prometteuse en tant que technique de laboratoire non destructive.

#### 5 BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. DWI ARGO : "Détermination expérimentale de l'influence de l'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux de Génie Civil" – Thèse INSA-UPS, Toulouse 1994
- [2] J.A. BELLINI DA CUNHA NETO : "Transport d'humidité en matériaux poreux en présence d'un gradient de température caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire" – thèse Univers. Joseph Fourier, Grenoble, 1991.
- [3] L. CHEMLOUL : "Détermination expérimentale des diffusivités hydriques de matériaux de construction" : Etude des facteurs d'influence - Thèse INSA-UPS, Toulouse 1996.
- [4] B. PERRIN, L. CHEMLOUL : "Hydric diffusivities of cement pastes and mortar : influence of hysteresis phenomena, of thermal cure and hygrothermal solicitations". 4<sup>th</sup> Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Closing Seminar, Symposium, Espoo – Finland Sept. 1996.
- [5] N. BELAS BELARIBI : "Etude microstructurale du comportement différé des bétons : influence de la composition" – Thèse INSA-UPS, Toulouse, Avril 1997.
- [6] J.F. DAIAN : "Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériaux macroporeux" – Thèse, U.S.T.M. & INP de Grenoble 1986.
- [7] L. PEL : "Moisture transport in porous building materials" –Thèse, Technische Universiteit, Eindhoven, 1955

Dans le prochain numéro :

- CONTRIBUTION A L'ETUDE DES CHAMPS DE CONTRAINTES LORS DE L'INTERACTION ENTRE FISSURE – MICROFISSURE .  
M. CHABAAT & H. HADJAB.
- MESURE EXPERIMENTALE DES CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES DES MORTIERS.  
R. BOUTEMEUR & J.R. KLEPACZKO.
- ASPECTS QUALITATIFS DE LA DUCTILITE DANS LES CONSTRUCTIONS EN BETON ARME.  
A. KASSOUL, K. EZZIANE & A. KADRI.