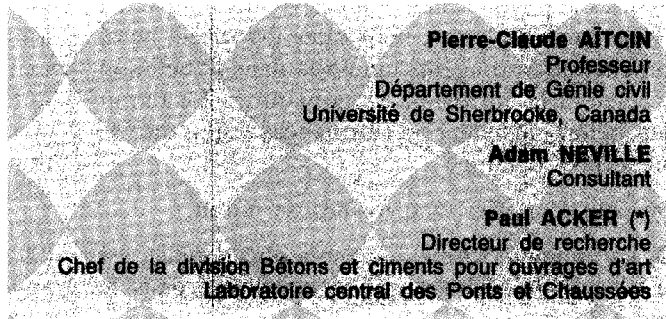


# Les différents types de retrait du béton



**Pierre-Claude AÏTCIN**  
Professeur  
Département de Génie civil  
Université de Sherbrooke, Canada

**Adam NEVILLE**  
Consultant

**Paul ACKER (\*)**  
Directeur de recherche  
Chef de la division Bétons et ciments pour ouvrages d'art  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

*Cet article est la version française d'une présentation qui vient d'être publiée, en anglais, dans le numéro de septembre 1997 de la revue de grande diffusion de l'ACI, Concrete International. Il a été rédigé par Pierre-Claude Aïtcin, avec l'aide d'Adam Neville et de Paul Acker, à partir d'une présentation faite par Paul Acker aux membres de la chaire industrielle sur le béton de l'université de Sherbrooke en janvier 1996. Les trois auteurs ont voulu faire connaître cette vision globale des retraits et la traduire dans un langage pragmatique, tout en tentant de rapprocher les points de vue et la terminologie des communautés scientifiques et technologiques anglophones et francophones des deux côtés de l'Atlantique.*

## Introduction

À première vue, le retrait est un phénomène simple qui correspond à une contraction volumétrique que l'on observe quand du béton se dessèche. Il se développe dans les trois dimensions mais, en général, on ne l'exprime que sous la forme d'une déformation linéaire : en effet, dans la majorité des cas, les éléments structuraux ont une ou deux dimensions nettement plus petites que la troisième, où les effets du retrait sont les plus sensibles. Dans le vocabulaire technique courant, le terme retrait est utilisé à la place de l'expression « retrait de séchage du béton durci exposé à l'air dont le degré hygrométrique est inférieur à 100 % ». Il existe cependant d'autres types de retrait qui, selon les circonstances, peuvent, ou non, se produire de façon simultanée et indépendante les uns des autres. Un des objectifs de cet article est de décrire et d'expliquer ces différents types de retrait d'après leur origine et les mécanismes mis en jeu lors de leur développement. Cet exer-

## RÉSUMÉ

Cet article décrit les effets simultanés de la réaction d'hydratation : gain de résistance, dégagement de chaleur et contraction volumétrique, et traite des différents types de retrait qui peuvent se développer au sein du béton :

- retrait plastique,
- retrait de séchage,
- retrait endogène,
- retrait thermique.

Il présente enfin les effets de chacun de ces retraits sur divers éléments structuraux en béton à hautes performances.

**MOTS CLÉS :** Béton hydraulique - Retrait - Hydratation - Ciment - Béton hautes performances - Résistance (matér.) - Chaleur.

(\*) Depuis le 15 octobre 1997, Responsable Recherche-Développement pour le béton chez Lafarge Ciment.

cice se veut ne pas être purement académique ou savant ; au contraire, il débouche sur un certain nombre de suggestions pratiques dans le but de diminuer les effets quelquefois malencontreux du retrait qui se matérialisent sous forme de fissures [1]. Non seulement ces fissures nuisent à l'apparence du béton, mais elles favorisent aussi la pénétration d'agents agressifs dans le béton et accélèrent la corrosion des armatures. Le retrait des bétons à hautes performances est traité de façon plus détaillée.

On peut identifier cinq formes de retrait.

❶ La première forme, qui est la plus connue, est le **retrait de séchage** qui se développe dans le béton durci.

❷ Cependant, chronologiquement, le retrait de séchage est précédé par le **retrait plastique**, qui se développe dans des bétons qui perdent de l'eau alors qu'ils sont encore à l'état plastique. En général, cette perte d'eau se fait par évaporation dans l'air sec ambiant, mais elle peut être aussi la conséquence d'une absorption par un béton ou un sol sous-jacent sec.

❸ Un troisième type de retrait est celui qui se produit dans du béton qui durcit par suite du développement de la réaction d'hydratation. Étant donné que ce retrait a lieu dans toute la masse du béton et pas seulement dans la partie du béton en contact avec le milieu ambiant, on l'appelle parfois retrait d'autodessiccation et quelquefois aussi retrait chimique. On emploie aussi l'expression **retrait endogène** et c'est l'expression que nous utiliserons par la suite dans cet article.

❹ Le quatrième type de retrait que l'on peut observer dans un béton est une conséquence de la diminution de la température du béton au moment de sa prise, ou juste après, quand les dimensions globales de l'élément ont été fixées. Il vaudrait mieux parler dans ce cas de contraction thermique, mais, pour des raisons d'homogénéité de vocabulaire, on utilisera l'expression **retrait thermique**.

❺ En outre, la réaction de la pâte de ciment hydraté avec le gaz carbonique de l'air en présence d'humidité cause une contraction que l'on appelle le **retrait de carbonatation**.

Quand certaines de ces formes, ou toutes ces formes de retrait se développent dans un béton simultanément ou séquentiellement, on parle alors de **retrait total**.

De façon à saisir les différents mécanismes de retrait, il est nécessaire de bien comprendre le phénomène d'hydratation et ses conséquences physiques, mécaniques et thermodynamiques. Ce n'est que si l'on a une bonne compréhension de ces phénomènes que l'on pourra prendre toutes les mesures appropriées pour réduire les différents types de retrait ou, tout au moins, atténuer leurs effets.

