

Afin de satisfaire à des exigences de plus en plus sévères (durabilité, performance mécanique, ...), la technologie du béton a beaucoup innové ces dernières années et a vu l'apparition de nouveaux types de bétons (béton à hautes performances et autocompactant). Si ces bétons présentent en général des résistances mécaniques ou des propriétés physicochimiques supérieures, ils pourraient être plus sensibles au retrait et à la fissuration au jeune âge, du fait de leur rapport eau/ciment plus faible et de leur teneur en fines plus élevée.

1 LES TYPES DE RETRAIT

Le béton très jeune (en phase plastique) et le béton jeune (en phase de durcissement) sont caractérisés par divers mécanismes de retrait qui résultent, d'une part, de processus se déroulant au sein même du béton et, d'autre part, de l'interaction avec l'environnement (voir figure 1).

- Le retrait *chimique* est une conséquence directe de l'hydratation du ciment : le ciment hydraté occupe un volume plus petit que la somme des volumes initiaux des grains de ciment et de l'eau.
- Le retrait *plastique* est dû à l'évaporation de l'eau via la surface libre du béton frais après sa mise en œuvre. Si le béton est durci ou en phase de durcissement, on parle de retrait de *séchage* ou de retrait *hydraulique*. Le risque est particulièrement élevé dans le cas de surfaces planes horizontales non coffrées et non protégées à la face supérieure (routes, revêtements de sol industriels, ...).
- Le retrait *endogène* apparaît surtout avec les bétons présentant un rapport eau/ciment (ou E/C) faible et une teneur élevée en fines (ciment et/ou additions de fines minérales). Dans ces conditions, le ciment prélève de telles quantités d'eau lors de l'hydratation du béton jeune que des pores remplis d'air se forment rapidement. Ce phénomène d'auto-dessiccation (dessiccation interne) entraîne des pressions capillaires qui conduisent à un retrait rapide dans toute la masse du béton.
- Le retrait *thermique* est la contraction accompagnant le refroidissement du béton qui fait suite à la réaction d'hydratation exo-

Julie Piérard, ir., chercheur, laboratoire Technologie du Béton, CSTC
Vinciane Dieryck, ir., chef de projet, laboratoire Technologie du Béton, CSTC

Le retrait au jeune âge des bétons spéciaux

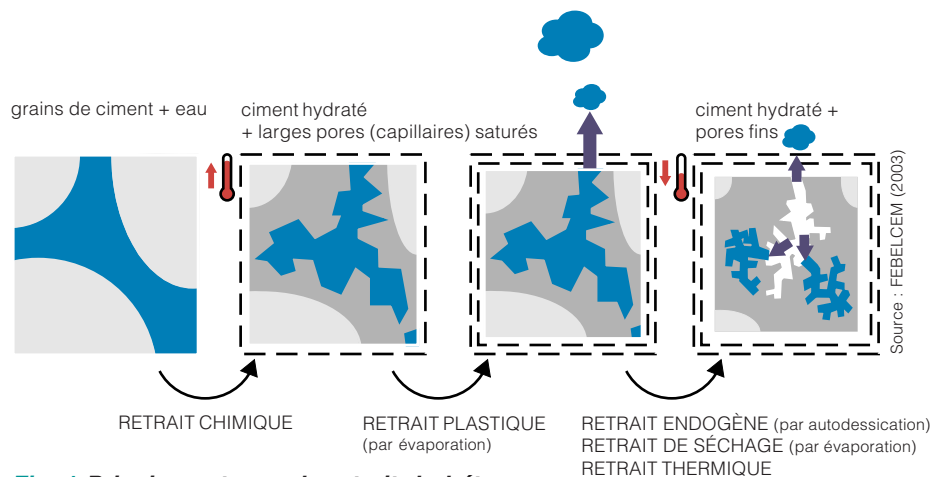


Fig. 1 Principaux types de retrait du béton.

thermique. Dans le cas de constructions massives ou d'éléments à section variable, une évacuation inégale de la chaleur d'hydratation donne lieu à des gradients de température importants et donc à des contraintes de traction.

