

## LE RETRAIT DANS LE BETON JEUNE EN COURS DE DURCISSEMENT

La transition relativement courte entre le béton frais et le béton durci constitue une phase critique pendant laquelle les propriétés durables du matériau se développent progressivement. Le béton frais passe en un laps de temps de  $\pm 2$  heures ("**béton vert**") de la phase fluide à la phase thixotropique caractérisée par une grande déformabilité. Durant les premières 24 heures ("**béton très jeune**") la fluidité diminue de manière continue, de même que la déformabilité. A ce stade-ci la résistance à la traction est toutefois pratiquement inexistante, ce qui entraîne un risque de fissuration élevé. Ensuite la résistance augmente et donc aussi la résistance aux contraintes de traction ("**béton jeune**"). Après quelques jours on parle de "béton durci".

Le risque de fissuration le plus élevé se situe dans les phases "béton très jeune" et "béton jeune", en raison des différents processus qui se déroulent dans le béton même, et de l'interaction avec l'environnement.

Les problèmes qui se manifestent à ces stades-là suscitent un vif intérêt, autant dans les milieux de recherches interdisciplinaires que dans la pratique courante de la construction.

La **fissuration à l'état plastique** et **l'influence de la chaleur d'hydratation** feront ci-après l'objet d'une attention particulière. Surtout ce dernier aspect a connu de nouveaux développements importants au cours des dernières années, notamment en raison de l'automatisation et de l'industrialisation poussées du processus de construction, ainsi que sous l'impulsion d'une prise de conscience croissante en ce qui concerne la durabilité. Dès lors, le moment est venu de mettre ces concepts en pratique.

Les domaines d'applications de ce bulletin concernent principalement :

- les **dalles horizontales** planes (routes, sols industriels - intérieurs et extérieurs- , tabliers de ponts,...) exposées à une forte évaporation d'eau;
- les **éléments massifs** (murs de quais, barrages, éléments de tunnels immergés, ...), où la chaleur d'hydratation peut mener à des fissures précoces.

Les fissures pouvant apparaître dans ce contexte ne sont pas toujours innocentes. A la surface elles peuvent parfois s'étendre dans toutes les directions, ce qui permet aux substances agressives d'agir plus ou moins librement.

Ici, le **savoir-faire** n'est pas seulement un remède **simple**, c'est également le **seul remède**.

La fissuration traitée dans ce bulletin n'a aucun rapport avec la fissuration fonctionnelle du béton armé et précontraint qui est maîtrisée par les règles de calcul.



## LE PROCESSUS D'HYDRATATION

La réaction exothermique entre l'eau et le ciment forme, en raison de la liaison chimique de l'eau, des produits d'hydratation (gel) qui font grossir les grains de ciment. Au début, ces produits ralentiront le processus de réaction. Cette période latente peut être influencée fortement par des adjuvants (accélérateurs ou retardateurs). Mais après un certain temps, le processus est accéléré, la surface spécifique grandit sensiblement, et les fronts d'hydratation se transforment en une structure ("percolante") continue (fig. 1). Cette microstructure en évolution constitue la base de la résistance qui est en train de se développer. Elle est également prépondérante pour l'accessibilité aux substances agressives et pour la rigidité du béton.

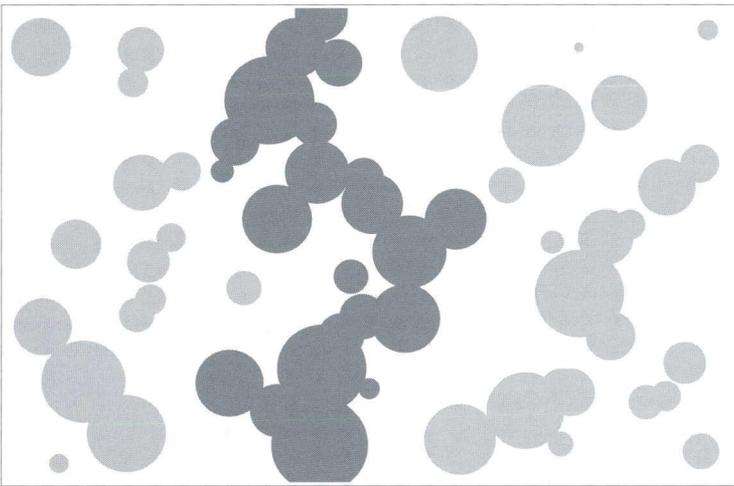


Fig. 1: Formation d'un "agglomérat percolant" suite à l'hydratation des grains de ciment

Dans la modélisation moderne assistée par ordinateur, ce processus est simulé par le concept du degré d'hydratation qui décrit le durcissement de manière univoque. Le degré d'hydratation est alors défini comme le rapport entre la quantité de ciment déjà hydraté et la quantité de ciment initialement présente dans le mélange.

Les réactions chimiques d'hydratation sont très complexes. Le rapport eau-ciment (E/C) y joue un rôle important. Une partie de l'eau de gâchage ( $\pm 40\%$  de la masse de ciment) est liée chimiquement et physiquement. Lors de ces réactions, des cavités capillaires naissent du fait que le volume de l'agglomérat percolant solide est inférieur à la somme des volumes individuels d'eau et de ciment. Comme il faut toutefois plus d'eau pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée, les cavités capillaires se remplissent d'eau "interstitielle" pouvant éventuellement s'évaporer par la suite (retrait). Plus la quantité d'eau présente est grande, plus la distance entre les grains de ciment augmente. La microstructure évolue moins vite et le béton devient plus poreux.