## Hydratation du ciment et retrait endogène

L'expression « réaction d'hydratation du ciment » est une expression globale qui regroupe, en fait, plusieurs réactions chimiques qui se produisent lorsque du ciment entre en contact avec de l'eau. Le résultat pratique des réactions d'hydratation est la formation d'une pâte de ciment hydraté cohésive, qui confère au béton sa résistance. Les réactions d'hydratation qui ont lieu au sein du béton génèrent une certaine quantité de chaleur et sont accompagnées d'une réduction de volume de la pâte de ciment hydraté, contraction que l'on appelle communément la contraction de Le Chatelier. Ainsi, tout développement de résistance à l'intérieur d'un béton est toujours accompagné de deux phénomènes concomitants : un dégagement de chaleur et une réduction du volume de la pâte de ciment ; c'est ce que représente la figure 1 sous forme d'un triangle éternel. Il est important de bien comprendre la nature concomitante de ces trois phénomènes, dont deux - le dégagement de chaleur et la réduction de volume - peuvent entraîner certains problèmes qui peuvent parfois être gênants. En règle générale, ces deux phénomènes sont tout à fait tolérables et les ingénieurs ont appris depuis longtemps à composer avec leurs effets sur les structures en béton. Si le béton était un matériau qui gonfle en s'hydratant, tout en voyant sa température baisser, la tâche des ingénieurs qui voudraient utiliser un tel matériau paraîtrait être beaucoup plus difficile.

Bien que les expressions globales « hydratation du ciment et chaleur d'hydratation » soient très utiles, leur apparente simplicité peut induire en erreur si l'on oublie que le ciment Portland est un matériau multiphasique dont la composition peut

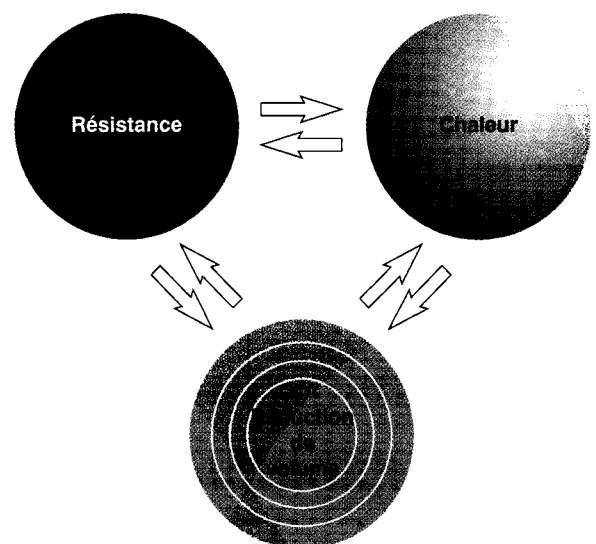


Fig. 1 - Le triangle de l'hydratation : résistance, chaleur, réduction de volume.

varier de façon sensible. De nos jours, comme le ciment Portland est très souvent employé avec d'autres matériaux cimentaires, la situation est encore plus complexe. Cependant, toutes les réactions chimiques qui se produisent sont exothermiques, de telle sorte que la température du béton augmente, sauf si des pertes de chaleur conduisent à des conditions isothermes ou même à une réduction de la température du béton.

Les notations cimentières utilisées sont les suivantes :

- C pour CaO,
- S pour SiO<sub>2</sub>,
- A pour Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,
- F pour Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Les principales phases minérales que l'on trouve dans du ciment sont le silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S), le silicate dicalcique (C<sub>2</sub>S), l'aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) et l'aluminoferrite tétracalcique (C<sub>4</sub>AF) ainsi que du sulfate de calcium, que l'on mélange au clinker pour éviter une hydratation trop rapide du C<sub>3</sub>A. Le ciment contient aussi des composés mineurs et des impuretés tels que des sulfates alcalins, de la chaux libre, de la silice qui n'a pas réagi et de la magnésie ; leur influence n'est pas toujours négligeable.

L'hydratation des deux silicates de calcium conduit à la formation d'un même composé, dont la composition stœchiométrique n'est pas connue de façon précise : le silicate de calcium hydraté, noté de manière abrégée C-S-H. L'hydratation des deux silicates de calcium conduit aussi à la formation de chaux hydratée Ca(OH)<sub>2</sub>, appelée portlandite. En présence d'eau et de sulfate de calcium, le C<sub>3</sub>A se transforme en ettringite (C<sub>3</sub>A . 3CaSO<sub>4</sub> . 32H<sub>2</sub>O) ; quand il n'y a plus de sulfate de calcium, l'ettringite se transforme en monosulfoaluminate (C<sub>3</sub>A . CaSO<sub>4</sub> . 12H<sub>2</sub>O) et libère ainsi une certaine quantité de sulfate de calcium. Quand le sulfate de calcium est totalement épuisé, le C<sub>3</sub>A s'hydrate finalement en aluminate de calcium hydraté stable C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>. Quant au C<sub>4</sub>AF, il réagit également avec le sulfate de calcium, mais plus lentement que le C<sub>3</sub>A, en formant du sulfoaluminate de calcium et du sulfoferrite de calcium, les produits finaux de l'hydratation étant le C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> et le C<sub>3</sub>FH<sub>6</sub>.

La quantité de chaleur dégagée et le développement de la résistance sont influencés par plusieurs facteurs tels que les proportions respectives des quatre principales phases du ciment, sa surface spécifique, la température initiale du béton, la température ambiante durant le développement de la réaction d'hydratation, le volume et la forme des éléments en béton, paramètres qui tous

influencent sur le flux thermique vers l'extérieur. Étant donné que le développement de la résistance et de la température sont affectés par les mêmes paramètres, le développement de la résistance d'un béton peut être suivi par l'évolution de sa température. C'est d'ailleurs ce qui est mis à profit dans les maturimètres.

Il est bon de souligner que la température atteinte par le béton lors de son durcissement a un effet sur sa résistance car, à ce moment-là, les dimensions de l'élément en béton sont fixées.

Puisque les silicates de calcium représentent l'essentiel du ciment Portland, les changements volumétriques qui se produisent durant leur hydratation ont une importance primordiale ; cependant, les considérations suivantes sont encore valables de façon générale lorsqu'il s'agit de la réduction de volume de l'ensemble de la pâte de ciment hydraté.