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique car il peut entraîner l'apparition de fissures parfois nuisibles à la durabilité du béton. Dans ce contexte, les fissures formées au jeune âge (voir figure 2) peuvent être caractérisées par une ouverture importante, favorisant ainsi le transport d'agents agressifs au sein de l'ouvrage. Des problèmes de dégradation de la matrice de ciment et de corrosion des barres d'armatures peuvent alors survenir et compromettre la performance des ouvrages à long terme.

2 LES BÉTONS SPÉCIAUX

Deux nouveaux types de béton sont brièvement abordés dans ce paragraphe :

- le béton à hautes performances (BHP), qui présente des résistances mécaniques et des propriétés physicochimiques supérieures à celles des bétons classiques
- le béton autocompactant (SCC – *self-compacting concrete*), qui est un béton superfluide, capable de se mettre en place sans apport d'énergie extérieure (vibration).

Pour plus d'informations concernant les bétons spéciaux et leurs principaux constituants, nous renvoyons aux articles «Le béton auto-

plaçant ou autocompactant, un béton en plein essor» [2] et «Les bétons spéciaux» [4] parus dans le CSTC-Magazine.

2.1 LES BÉTONS À HAUTES ET ULTRA-HAUTES PERFORMANCES

Le béton ordinaire possède une résistance à la compression à 28 jours comprise entre 20 et 50 MPa. Lors de sa fabrication, la quantité d'eau utilisée est toujours supérieure à celle nécessaire à l'hydratation complète du ciment. La porosité capillaire due à cet excès d'eau, qui facilite pourtant la mise en œuvre, a des effets néfastes sur la résistance et la durabilité du béton. Il semble donc intéressant de chercher à réduire cette quantité d'eau tout en gardant une bonne ouvrabilité du béton frais. Ceci a été rendu possible grâce au développement de nouveaux matériaux tels que les superplastifiants hautement réducteurs d'eau et les ultra-fines, notamment la fumée de silice.



Fig. 2 Fissures de retrait plastique.

Les particules de fumée de silice présentent une extrême finesse qui leur permet de combler les vides entre les particules de ciment plus grosses. Elles sont également très réactives et participent ainsi à la réaction d'hydratation. Ces deux propriétés permettent un remplissage supplémentaire des pores et une microstructure plus dense du béton.

Les bétons à hautes performances sont définis par une résistance caractéristique à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa. Lorsque les résistances sont supérieures à 80 MPa, on parle de bétons à ultra-hautes performances (BUHP).

Outre une ouvrabilité accrue du béton frais à même dosage en eau [5], les caractéristiques principales des BHP et BUHP sont les suivantes :

- une augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité), tant au jeune âge qu'à long terme, ce qui permet de réduire le délai d'attente avant décoffrage en cas de préfabrication (figure 3) et de construire des structures plus élancées grâce à l'augmentation de la capacité portante
- une plus grande imperméabilité à l'air et à l'eau, due à une compacité plus élevée et donc un renforcement de la protection des armatures par rapport à la corrosion
- une plus grande résistance aux agents agressifs, d'où une meilleure durabilité exploitée par exemple dans les structures *offshore* (plateformes de forage) pour leur assurer une bonne résistance au gel et à l'eau de mer
- une plus grande résistance à l'abrasion
- une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel
- une réduction du fluage, ce qui présente un attrait important pour la construction de ponts.



Fig. 3 Utilisation des BHP en préfabrication.

2.2 LES BÉTONS AUTOCOMPACTANTS

Les bétons autocompactants, parfois appelés bétons autoplaçants ou autonivelants, forment une nouvelle catégorie de bétons dont la fluidité

exceptionnelle à l'état frais est obtenue en utilisant une formulation spécifique et des superplastifiants hautement réducteurs d'eau. La technologie des bétons autocompactants est née au Japon dans les années '80 et a suscité de l'intérêt en Europe dans les années '90.



Fig. 4 Mise en œuvre à l'aide de béton autocompactant.

Une fluidité élevée, une résistance suffisante à la ségrégation et une absence de blocage des granulats au niveau des armatures sont des exigences essentielles pour qu'un béton puisse être considéré comme autocompactant. La fluidité élevée du béton autocompactant (voir figure 4) peut être obtenue sans augmenter le rapport eau/ciment en ayant recours à des superplastifiants. D'autre part, il est possible d'atteindre une résistance suffisante du béton autocompactant vis-à-vis de la ségrégation en utilisant l'une des trois méthodes suivantes, chacune caractérisant une famille de béton autocompactant :

- les bétons autocompactants de type poudreux, obtenus en diminuant la proportion entre la quantité d'eau et la quantité de poudre présente dans le mélange, par l'adjonction d'une quantité supplémentaire de fines (ciment et/ou additions minérales)

- les bétons autocompactants avec agent de viscosité
- les bétons autocompactants de type combiné, contenant une grande quantité de fines et un agent de viscosité.