La chaleur d'hydratation dégagée s'accumule dans les constructions massives et peut être à l'origine d'un retrait thermique. La vitesse de développement de la chaleur joue un rôle déterminant.

Durant le processus d'hydratation, la déformabilité diminue sensiblement et l'allongement à la rupture (la déformation à laquelle se produit la rupture) atteint sa valeur minimale (fig. 2). Dans cette phase, la résistance est encore très faible (période critique), si bien que la dessiccation et les effets thermiques peuvent entraîner des fissurations.

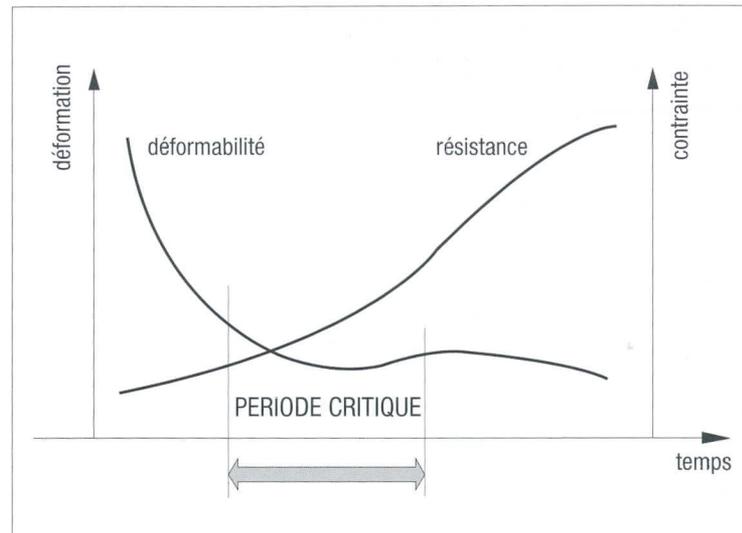
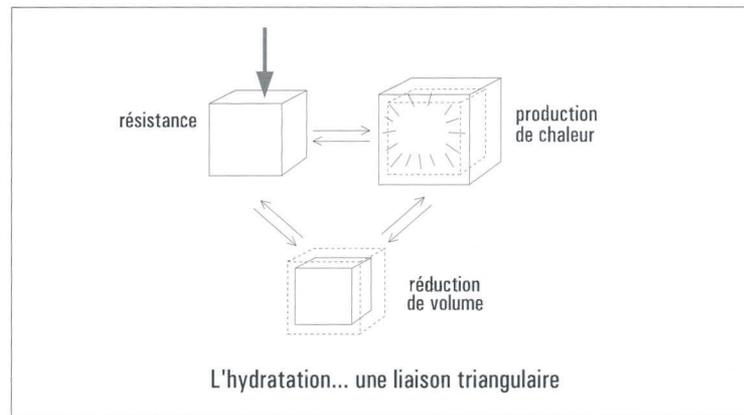


Fig. 2: Déformabilité et résistance pendant la première phase de l'hydratation

## LES MECANISMES DE RETRAIT ET LEURS CAUSES



Par "retrait" on comprend en général (et en simplifiant) le retrait par dessiccation (voir ci-après) du béton durci exposé à l'air ayant une humidité relative  $< 100\%$ .

Ce phénomène n'est pas examiné plus en détail dans le cadre de ce bulletin, étant donné que l'interaction avec le développement de la résistance y est dominante - interaction qui est moins importante pour le béton en phase plastique.

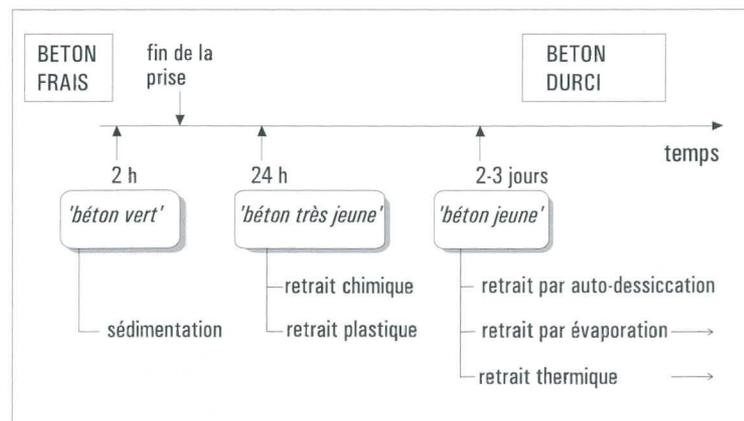


Fig. 3: Présentation schématique des phénomènes engendrés par les modifications dans le transport d'humidité. Les termes mentionnés sont définis ci-après.

## LE RESSUAGE (*BLEEDING*) PAR SEDIMENTATION

Le béton fraîchement coulé a tendance à libérer son eau. Sous l'effet de la pesanteur et du compactage, les composants plus lourds du béton se tassent dans la pâte de ciment aqueuse, poussant l'eau vers le haut. Un film d'eau se forme à la surface. Son étendue dépend principalement de la composition du béton, de la consistance et de la teneur en eau du béton frais, ainsi que de la hauteur de la colonne de béton.

Ce phénomène peut entraîner un tassement du squelette du béton, et être à l'origine de fissures (type A, B ou C - fig. 4). Cependant, tant que le béton garde une déformabilité suffisante, aucune fissuration typique n'est à craindre.