Si un volume C de ciment réagit avec un volume E d'eau, cette eau étant non évaporable (c'est-à-dire plus ou moins chimiquement liée), le volume résultant P des produits d'hydratation est toujours inférieur à la somme des volumes du ciment et de l'eau :

$$P < C + E$$

Il est assez difficile d'évaluer avec précision cette réduction de volume de la pâte de ciment hydraté, c'est-à-dire de la somme des volumes des produits solides de l'hydratation et de l'espace rempli de gel, à l'exclusion du volume des capillaires. Il y a près de cent ans déjà, Le Chatelier [2] avait estimé que cette réduction de volume était de l'ordre de 8 à 12 % de l'espace original occupé par le ciment anhydre et l'eau qui était destinée à se combiner dans la pâte de ciment hydraté. Il y a presque cinquante ans, Powers [3] a trouvé que la réduction de volume était égale à 0,254 fois le volume d'eau non évaporable, que la quantité d'eau non évaporable représentait environ 23 % de la masse de ciment anhydre (qui a une densité de 3,15) et enfin que la pâte de ciment hydraté avait une porosité caractéristique de 28 %. Si l'on considère alors que 100 g de ciment anhydre s'hydratent complètement, on peut effectuer les calculs suivants [4] :

- masse du ciment anhydre = 100 g
- volume absolu du ciment anhydre  
100/3,15 = 31,7 ml
- masse d'eau non évaporable = 23 g
- volume des produits solides d'hydratation =  
31,7 + 0,23 x 100 (1 - 0,254) = 48,9 ml
- volume d'eau dans le gel  
w / (48,9 + w) = 0,28 donc w = 19 ml

Ainsi, le volume de la pâte de ciment hydraté est  $48,9 + 19 = 67,9$  ml. Si l'on compare cette valeur au volume original du ciment anhydre, de l'eau non évaporable (23 ml) et de l'eau du gel (19 ml) qui totalisent 73,7 ml, on constate que la réduction de volume de la pâte de ciment hydraté est  $(73,7 - 67,9) / 73,7 = 8 \%$ . Cette valeur du retrait endogène correspond à la limite inférieure trouvée par le Chatelier. Cette réduction de volume se développe sous forme de pores très fins, qui sont distribués dans la masse de la pâte de ciment hydraté.

Il est bon de rappeler que, parce que les produits d'hydratation ne peuvent se former que dans des espaces remplis d'eau, seule une partie de l'eau contenue dans les capillaires peut être utilisée pour hydrater le ciment. Pour que la réaction d'hydratation se produise, il faut qu'il y ait suffisamment d'eau pour amorcer les réactions chimiques et remplir les pores de gel. De cette façon, si le rapport eau/ciment de la pâte de ciment hydraté est égal ou supérieur à 0,42, comme dans l'exemple précédent, le ciment Portland pourra complètement s'hydrater. Si, par contre, le rapport eau/ciment est inférieur à 0,42, à un certain moment, il n'y aura plus assez d'eau pour saturer la surface solide des capillaires et l'hydratation du ciment s'arrêtera pratiquement quand la pression partielle de l'eau sera égale à 80 % [5]. C'est ce que l'on appelle l'autodessiccation. Cependant, cette expression n'est correcte que si le béton n'est pas en contact avec une source d'eau extérieure. Une telle situation se produit dans un élément de béton parfaitement scellé ou au cœur d'une grande masse de béton. Dans de tels cas, la réduction de volume de Le Chatelier ou de Powers se développe.

En revanche, si de l'eau extérieure peut pénétrer dans le système, l'hydratation se poursuivra tant qu'il y aura assez d'espace pour que des produits d'hydratation continuent de se former, comme c'est le cas dans un béton mûri à l'eau dont le rapport eau/ciment est inférieur à 0,38. Si un tel béton n'est pas mûri à l'eau, on peut noter que la présence de grains de ciment non hydratés ne constitue pas un désavantage : en fait, les grains de ciment non hydratés constituent un excellent granulats, certes assez onéreux.

Ainsi, quand du béton est mûri continuellement à l'eau, son système capillaire est constamment rempli d'eau, tout au moins dans la partie en contact avec la source d'eau extérieure, si bien que l'hydratation s'y poursuit. En se servant de l'éternel triangle de la figure 1, on conclut que la résistance du béton augmente, que de la chaleur se dégage et que la compacité de la pâte de ciment hydraté augmente tout en aspirant de l'eau.

## Hydratation, résistance et chaleur

Nous allons considérer les deux autres effets concomitants de la réaction d'hydratation :

- l'un mécanique : le développement de la résistance,
- l'autre thermodynamique : la chaleur dégagée, qui nous intéressera lorsqu'on aura à évaluer les effets mécaniques qui en résultent.

### Résistance

Bien que l'on sache que la résistance du béton augmente avec le temps, les causes fondamentales de ces gains de résistance sont plus ou moins bien connues. Même si les progrès réalisés en microscopie électronique à balayage ont permis d'observer de près les changements de phase qui se produisent durant le durcissement du béton, la structure même du silicate de calcium hydraté (C-S-H), responsable de sa résistance, est plus ou moins bien établie. On sait que le C-S-H a une structure en feuillet, mais elle est moins bien connue que celle de deux hydrates voisins : la kaolinite (silicate d'aluminium hydraté) et l'amiante chrysotile (silicate de magnésium hydraté). En outre, on ne comprend pas très bien comment les cristallites de C-S-H sont imbriquées les unes dans les autres pour finalement conférer une certaine résistance à la pâte de ciment et, par conséquent, au béton.

Ce qui est important et incontestable de façon pratique, c'est que la résistance du béton augmente pendant un certain temps. La génération de chaleur qui accompagne ce gain de résistance peut occasionner ou non une augmentation de la température du béton selon les conditions thermodynamiques extérieures. De la même façon, la réduction du volume intérieur (ciment anhydre + hydrates + eau) de la pâte de ciment hydraté peut engendrer ou non du retrait endogène suivant les conditions de mûrissement.

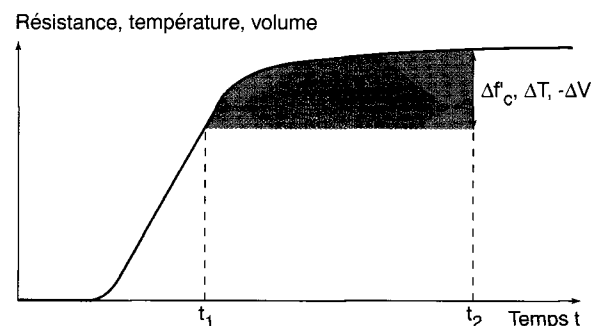


Fig. 2 - Représentation schématique de la variation de la résistance en compression ( $f_c$ ), de la température ( $\Delta T$ ) et du volume de la pâte de ciment hydraté ( $-\Delta V$ ) en fonction du temps dans des conditions adiabatiques.