Il existe donc une large gamme de compositions, avec des résistances à la compression allant de 35 à 75 MPa.

3 DIFFÉRENCE ENTRE LE RETRAIT DE SÉCHAGE ET LE RETRAIT ENDOGÈNE

Le retrait endogène diffère du retrait de séchage du point de vue du mécanisme de diminution de l'humidité du béton. La différence essentielle réside dans le fait que la perte d'eau est due à l'évaporation dans le cas du retrait de séchage et à la réaction d'hydratation dans le cas du retrait endogène. Etant donné que le retrait endogène est provoqué par une dessiccation interne, il augmente lorsque le rapport eau/ciment (E/C) diminue, l'eau étant alors rapidement consommée par la réaction d'hydratation.

Etant donné que les bétons spéciaux cités ci-dessus sont caractérisés par un faible rapport E/C et une teneur élevée en fines, les effets mécaniques du retrait endogène apparaissent comme prépondérants vis-à-vis des effets du retrait de séchage (voir tableau 1). En l'absence de cure adéquate, le retrait endogène d'un béton ordinaire reste très faible (0,05 à 0,1 mm/m) alors que celui des BHP et BUHP peut varier de 0,5 à 1 mm/m selon la teneur en ciment et le rapport E/C (voir figure 5). En ce qui concerne les bétons autocompactants, on trouve dans la littérature des résultats contradictoires en raison des diverses compositions possibles pour ce type de béton.

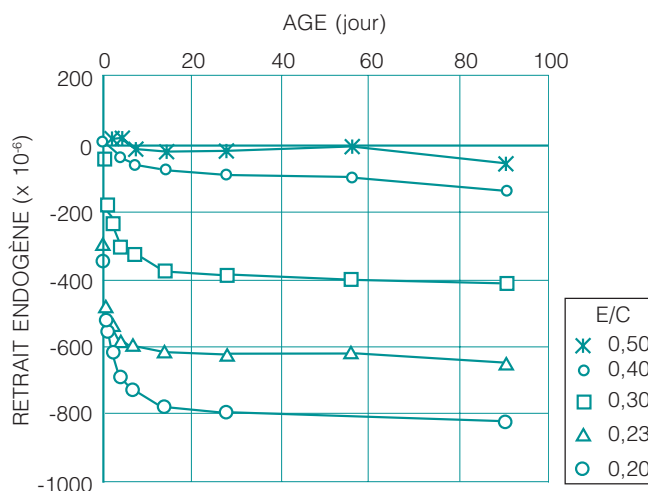


Fig. 5 Evolution du retrait endogène en fonction du rapport E/C (1000x10⁻⁶ équivaut à 1 mm/m) [8].

Tableau 1 Comparaison entre le retrait des bétons ordinaires et celui des BHP.

Types de bétons	Rapport E/C	Retrait de séchage	Retrait endogène
Bétons ordinaires	≈ 0,5	Elevé	Peu ou pas du tout
BHP	< 0,4	Faible	Elevé



Fig. 6 Dispositif de mesure linéique du retrait endogène au jeune âge.

Le béton jeune présente en général une résistance mécanique trop faible pour faire face aux contraintes engendrées par le phénomène de retrait. Une fissuration précoce, parfois nuisible à la durabilité de l'ouvrage à long terme, peut alors se développer. Il est donc important de disposer de méthodes de mesure fiables permettant de caractériser le retrait endogène des bétons spéciaux dès leur confection.

4 LA PROBLÉMATIQUE DE LA MESURE DU RETRAIT ENDOGÈNE

Pour pouvoir mesurer le retrait endogène seul et éliminer les autres composantes du retrait total, deux conditions expérimentales sont à respecter [1] :

- le matériau doit être coupé de tout échange d'humidité avec l'extérieur (il ne doit pas perdre d'eau par évaporation) afin de ne pas mesurer le retrait plastique et de séchage en plus du retrait endogène
- le matériau doit être maintenu en conditions isothermes. Si l'isothermie ne peut être satisfaite de manière expérimentale, les déformations thermiques doivent alors être prises en compte.