Le ressuage et la sédimentation ne sont pas dus à un mauvais compactage. La cause se trouve principalement dans le mélange du béton, dans une composition inadéquate. D'autres facteurs d'influence sont repris au tableau 1.

Les fissures de tassement peuvent être éliminées par **recompactage** (en dessous de la nappe d'armature). Ce recompactage ne doit toutefois pas se faire trop tôt, mais juste avant que l'aiguille vibrante ne laisse des traces, soit jusqu'à 2 à 3 heures après le coulage du béton.

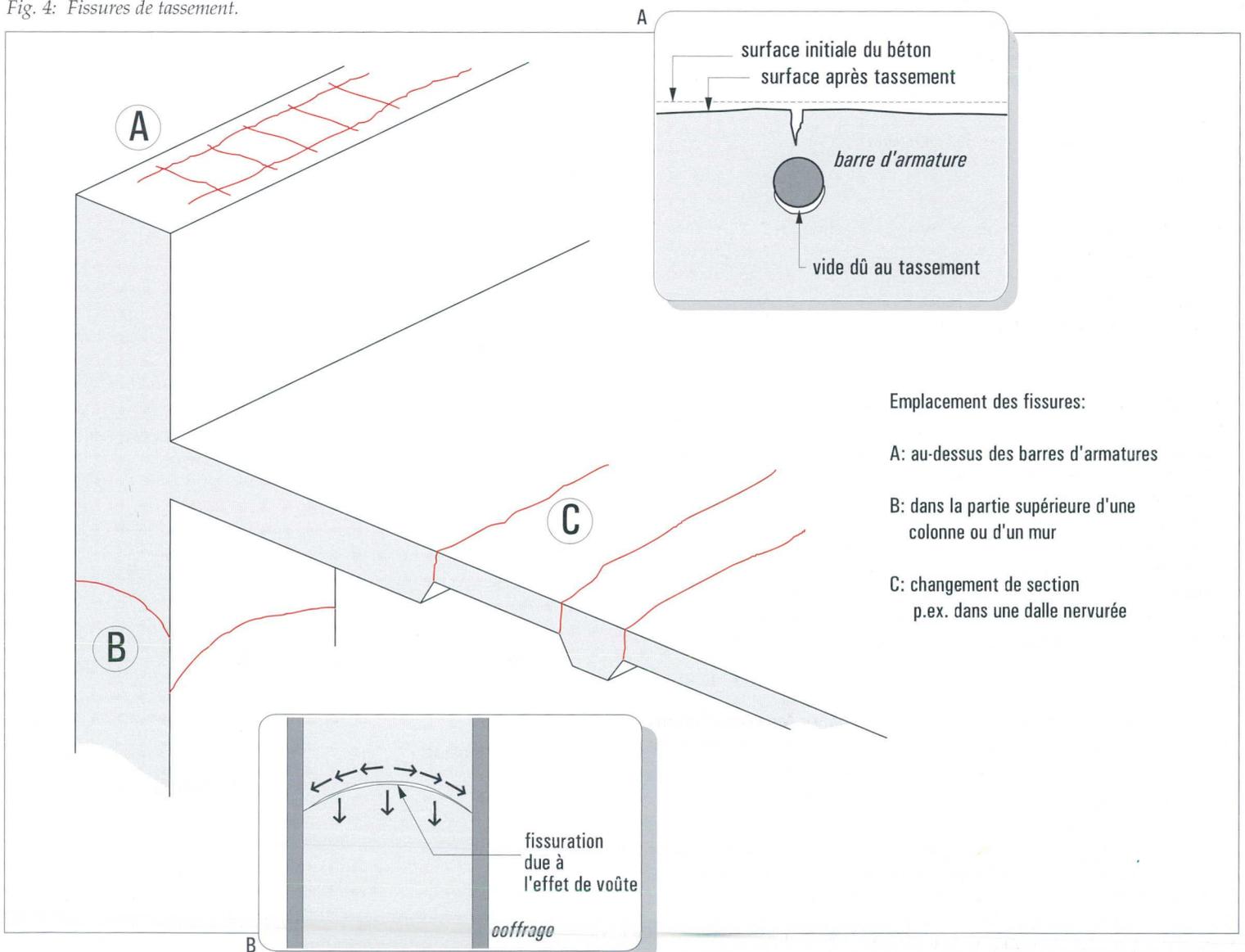
POSITIF	NEGATIF
<ul style="list-style-type: none"> <li>ajout de plastifiant et/ou d'entraîneur d'air</li> <li>ajout de matériaux extrafins</li> <li>ajout de fibres (polypropylène ou acier)</li> <li>UNE BONNE COMPOSITION (continue) DU BETON</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>forte évaporation à la surface</li> <li>teneur en eau plus élevée</li> <li>ajout d'un retardateur</li> <li>température ambiante basse</li> <li>construction massive</li> </ul>

Tableau 1: Facteurs d'influence sur le ressuage et la sédimentation.

Les fissures de tassement au-dessus de l'armature (type A - fig. 4) sont les plus courantes, surtout dans le cas de sections de béton épaisses. Un recouvrement de béton suffisant au-dessus de l'acier évite beaucoup de désordres. Parfois une délamination horizontale peut apparaître (formation d'une fissure horizontale au droit de l'armature) causant une diminution de l'adhérence. Dans tous les cas, il faut veiller à ne pas mettre directement les armatures en vibration.