Si un échantillon de béton est scellé et mûri dans des conditions adiabatiques, durant un certain intervalle de temps, le béton verra sa résistance augmenter, sa température s'élever, et le volume de sa pâte de ciment diminuer. Toutes ces variations se développent qualitativement de la même façon, comme on peut le voir sur la figure 2.

### Chaleur

L'hydratation du ciment est toujours accompagnée du dégagement d'une certaine quantité de chaleur. Cependant, l'amplitude de ce dégagement de chaleur et, surtout, l'élévation de température qui en résulte dépendent de plusieurs facteurs : la quantité de ciment qui s'hydrate, le type de ciment, les propriétés thermiques des granulats, les conditions thermodynamiques au cours de la maturation, la forme et la dimension de l'élément en béton et, dans une moindre mesure, la température du béton au moment de sa mise en place et la température ambiante. Du point de vue thermique, on peut considérer deux situations particulières : un mûrissement isotherme (c'est-à-dire à température constante) et un mûrissement adiabatique (c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur). Cependant, dans la pratique, le béton s'hydrate dans des conditions que ne sont ni isothermes, ni adiabatiques.

Habituellement, on constate une période pendant laquelle l'augmentation de la température du béton est négligeable. Après ce palier, la température du béton augmente de façon plus ou moins rapide et intense. Finalement, l'hydratation se poursuit par une période prolongée durant laquelle la température du béton diminue progressivement pour revenir à la température ambiante. Ces changements de température ont été représentés schématiquement sur la figure 3, qui sera utilisée pour discuter de la manière la plus appropriée de mûrir un béton, si l'on veut atténuer les effets des différents types de retrait qui pourraient s'y développer.

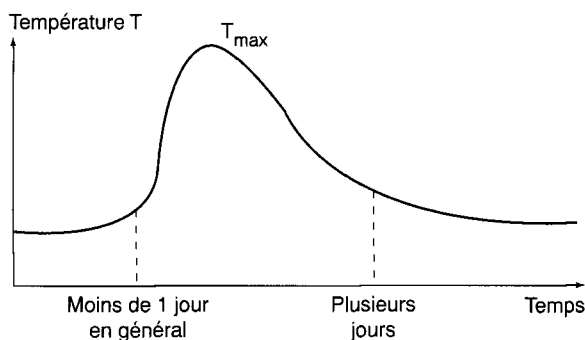


Fig. 3 - Variation typique du béton dans un élément structural.

### Retrait de séchage et retrait endogène

Afin de bien clarifier la situation, nous allons définir ce que nous appellerons le volume apparent d'un élément en béton. C'est le volume compris à l'intérieur de ses surfaces extérieures, sans se préoccuper de sa structure interne ou de sa porosité. Le volume solide, au contraire, correspondra à la partie du volume apparent occupé par de la matière solide : ce terme sera précisé ci-après.

Dans la pâte de ciment hydraté ou en cours d'hydratation, la matière solide est celle constituée des grains de ciment non hydratés, des produits d'hydratation et des pores de gel (remplis d'eau), mais elle ne comprend pas les pores capillaires (qui peuvent être ou ne pas être remplis d'eau). Dans le cas du béton, la matière solide inclut les granulats qui, pour simplifier les choses, seront considérés comme non absorbants (c'est-à-dire comme ayant une porosité nulle).

Alors que la masse de matière demeure constante, le volume qu'elle occupe change et ce, tant que la réaction d'hydratation se poursuit, comme nous l'avons vu précédemment. Par contre, quand du béton se dessèche, l'hydratation ralentit et la perte d'eau se traduit par une diminution du volume apparent suite au développement du retrait de séchage au sein du béton. Le volume apparent peut également changer à cause d'une variation de température, le béton ayant un coefficient de dilatation thermique positif.

Dans un béton très jeune, il se peut très bien que la diminution de volume absolu soit accompagnée d'une augmentation du volume apparent. En fait, ceci se produit quand du béton est placé sous l'eau dès qu'il a été malaxé ; le retrait endogène de la pâte de ciment est alors accompagné d'un gonflement du volume apparent lorsque de l'eau pénètre dans ses pores. Cependant, cette expansion est très faible et se stabilise autour d'une valeur de  $150 \cdot 10^{-6}$  dans des bétons ordinaires, pour des objets de faible épaisseur.

La combinaison du retrait endogène et de l'absence de retrait de séchage des bétons à hautes performances a une très grande importance pratique et sera discutée plus en détail par la suite. Cependant, dès que le béton commence à se dessécher, même à un âge avancé, un retrait de séchage s'y développe.

Parce que le retrait endogène peut être ou non accompagné de retrait de séchage, il est très important de bien comprendre les phénomènes qui sont à l'origine de ces deux formes de retrait. La cause essentielle du retrait de séchage est évidemment l'évaporation de l'eau contenue dans les capillaires de la pâte de ciment hydraté à partir de leurs extrémités exposées à de l'air

ayant un degré hygrométrique inférieur à celui du réseau capillaire. L'eau contenue dans les capillaires, que l'on appelle eau libre, y est retenue par des forces qui sont d'autant plus fortes que les pores capillaires ont un diamètre plus fin. Par conséquent, la perte d'eau est progressive et décroissante, comme on peut le voir sur la figure 4.

La figure 4 montre que la perte d'eau, exprimée en termes de pourcentage du volume apparent du béton, est plus faible lorsque le rapport surface/volume de l'élément de béton est plus faible. Les autres facteurs influençant l'amplitude de la perte d'eau sont la porosité du béton et les caractéristiques du système de pores capillaires dans la pâte de ciment hydraté, telles que la dimension, la forme des pores et leur connectivité, comme nous l'avons déjà mentionné. Le degré hygrométrique de l'air ambiant est aussi un facteur important.

D'un point de vue pratique, ce n'est pas tant le retrait de séchage qui est important, mais plutôt la fissuration qu'il provoque. Des fissures s'ouvrent lorsque les efforts de tension créés dans la pâte de ciment hydraté par les forces capillaires dépassent la résistance à la tension du béton. Le développement du retrait endogène peut aussi créer de la même façon des fissures. Cependant, il y a une différence majeure entre ces deux types de retrait. Le retrait endogène se développe de façon isotrope dans toute la masse du béton, dans la mesure où la distribution des grains de ciment dans le béton frais est homogène. Le retrait de séchage, quant à lui, commence toujours à se développer au niveau de la surface du béton exposée à l'air sec, que ce soit à partir d'une seule ou de toutes les surfaces d'un élément en béton. Les forces de tension, qui apparaissent alors près de la surface, sont équilibrées par des forces de compression intérieures, ces dernières étant libérées chaque fois que la partie extérieure du béton se fissure ou flue [7].