Ces deux conditions, associées au fait que la mesure doit commencer le plus tôt possible après le gâchage du béton (les déformations ayant lieu dès lors que le matériau s'hydrate), rendent la mesure des déformations endogènes très délicate.

On distingue deux grands types de mesure pour caractériser le retrait endogène : les mesures linéiques (verticales ou horizontales) et les mesures volumiques.

4.1 LES MESURES LINÉIQUES

Les mesures linéiques des déformations endogènes consistent à enregistrer les variations dimensionnelles d'une éprouvette dans une direction. Les résultats sont exprimés selon la formule suivante :

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

où L correspond à la longueur de l'éprouvette au moment de mesure et L_0 à la longueur initiale (à l'échéance de la première mesure).

Le CSTC possède un dispositif de mesure linéique du retrait au jeune âge qui permet de commencer la mesure avant le démoulage du béton (voir figure 6).

Plusieurs éléments peuvent influencer la mesure linéique des déformations endogènes :

- la sédimentation et le ressuage (apparition d'eau claire à la surface de l'échantillon) : ces phénomènes engendrent des gradients de densité dans l'épaisseur des éprouvettes, avec pour conséquence une dissymétrie du système et une modification locale de la composition du matériau étudié. Ils peuvent être atténués par la mise en rotation des éprouvettes jusqu'à la prise ou par l'utilisation d'agents viscosants

- les frottements éprouvette/moule : ils peuvent restreindre les déformations de l'éprouvette. La solution la plus courante pour minimiser les perturbations engendrées par le moule consiste en un traitement des parois intérieures de celui-ci par lubrification ou par positionnement d'une feuille plastique ou de téflon. Il est aussi possible de jouer sur la souplesse du moule (utilisation d'un moule en téflon ou en polystyrène)
- l'échéance de la première mesure : le retrait endogène apparaît dès lors que les réactions d'hydratation commencent, à savoir au contact de l'eau et du ciment. Il est donc important de commencer la mesure de déformation le plus tôt possible après le gâchage du béton. Les mesures linéiques ne peuvent être réalisées que lorsque le béton atteint une rigidité suffisante soit pour être démoulé, soit pour entraîner les inserts sur lesquels se trouvent les capteurs de déplacement. En général, le retrait endogène avant prise ne peut pas être mesuré par ce type de méthode
- l'étanchéité du système : pour garantir l'étanchéité du système de mesure, il faut tout d'abord choisir un matériau très peu absorbant pour le moule (métal ou téflon). La protection contre la dessiccation des faces exposées de l'éprouvette est généralement assurée par un film plastique avant démoulage et par une double couche d'aluminium adhésif après démoulage. Des mesures de poids régulières permettent de s'assurer que l'échantillon ne gagne ni ne perd d'eau pendant la durée de l'essai.

4.2 LES MESURES VOLUMIQUES

Les mesures volumiques des déformations endogènes consistent à enregistrer les variations dimensionnelles d'un échantillon de pâte de ciment isolé du milieu extérieur dès le coulage par une membrane souple étanche. Le système 'pâte + membrane' est entièrement plongé dans un liquide thermostatisé. La mesure des déformations du matériau s'effectue alors soit par suivi de niveau du liquide d'immersion, soit par pesée hydrostatique, la mesure des variations de la poussée d'Archimède permettant d'accéder aux variations de volume (figure 7, p. 4).

Plusieurs éléments peuvent influencer la mesure volumique des déformations endogènes :

- la sédimentation et le ressuage : la présence d'eau de ressuage à la surface de l'échantillon (entre la pâte de ciment et la membrane) peut fausser la mesure. En effet, cette pellicule d'eau est réabsorbée au cours de l'hydratation jusqu'à ce que la membrane entre en contact avec la surface de la pâte de ciment. Les déformations mesurées en cas de ressuage sont alors largement surestimées par rapport aux déformations réelles

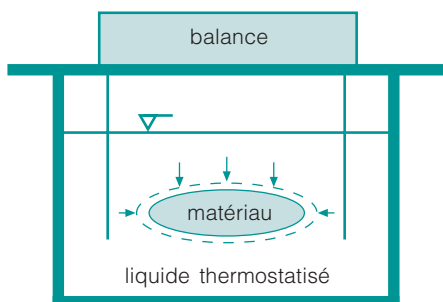


Fig. 7 Dispositif de mesure volumique du retrait endogène au jeune âge (par pesée hydrostatique) [3].