Pour clore ce chapitre il faut signaler qu'un ressuage important peut également entraîner une fissuration plastique.

Fig. 4: Fissures de tassement.



## LE RETRAIT PLASTIQUE

Le retrait plastique se produit quand de l'eau de gâchage s'évapore d'un béton en phase plastique. Dès que l'eau de ressuage a disparu, le béton se dessèche à la surface. La pression dans les capillaires remplis d'eau baisse, provoquant une diminution du volume et le développement de contraintes de traction dans la masse durcissante qui peuvent entraîner des fissures.

Un phénomène similaire peut être déclenché par un support très absorbant (assise de fondation, coffrage, ...).

Il est évident que la dessiccation en question se poursuit encore longtemps dans le béton durci; on parle dans ce cas de "retrait de dessiccation" (voir ci-après). Le retrait plastique peut cependant être 10 à 20 fois plus important que le retrait de dessiccation.

L'abaque de la fig. 5 illustre entre autres l'influence très significative de la vitesse du vent sur l'évaporation.

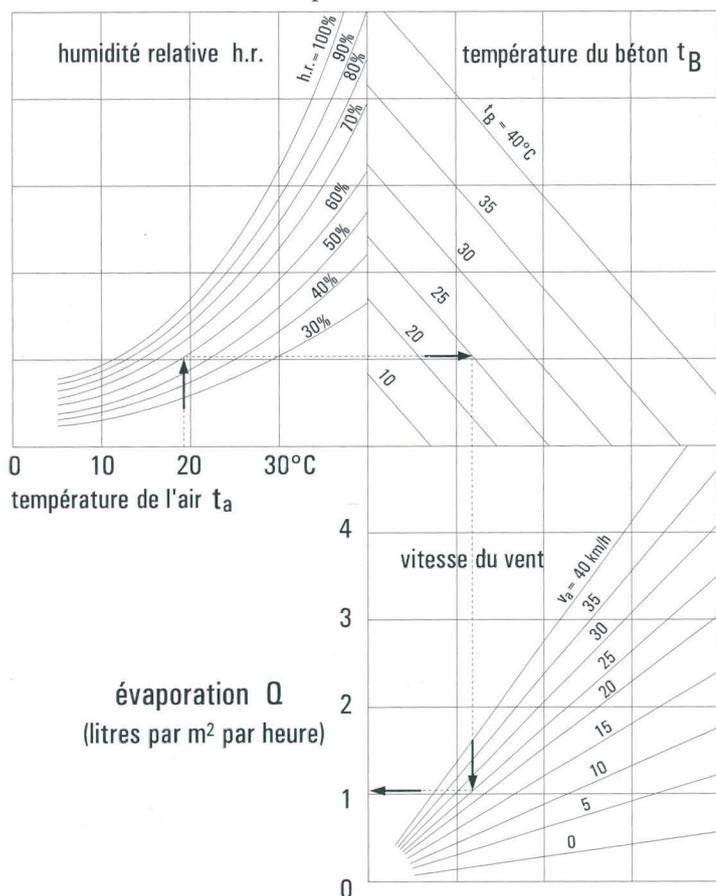


Fig. 5: Influence du milieu ambiant sur la vitesse d'évaporation.

La différence de température entre l'air et le béton joue également un rôle important, par exemple en hiver après un malaxage prolongé dans le camion-mixer. Il est évident que le retrait plastique n'est pas uniquement à craindre en période de forte chaleur. La figure 5 (fissures D et E) démontre clairement que surtout les bétons durcissant à l'extérieur doivent être protégés contre le retrait plastique.

Les fissures du type D apparaissent sur des revêtements exposés au vent: elles se manifestent en groupes parallèles, perpendiculaires à la direction du vent dominant (le plus souvent de l'ouest).

Attention: en général les sols industriels intérieurs sont également exposés au vent (courants d'air!).

L'exemple démontre que par m<sup>2</sup> et par heure un litre d'eau peut s'évaporer du béton. Il ne faut pas perdre de vue qu'il s'agit ici uniquement de la couche supérieure de quelques centimètres qui ne contient que ± 4 litres d'eau par m<sup>2</sup>.

La période critique intervient, pour des conditions moyennes en Belgique, environ 4 heures après le coulage du béton.

Bien que les fissures en question soient parfois «vilaines» (ouverture supérieure jusqu'à environ 2 mm) et qu'elles se propagent souvent à travers la section complète de l'élément en béton, leur ouverture décroît très rapidement dans le sens de la profondeur de l'élément. Néanmoins, une armature proche de la surface pourrait ainsi être exposée à la corrosion. De plus, l'influence éventuellement cumulée du retrait de dessiccation et de la contraction thermique peut avoir des conséquences plus graves.

Généralement, les fissures de retrait plastique ne s'étendent pas jusqu'aux extrémités de la dalle, parce qu'à cet endroit les déformations sont possibles. Cela les distingue clairement des fissures dues au retrait de dessiccation.

Il n'est pas toujours possible de distinguer les fissures de retrait plastique (type F - fig. 6) des fissures dues au ressuage. Les fissures atteignant toute l'épaisseur de la dalle sont généralement une indication de retrait plastique, ayant pour conséquence une orientation suivant les armatures.