On ne s'étendra pas longtemps sur le retrait de carbonatation qui se développe dans la couche de

béton très mince exposée à l'air dont l'humidité relative est comprise entre 30 et 70 %. Sous l'effet de cycles alternés de séchage et de mouillage, on peut voir se développer à la fois du retrait de carbonatation et du retrait de séchage, ce qui entraîne l'apparition de fissures très fines : ce phénomène est connu sous le nom de faïençage [4].

Les différents types de retrait qui sont décrits dans cet article se produisent dans la pâte de ciment hydraté. En revanche, le béton contient aussi des granulats, qui occupent une grande partie de son volume. Les granulats ne sont soumis à aucun retrait de séchage, endogène ou encore plastique, et une de leur fonction est de résister à la contraction volumétrique de la pâte de ciment hydraté. Cependant, ils n'échappent pas au retrait thermique, bien que leur coefficient de dilatation thermique soit inférieur à celui de la pâte de ciment hydraté. La réduction du retrait de la pâte de ciment hydraté créée par le squelette granulaire est d'une importance capitale : en effet, le béton aurait autrement un retrait d'une telle amplitude qu'on ne pourrait l'utiliser comme matériau de construction. Il faut aussi ajouter que, à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment hydraté, il peut y avoir une certaine incompatibilité au niveau des déformations respectives et que des microfissures peuvent se développer dans cette zone.

Bien qu'en général les granulats d'un béton bien mélangé soient distribués uniformément, la mince couche de béton que l'on retrouve en surface ou derrière les coffrages (la peau du béton) est moins riche en granulats. Par conséquent, près de la surface, le retrait de séchage de la pâte de ciment hydraté est moins contrecarré par le squelette granulaire que celui de la pâte de ciment hydraté située à l'intérieur de l'élément en béton ; ainsi, la peau du béton développe plus de retrait et plus de fissuration que, par exemple, une surface sciée de béton. Cet enrichissement de la peau du béton en pâte de ciment hydraté peut créer des problèmes dans le cas des bétons à hautes performances, qui ont un dosage en ciment plus élevé que les bétons ordinaires et un granulat de plus petit diamètre maximal [8]. La cure des bétons à hautes performances est donc particulièrement importante, comme nous allons le voir par la suite.

## Retrait global et mûrissement

Nous définirons le retrait global ou total comme la somme des différents types de retrait que nous avons considérés individuellement jusqu'à présent : le retrait de séchage, le retrait endogène et le retrait thermique, en n'oubliant pas de compter les fissures induites. Ces différents types de retrait s'additionnent mais, à l'occasion, il peut y avoir une certaine interaction entre eux.

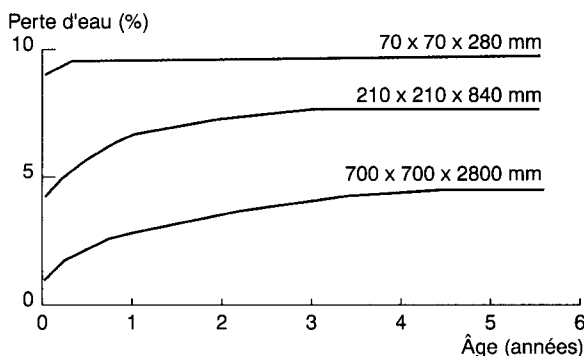


Fig. 4 - Perte en eau (exprimée sous forme de pourcentage de la quantité d'eau totale de malaxage) de prismes de béton de différentes dimensions exposés à l'air et ayant une humidité relative de 55 % [6].

Le retrait plastique, par définition, se développe dans le béton avant sa prise. L'amplitude du retrait de séchage dépend de la quantité d'eau perdue qui, à son tour, dépend de la température, de l'humidité ambiante et de la vitesse du vent. Néanmoins, la vitesse à laquelle se produit cette perte d'eau ne permet pas de prédire l'amplitude du retrait plastique, lequel dépend également de la rigidité du béton frais. En fait, si la quantité d'eau perdue par unité de surface dépasse la quantité d'eau apportée en surface par le ressuage, le retrait plastique peut fissurer la surface du béton. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas des bétons à hautes performances, qui ne ressuent que très peu ou même pas du tout. Nous reviendrons sur ce point par la suite. En utilisant des traitements de mûrissement appropriés, on peut éviter le développement de fissures de retrait plastique. Une nouvelle finition de la surface du béton à un temps approprié peut certes refermer les fissures de retrait plastique qui s'y sont initialement développées. Cependant, si la surface continue à se dessécher, les vieilles fissures pourront se réouvrir et l'on pourra même voir d'autres fissures apparaître sous forme de fissures de retrait de séchage.

Le développement du retrait de séchage et du retrait endogène peuvent être retardés par une cure prolongée à l'eau, qui peut éviter l'apparition de fissures. La cure humide doit débuter dès que l'hydratation du ciment commence, ceci étant particulièrement important dans le cas des ciments qui durcissent vite et des bétons à hautes performances.

Pour réduire le plus possible le développement du retrait endogène, la cure humide doit se prolonger suffisamment longtemps pour que le béton atteigne une résistance en tension suffisante pour résister à la fissuration. Il n'y a aucune contradiction à traiter un béton à l'eau le plus longtemps possible, car l'augmentation de la résistance à la compression du béton est une fonction directe de la durée de maturation, ou maturité.

Pour éliminer le retrait de séchage, il n'est pas toujours indispensable d'avoir une source d'eau extérieure qui alimente continuellement le béton. Il est seulement nécessaire, dans certains cas, d'éviter que l'eau contenue dans le béton ne s'évapore. C'est pourquoi l'application d'une membrane imperméable est alors suffisante. Ceci représente évidemment un coût additionnel qui peut être justifié ou non par la conséquence de l'apparition de fissures dans le béton. Cette justification doit se faire en termes de durabilité, plus qu'en termes d'esthétique.

Il est aussi bon de rappeler que le traitement à l'eau a un effet de refroidissement. Sur la figure 5, on trouve le type de cure le plus approprié au cours du développement de la réaction d'hydratation.