- le contrôle de la température : l'eau a un coefficient de dilatation thermique environ 17 fois plus élevé que celui du béton. Dans le cas d'une variation de température, les variations volumiques du liquide d'immersion sont donc importantes par rapport à celles du matériau étudié et peuvent fausser la mesure
- les pressions : les pressions exercées par le liquide d'immersion et celles créées par la tension de la membrane peuvent, au moins jusqu'à la prise, conduire à un écrasement de la structure. Les déformations mesurées pendant cette période sont alors plus importantes que les déformations endogènes réelles

- l'étanchéité de la membrane : il est important de garantir une bonne étanchéité de la membrane pour éviter que l'eau du bain d'immersion ne pénètre dans la pâte de ciment.

5 COMMENT LIMITER LE RETRAIT ?

Pour empêcher que l'eau ne quitte le béton prématurément et limiter le retrait plastique, une cure efficace doit être réalisée, en isolant le béton des facteurs atmosphériques [6][7].

Dans le cas des bétons ordinaires, le recouvrement des surfaces par des panneaux ou des bâches plastiques, lorsqu'il est possible, est une des techniques utilisées pour assurer une protection adéquate contre le retrait, dont les composantes principales sont le retrait plastique et de séchage.

Par contre, dans le cas des bétons spéciaux (dont le retrait endogène est prépondérant par rapport au retrait de séchage), ces matériaux ne peuvent être utilisés que temporairement. Une fois les risques de retrait plastique éliminés, le recouvrement du béton par des matériaux non imbibés ne présente aucun intérêt pour limiter le retrait endogène et est même

nuisible puisqu'il empêche ou ralentit toute pénétration d'eau susceptible de réduire l'amplitude du retrait endogène.

Les meilleurs moyens d'assurer la maturation de ces bétons spéciaux consistent donc à :

- immerger le béton ou brumiser de l'eau sur sa surface
- recouvrir la surface du béton avec des toiles de jute ou des géotextiles imbibés d'eau.

La maturation à l'eau peut être arrêtée après 7 jours, car une grande partie de l'hydratation aura déjà eu lieu.

Outre ces techniques de cure traditionnelles, d'autres moyens peuvent être envisagés pour limiter le retrait endogène des bétons spéciaux ou en contrôler la fissuration :

- utilisation de nouveaux adjuvants (adjuvants réducteurs de retrait et agents d'expansion)
- incorporation de fibres synthétiques
- techniques de *curing* interne, qui consistent à créer un réservoir d'eau interne pour le béton en ajoutant des granulats légers saturés d'eau ou des polymères superabsorbants.

Ces nouveaux moyens seront évalués dans le cadre d'une recherche menée actuellement au CSTC. ■



BIBLIOGRAPHIE

1. Boivin S.
Retrait au jeune âge du béton, Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2001.
2. Braquenier J.C., Desmyter J.
Le béton autoplaçant ou autocompactant, un béton en plein essor. Bruxelles, CSTC-Magazine, automne 2000.
3. Charron J.P., Marchand J., Bissonnette B.
Early-age deformations of hydrating cement systems : comparison of linear and volumetric shrinkage measurements. Concrete Science & Engineering, Vol. 3, N° 11, 2001.
4. Desmyter J., Dieryck V., Leuridan A.
Les bétons spéciaux. Bruxelles, CSTC-Magazine, printemps 2002.
5. Dreux G., Festa J.
Nouveau guide du béton. Paris, Editions Eyrolles, 7^e édition, 1995.
6. Pien A., Pollet V., Vyncke J.
Cure du béton frais. Bruxelles, CSTC-Magazine, été 1998.
7. Pollet V., Jacobs J.
La cure des bétons. Bruxelles, CSTC-Contact, N°2004/1.
8. Tazawa E., Miyazawa S.
Influence of cement composition on autogenous shrinkage of concrete. Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Suède, 2-6 juin 1997, Vol. 2.