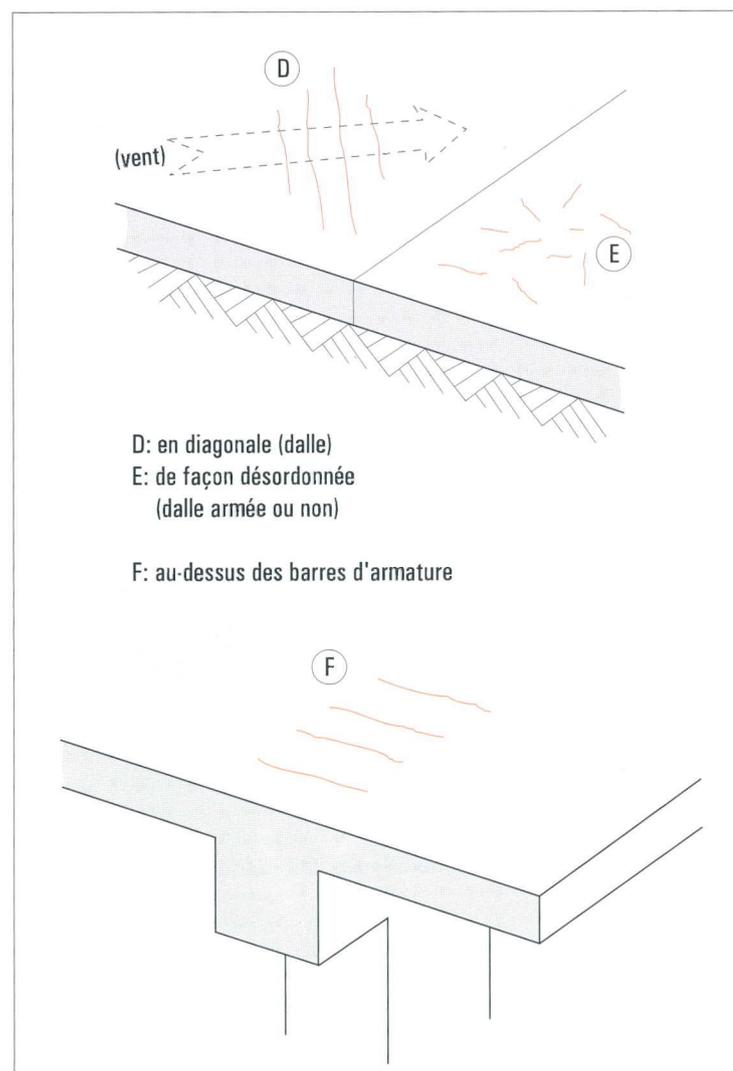


Fig. 6: Fissures dues au retrait plastique.

## Précautions à prendre afin d'éviter le retrait plastique

Les fissures de retrait plastique peuvent facilement être évitées par:

- la limitation de l'évaporation au moyen d'un **traitement** correct, effectué à temps. La norme NBN B15-001 indique les durées minimales de cure en fonction des conditions ambiantes, de la température du béton et de la vitesse de développement de la résistance. Dans des situations très défavorables cette durée peut aller jusqu'à 8 à 10 jours !
- l'ajout de fibres de polypropylène qui augmentent l'allongement à la rupture, toutefois limité, dans la période critique, par un facteur de 2 à 3: ceci n'empêche pourtant pratiquement pas le retrait de dessiccation;
- la mise en œuvre d'un béton de cohésion suffisante et donc certainement pas sujet au phénomène de sédimentation.

Pour les surfaces de béton exposées aux intempéries (essentiellement les revêtements routiers et sols industriels), on utilise principalement un produit de cure (*curing compound*) à base de résine. Le produit forme un film réfléchissant, souvent de couleur blanche. La quantité utilisée est d'au moins 200 g/m<sup>2</sup> (et dans certains cas même 250 g/m<sup>2</sup>). Le coefficient d'efficacité est déterminé suivant la norme NBN B15-219; il doit être au moins de 80%. Cela signifie que durant l'irradiation infrarouge normalisée, la perte en eau sera inférieure à 20 %.

Les produits de cure à base de résine doivent être pulvérisés au moment où l'eau de ressuage est pratiquement éliminée, étant donné que le film envisagé ne peut se former sur une pellicule d'eau. A cet effet les produits à base de résine en solution aqueuse, ouvrent probablement des perspectives.

L'application d'un film de *curing compound* est finalement une opération importante, qui nécessite l'intervention de professionnels expérimentés. Il serait dès lors souhaitable de retirer le traitement de la rubrique 'mise en œuvre' des spécifications des cahiers des charges, et de le mentionner comme un poste séparé.

D'autres méthodes de traitement sont possibles:

- recouvrir la surface au moyen d'une feuille de plastique (attention toutefois au vent et aux dégradations possibles de la texture de la surface).
- garder la surface du béton humide, surtout important dans le cas de l'utilisation de ciment à durcissement rapide. (Attention: par temps chaud et sec les ciments à durcissement très lent peuvent également donner lieu à des fissures plastiques.)
- épandre à la surface une émulsion de bitume (environ 800 g/m<sup>2</sup>); cette méthode est appliquée sur des fondations en béton maigre ou en béton sec compacté.

Les coffrages absorbants ou les assises de fondation seront préalablement humidifiés.

En règle générale, les **réparations** structurelles ne sont pas vraiment nécessaires, en raison de la largeur minimale des fissures sur une grande partie de la section (transfert de l'effort tranchant). On se contente souvent de brosser la surface avec du ciment sec ou à l'aide d'une pâte de ciment le jour suivant l'apparition des fissures (!), lorsque la surface est encore propre. Il est évident que les fissures situées au-dessus des barres d'armature seront scellées d'une manière plus efficace.