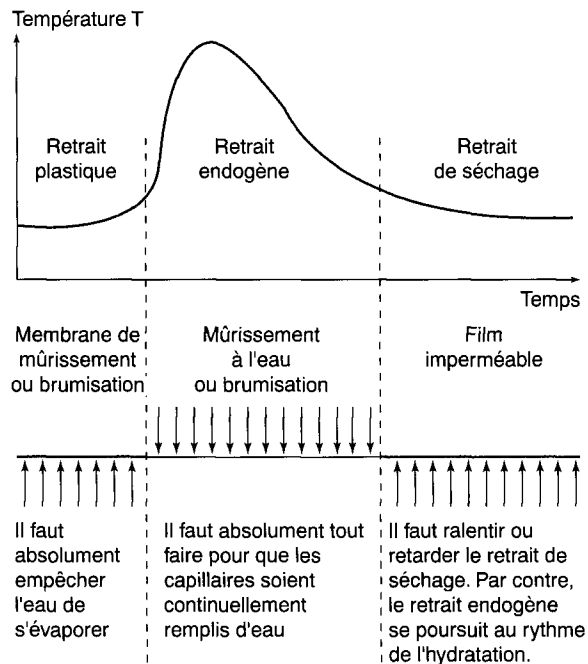


Fig. 5 - Représentation schématique d'un mode de cure idéal.

On peut utiliser une membrane de protection, une brumisation, ou le noyage sous l'eau pour éviter le développement de retrait plastique juste après la mise en place du béton. Par contre, durant la période pendant laquelle la température du béton s'élève puis décroît, il est absolument impératif de ne traiter le béton qu'à l'eau sous forme de brumisation ou de noyage. Lorsque la cure à l'eau est terminée, il faut alors appliquer un film imperméable pour éviter la dessiccation du béton.

La mise en application de ces différents types de traitement peut être difficile dans la pratique, car, par tradition, la cure du béton est très négligée, pour ne pas dire inexistante, bien que tous les devis contiennent toujours des clauses très précises la concernant. La meilleure façon de remédier à une telle situation est de demander à l'entrepreneur de chiffrer exactement toutes les dépenses occasionnées par la cure du béton et de s'assurer de leur mise en application avant de la payer. Bien que cette solution puisse représenter un coût initial additionnel pour le maître d'ouvrage, une telle approche conduira à des économies substantielles à long terme pour ce dernier puisqu'elle augmentera incontestablement la durabilité de sa structure tout en améliorant son apparence. Une telle procédure a déjà été appliquée avec succès au Québec. On n'insistera jamais assez sur l'importance de la cure.

Est-il absolument nécessaire d'effectuer une cure humide ou suffit-il d'appliquer une membrane de protection sur les surfaces du béton ?

Si le rapport eau/ciment est supérieur à 0,42, la quantité d'eau contenue dans le béton est suffi-

sante pour assurer l'hydratation complète du ciment, si bien que la pose d'une membrane est tout à fait suffisante pour permettre au béton de mûrir convenablement. Malgré une diminution de volume de la pâte de ciment hydraté, comme nous l'avons montré précédemment dans cet article, le retrait endogène d'un béton ayant un rapport eau/ciment supérieur à 0,42 est négligeable, car ce sont essentiellement les gros capillaires qui se vident. On peut même ajouter que plus le rapport eau/ciment est élevé, moins le béton souffrira d'un manque de maturation. En revanche, une fois que la membrane aura perdu de son efficacité, le retrait de séchage commencera à se développer et il sera d'autant plus élevé que le béton aura un rapport eau/ciment élevé.

Si le rapport eau/ciment est inférieur à 0,42, un retrait endogène se développera très rapidement malgré la présence d'une membrane de mûrissement. Quand la membrane aura cessé d'être effective, le retrait de séchage se développera également, mais il sera très faible.

Ce n'est donc que lorsque le rapport eau/ciment est supérieur à 0,42 que l'on peut envisager d'utiliser une membrane pour prolonger la période de cure à l'eau du béton. À l'inverse, puisqu'on utilise de plus en plus des bétons à hautes performances ayant de très faibles rapports eau/ciment (inférieurs à 0,42), la cure à l'eau devient essentielle.

## Le retrait dans les bétons à hautes performances

Pour s'assurer de la durabilité d'une structure en béton, il est non seulement nécessaire de sélectionner des ingrédients appropriés, et de bien les proportionner pour fabriquer un béton de qualité, mais il faut aussi assurer au béton un traitement adéquat. L'utilisation d'un béton à hautes performances ne garantit que les deux premières conditions, mais il est indispensable de ne pas oublier que ce type de béton est particulièrement exigeant en termes de maturation, si l'on veut éviter tous les inconvénients occasionnés par un trop grand retrait prématuré pour les raisons suivantes.

❶ Tout d'abord, les bétons à hautes performances ne ressentent pratiquement pas. Comme nous l'avons déjà signalé, cette situation est tout à fait propice au développement du retrait plastique.

❷ Deuxièmement, les bétons à hautes performances produisent en général une importante quantité de chaleur pouvant engendrer l'apparition de grands gradients de température, particulièrement dangereux lors du refroidissement.

❸ Troisièmement, les bétons à hautes performances voient leur hydratation se développer très rapidement, ce qui entraîne une forte autodesiccation.

Comme le rapport eau/ciment des bétons à hautes performances est très faible, il faut absolument éviter de n'utiliser qu'une membrane comme seul moyen de cure, car elle peut empêcher par la suite toute pénétration d'eau extérieure au sein du béton, ce qui est crucial dans le cas des bétons à hautes performances pour éviter de voir s'y développer très rapidement un retrait endogène important. Les exigences quant à la durée d'une cure humide dépendent des circonstances particulières qui prévalent sur le chantier, comme on le verra dans les exemples ci-après.

### Cas des grosses colonnes

Considérons la colonne massive de la figure 6 qui a, par exemple, une section de 1 m x 1 m et une hauteur de 2,5 m, et examinons le retrait du béton en trois endroits particuliers :

- le point A situé au centre de la colonne,
- le point B placé au centre d'une face de la colonne,
- le point C localisé à la partie supérieure de la colonne.