Les produits de cure (*curing compounds*) forment un film réfléchissant qui limite l'évaporation.

### Le retrait de dessiccation (à long terme)

La dessiccation lente qui se poursuit dans le béton maintenant durci, conduit à un retrait de dessiccation, appelé communément "le retrait" (retrait hydraulique). La diminution de l'humidité relative dans le réseau poreux augmente la tension superficielle relative de l'eau encore présente dans les pores, provoquant une contraction de la structure du béton.

Le retrait de dessiccation est maîtrisé principalement par une bonne granulométrie bien serrée du squelette du béton, une ouvrabilité adaptée aux moyens de compactage, un traitement effectif, la maîtrise des contraintes de cisaillement au droit des surfaces de contact, la construction de joints, l'incorporation d'un treillis soudé, l'utilisation d'adjuvants adéquats, ...

Le phénomène du retrait de dessiccation n'est pas approfondi dans le cadre de cette publication.

## LE RETRAIT DE DURCISSEMENT

Un retrait intervient également dans la masse du béton même.

Le **retrait chimique** est la conséquence des réactions d'hydratation, car les produits de ces réactions ont un volume plus faible. Des microfissures apparaissent dans la structure, mais à l'endroit des parements la déformation est presque inexistante.

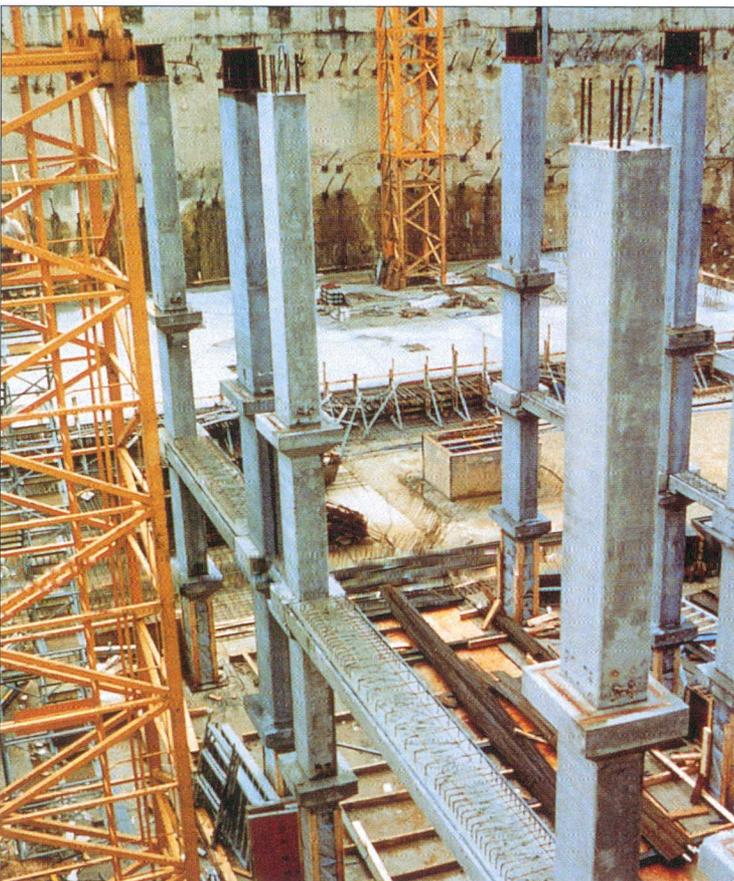
Le retrait physique "endogène" dans la masse de béton - **retrait par auto-dessiccation** - se produit lorsqu'un béton à faible rapport E/C (< 0,45) et haute teneur en ciment continue à s'hydrater. L'eau est consommée, le réseau poreux est vidé et le béton se dessèche. La dépression dans le réseau poreux peut dans ce cas entraîner un retrait extérieur bien visible.

Pour des compositions courantes de béton (E/C = 0,45 et plus), le retrait par auto-dessiccation est limité. Pour les **bétons à hautes performances** (BHP) par contre, le phénomène n'est pas négligeable. Il se manifeste principalement par de petites fissures dans la masse du béton même. L'interférence avec les fissures dues à la dessiccation (retrait plastique et retrait de dessiccation) est évidemment possible.

Il importe donc de prévoir un traitement très correct du BHP. En effet:

- un ressuyage - même réduit - peut entraîner un retrait plastique;
- la teneur en ciment élevée provoque d'importants gradients de température (dangereux pendant la période de refroidissement);
- la grande quantité de ciment entraîne une hydratation rapide, et donc une forte diminution de volume.

En raison du rapport E/C très faible, l'application d'un *curing compound* ne suffit pas pour protéger effectivement le BHP contre l'évaporation. Un traitement par aspersion d'eau est dès lors essentiel !



Colonnes et poutres en béton à hautes performances (parking à étages, Quartier Léopold - Bruxelles).

## LE RETRAIT THERMIQUE

L'hydratation du ciment s'accompagne d'un dégagement de chaleur qui, surtout dans le cas de constructions massives, ne peut être évacué rapidement.

Cela donne lieu à des gradients de température qui peuvent éventuellement encore être accentués en raison de la réaction d'hydratation accélérée à température plus élevée. Des contraintes - compression au centre et traction aux extrémités - s'accroissent dans l'ouvrage en béton qui finit par se fissurer (G - fig. 7).

Durant la période de refroidissement ultérieure, des fissures peuvent également se produire lorsqu'un obstacle extérieur empêche le retrait de l'élément (H - fig. 8). De telles fissures pourraient par exemple compromettre l'étanchéité des parois de tunnel.

Si les phénomènes de retrait décrits jusqu'ici peuvent en général être maîtrisés par un traitement efficace, dans le cas du retrait thermique, l'accent sera mis sur le contrôle des effets de gradients thermiques lors de la mise en œuvre. Les recherches sur le retrait thermique sont en pleine évolution. Dans le cadre de ce bulletin, le phénomène n'est donc abordé que de façon générale.

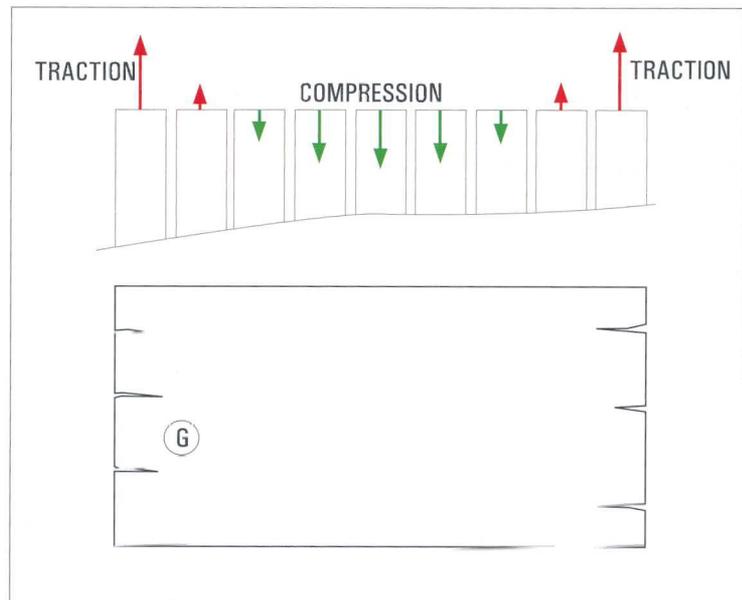


Fig. 7: Fissuration due aux contraintes thermiques intérieures.

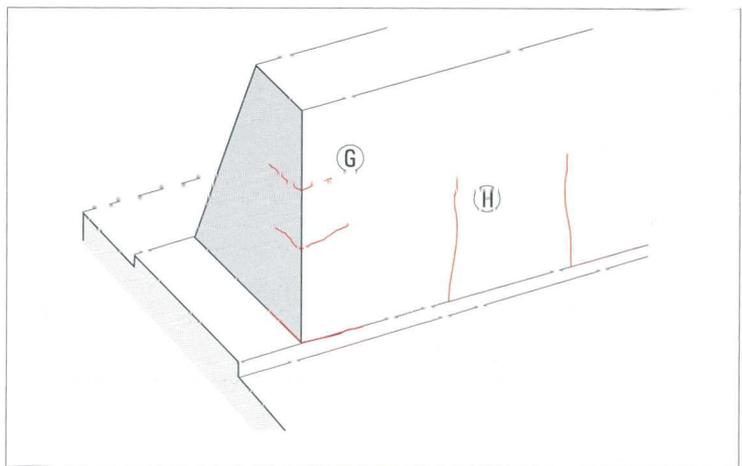


Fig. 8: Fissures typiques dans un ouvrage massif, dues au retrait empêché (H).

## Mesures technologiques pour maîtriser l'augmentation de température

- Choix du type de ciment et de la teneur en ciment

Les types de ciment qui développent une faible chaleur d'hydratation - généralement des ciments de haut-fourneau (CEM III) - sont évidemment les plus appropriés. Une faible teneur en ciment - pour autant qu'elle soit compatible avec les exigences de durabilité et de résistance - limitera l'augmentation de température.

La figure 9 montre l'évolution de la température et des contraintes dans une paroi épaisse.

- Adjuvants et additions

Le développement de la résistance est favorisé, d'une part, par un faible rapport E/C, si bien que l'usage de plastifiants est parfois utile. D'autre part, le retrait par auto-dessiccation sera peut-être plus élevé, ce qui pourrait augmenter le risque de fissuration.

Les retardateurs de prise prolongent l'ouvrabilité et sont dès lors souvent utilisés. Ils ne font cependant que postposer le problème éventuel dû à l'effet de la chaleur. Certains de ces produits, après avoir retardé d'abord l'hydratation, l'accélèrent ensuite.

- Température ambiante

L'influence d'une période de chaleur est évidente. Mais des différences de température dangereuses peuvent également se produire dans d'autres circonstances (printemps, automne).

- Température du béton

Il y a lieu de tenir compte de la température du béton durant le coulage (les granulats chauds et l'eau chaude ont une influence plus significative que le ciment chaud), l'interaction avec le coffrage (valeur d'isolation), le délai de décoffrage. Le cas échéant, l'incorporation de tuyaux de refroidissement peut offrir une solution.

La configuration des joints et les dimensions et la géométrie de l'élément (p.ex. une poutre précontrainte encastrée dans des blocs d'about, ou la jonction entre l'âme et le talon d'une poutre en I) jouent également un rôle important.

- Procédé de mise en œuvre

Une bonne stratégie de coffrage peut limiter la différence maximale de température entre le noyau et la face extérieure de l'élément en béton, et de cette façon limiter également le risque de fissuration. Il faudra tenir compte du risque éventuel d'un choc thermique lors du décoffrage.