• En A, au cœur de la colonne, il n'y a pas de retrait plastique ou de séchage possible, même après plusieurs dizaines d'années. En revanche, en ce point, le retrait thermique sera le plus important, car la température atteinte par le béton y sera la plus élevée. Il est assez facile de calculer l'intensité du retrait thermique en A à partir des caractéristiques thermodynamiques du béton, des propriétés isolantes des coffrages et de la température ambiante. Le calcul du retrait endogène n'est pas aussi facile, mais, dans une colonne ayant les di-

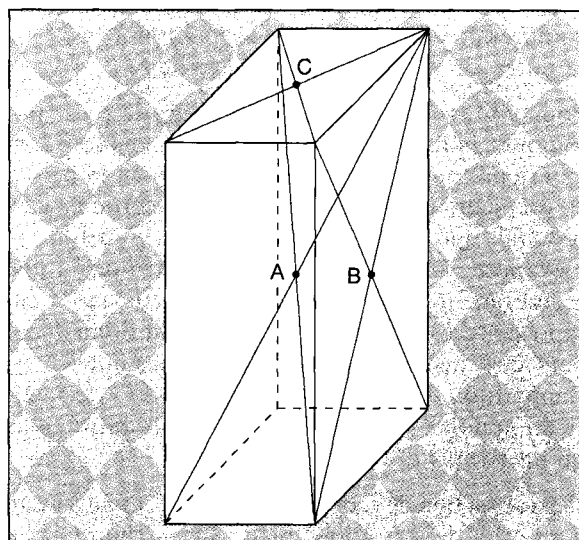


Fig. 6 - Représentation d'une colonne de grandes dimensions.



mensions citées précédemment, on a trouvé que ce retrait était de  $250.10^{-6}$  après quatre jours et qu'il n'avait augmenté que de  $30.10^{-6}$  durant les quatre années suivantes [9]. Étant donné que l'hydratation rapide du ciment en A est accompagnée de gains rapides de résistance en tension, le risque de fissuration y est négligeable.

- **En B**, il n'y a pas de retrait plastique. Par contre, si aucun traitement à l'eau n'est prévu après l'enlèvement des coffrages, le retrait de séchage s'y développera rapidement ; il était égal à  $330.10^{-6}$  sur la colonne précitée [9]. En outre, le béton présente aussi un retrait endogène et un retrait thermique. Le retrait thermique en B est plutôt réduit, cependant son amplitude dépend des gradients thermiques qui se développent dans le béton, lesquels sont fonction des propriétés isolantes des coffrages : plus les coffrages ont de bonnes propriétés isolantes, plus les gradients seront faibles. Il vaut donc mieux utiliser des coffrages en contre-plaqué ou des coffrages d'acier isolé plutôt que des coffrages d'acier nu. Si l'on veut limiter les effets du retrait endogène en B, il suffit de desserrer le plus rapidement possible les coffrages afin de pouvoir démarrer au plus vite une cure humide. Si cette cure se poursuit pendant sept jours, le béton aura pratiquement atteint les trois-quarts de sa résistance en tension finale de telle sorte que, lorsque le traitement cessera et que le retrait de séchage commencera à se développer, le béton sera assez résistant vis-à-vis des effets du retrait de séchage. En revanche, dans le cas où aucun traitement n'a été appliqué et que le seul traitement reçu a consisté à maintenir les coffrages en place, on n'aura finalement que retardé l'apparition du retrait de séchage, et rien fait pour éliminer le retrait endogène qui se sera développé en totalité.

- **En C**, on peut voir se développer très facilement du retrait plastique, du retrait de séchage et du retrait endogène. Par contre, c'est en ce point qu'il est le plus facile de protéger adéquatement le béton. Dès la surface du béton finie, on peut appliquer une membrane de protection, à condition de l'enlever par la suite avant que le ciment ne commence à s'hydrater ou on peut vaporiser de l'eau au-dessus du béton mais, dès que le béton a entamé sa prise, il est impératif de le traiter à l'eau.

### Cas de grosses poutres

Ce sont des poutres dans lesquelles la plus petite dimension est supérieure à 300 mm, de telle sorte qu'en leur centre la température atteinte par le béton peut être élevée. Nous allons encore examiner le retrait du béton en trois endroits différents : en A au centre de la poutre, en B à sa surface inférieure et en C à sa surface supérieure (fig. 7).

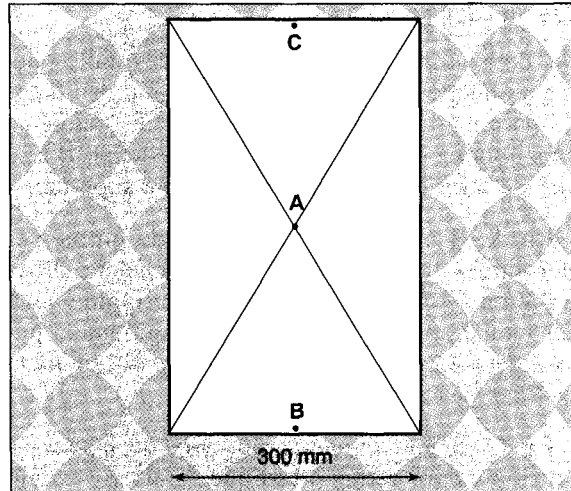


Fig. 7 - Section d'une grosse poutre.

- **En A**, la situation est très semblable à la situation précédente au même point, à l'exception du retrait thermique qui est plus faible.
- **En B**, la situation est critique car, en plus des effets du retrait, il y aura celui des contraintes de tension par suite de la déflexion de la poutre lorsqu'elle sera chargée. En outre, les coffrages demeurent en place suffisamment longtemps (pour éviter toute déflexion excessive à cause du poids propre de la poutre), de telle sorte que le retrait endogène s'y développe intégralement. Il faut absolument commencer un traitement qui fournit un apport d'eau.
- **En C**, la situation est semblable à celle des grosses colonnes et la fissuration due aux différentes formes de retrait qui pourraient s'y produire sera annulée par un traitement adéquat à l'eau.

### Cas de petites poutres

Par petite poutre, nous entendons évidemment une poutre ayant sa plus petite dimension inférieure à 300 mm. On étudiera également le retrait en A, B et C aux mêmes endroits que pour les grosses poutres. Dans une telle poutre, les effets thermiques sont en général négligeables, si bien que la nature des coffrages a moins d'importance. Cependant, en B, le retrait endogène peut avoir des effets très néfastes de sorte qu'il faudra y appliquer le même type de cure à l'eau que dans le cas des grosses poutres.

Le problème le plus sérieux que l'on rencontre dans le cas de petites poutres est celui du retrait de séchage : la valeur élevée du rapport surface/volume facilite beaucoup l'évaporation de l'eau du béton. L'application d'un film imperméable (après un traitement à l'eau adéquat) peut s'avérer très utile.

### Cas de dalles minces

Par dalle mince, nous entendons des dalles qui ont moins de 200 mm d'épaisseur (fig. 8). Nous allons encore considérer le retrait du béton en trois points : en A au centre de la dalle, en B à sa surface inférieure et en C à sa surface supérieure.

- En A, B ou C, il n'y aura pas de problèmes thermiques majeurs parce que la chaleur d'hydratation se dissipe régulièrement et rapidement. Les températures en ces points n'augmentent pas considérablement et ne diffèrent pas tellement les unes des autres.

- En C, il faut éviter à tout prix de laisser se développer un retrait plastique, mais il ne faut pas oublier que le retrait endogène et le retrait de séchage peuvent aussi s'y produire de façon considérable. Cependant, on peut prendre très rapidement des procédures adéquates de traitement à l'eau, semblables à celles préconisées pour la partie supérieure des grosses colonnes.

Il faut souligner que, s'il est assez facile de traiter de manière adaptée des dalles minces, la moindre carence peut être catastrophique.

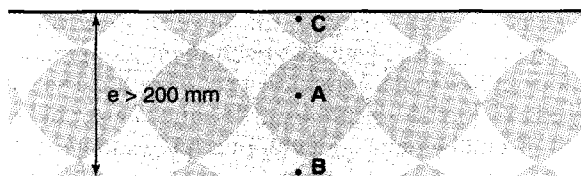


Fig. 8 - Dalle de faible épaisseur.

### Cas de dalles sur sol

Si la dalle est mince et qu'elle est placée sur un sol humide, la partie inférieure de la dalle mûrit dans des conditions idéales et aucun retrait de séchage ne s'y développera. Par contre, on verra apparaître très vite un retrait endogène et un retrait de séchage à la surface de la dalle, si aucun traitement à l'eau n'est mis en place. La différence de déformation longitudinale entre la partie supérieure et la partie inférieure de la dalle amène un gauchissement de la dalle et l'on voit les bords et les coins se relever. On peut réduire un tel gauchissement en plaçant une couche drainante sous la dalle, ou au contraire en installant une membrane imperméable empêchant le béton de s'imbiber d'eau.

Pour des dalles épaisses, de plus de 300 mm d'épaisseur, on voit se développer des gradients thermiques élevés à la partie supérieure et inférieure de la dalle. Une température élevée à la base de la dalle conduit, en outre, à une hydratation plus rapide du béton et au développement plus rapide de la résistance, ce qui contribue à diminuer le fluage [6] de telle sorte que les contraintes thermiques qui apparaissent lors du refroidissement ne sont pas bien relâchées, provoquant la fissuration du béton.

Pour toutes ces raisons, pour des dalles épaisses, il faut absolument chercher à diminuer la chaleur d'hydratation du ciment en utilisant un ciment à faible chaleur d'hydratation et en lui substituant des matériaux cimentaires supplémentaires. Il est également utile d'abaisser la température du béton frais en employant de l'eau froide ou de la glace broyée, ou des granulats prérefroidis. Dans les ciments chauds, placer le béton la nuit quand la température ambiante est la plus faible peut s'avérer judicieux. Quelquefois, on peut aussi refroidir la base de la dalle.

Les différents cas que nous avons envisagés ci-dessus illustrent la nature complexe des problèmes de retrait en ce qui concerne les bétons à hautes performances. Dans chacun d'eux, nous avons suggéré des mesures appropriées pour atténuer les effets du retrait. Ces mesures peuvent être adaptées à d'autres situations.

### Conclusion

Lorsque l'on comprend bien la nature des différents types de retrait qui peuvent se développer dans un béton et le mécanisme de leur développement dans diverses circonstances, on peut planifier la mise en application de mesures adéquates pour minimiser les conséquences néfastes du retrait. Par le passé, quand les bétons avaient des rapports eau/ciment élevés, les conséquences d'un mauvais mûrissement n'étaient pas trop catastrophiques, sauf dans des cas extrêmes. Cependant, avec l'utilisation croissante des bétons à hautes performances, qui peuvent être très rapidement (en moins de 24 h) le siège d'un phénomène de retrait endogène très sérieux, il est absolument essentiel de contrôler le retrait global du béton par un traitement à l'eau adéquat.

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ACKER P., MORANVILLE-REGOURD M. (1991), *Physicochemical mechanisms of concrete cracking*, Science of Concrete, vol. II, chapitre 7, J. Skalny Editor, American Ceramic Society, pp. 149-183.
- [2] LE CHATELIER H. (1904), *Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques*, Dunod, Paris, pp. 163-167.
- [3] POWERS T.C. (1958), Structure and physical properties of hardened Portland cement paste, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 41, pp. 1-16.
- [4] NEVILLE A.M. (1995), *Properties of concrete*, 4th edition, John Wiley, New York, Longman, Angleterre, 844 pages.

- [5] POWERS T.C. (1947), *A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete*, Proceedings of the Highway Research Board, vol. 27, pp. 178-188.
- [6] L'HERMITE R.-G. (1978), Quelques problèmes mal connus de la technologie du béton, *Il Cemento*, vol. 75, pp. 231-246.
- [7] NEVILLE A.M., DILGER W. BROOKS J.J. (1983), *Creep of plain and structural concrete*, Longman, Angleterre, 361 pages.
- [8] AİTCIN P.C., NEVILLE A.M. (1993), High-performance concrete demystified, *Concrete International*, vol. 15, 1, pp. 21-26.
- [9] DALLAIRE É., LESSARD M., AİTCIN P.C. (1996), *Ten year performance of high-performance concrete used to build two experimental columns*, ASCE Structures Congress, High Performance Concrete Columns, Chicago, avr., 10 pages.
- 

#### **ABSTRACT**

##### **The different types of concrete shrinkage**

P.-C. AİTCIN - A. NEVILLE - P. ACKER

This paper describes the simultaneous effects of the hydration reaction - gain in strength, emission of heat and volumetric contraction - and covers the different types of shrinkage which can occur within the concrete - drying shrinkage, endogenous shrinkage and thermal shrinkage. Finally it describes the way each of these types of shrinkage affects a variety of high performance concrete structural members.