Le concept du degré d'hydratation précité commence à rendre possible la simulation des champs de températures qui se développent durant le durcissement ainsi que des propriétés des matériaux qui y sont liées. Il permet d'évaluer, déjà dans la phase de la conception, le risque de fissuration thermique précoce (stratégie de coffrage).

Les règles pratiques suivantes peuvent être observées:

- ☞ Les fissures dues aux gradients de température sont à craindre lorsque la différence de température entre âme et bords est d'au moins 10 à 15°C;
- ☞ Les fissures ayant pour origine un blocage externe de la déformation peuvent apparaître pour une différence de température d'au moins 8 à 20°C.

Pour des travaux importants il est conseillé d'effectuer une étude des contraintes de température éventuelles et des mesures à prendre pour les limiter.

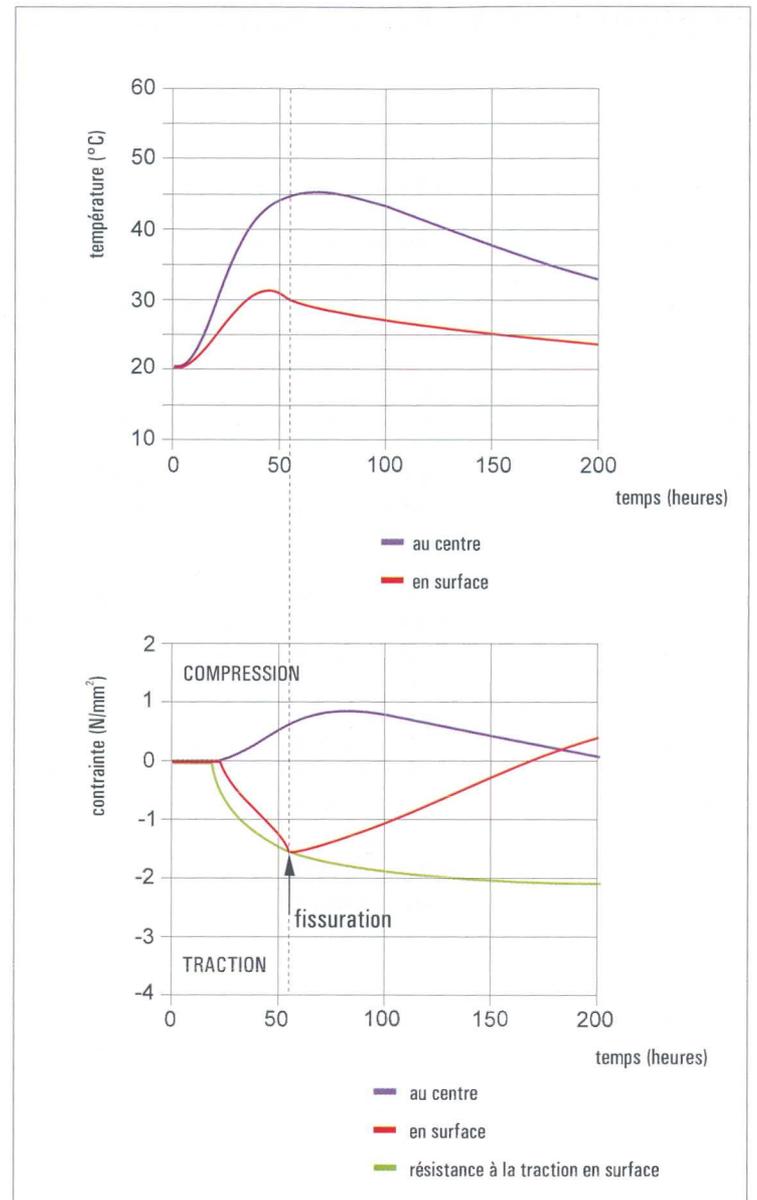


Fig. 9: Exemple de l'évolution de la température et des contraintes dans une paroi épaisse.



ce bulletin est publié par :  
FEBELCEM - Fédération de  
l'Industrie Cimentière Belge  
rue Volta 8 - 1050 Bruxelles  
tél. (02) 645 52 11  
fax (02) 640 06 70  
http://www.febelcem.be  
e-mail: info@felbelcem.be

auteur:  
Ir K. Verhoeven

éditeur responsable :  
J.P. Jacobs

dépot légal :  
D/2001/0280/07  
(réimpression, avril 2001)



Coffrage d'un élément pour le 'Tunnel Piet Hein'.

(petite photo et photo en couverture)  
L'élément après décoffrage, et la série  
complète d'éléments, peu avant leur  
départ de Beveren en direction  
d'Amsterdam. A cet effet le bassin est  
immergé et les éléments, obturés et flottant  
sur l'eau, sont acheminés à destination  
par des bateaux-remorqueurs.  
(photos G. Coolens)



## BIBLIOGRAPHIE

- DE SCHUTTER G.  
*Fundamentele en praktische studie van thermische spanningen in verhardende massieve betonelementen*  
Gent : Universiteit Gent, 1996 (Thèse de doctorat)
- VAN BREUGEL K.  
*Het grijze gebied van het jonge beton*  
Cement, 6 overdrukken 1995/1996
- CONCRETE SOCIETY  
*Non-structural cracks in concrete*  
Wexham : Concrete Society, 1992  
Technical Report nr. 22, Third edition 1992
- *Krimp*  
Betoniek nr. 10/22, februari 1997
- *Bepaling van de sterkteontwikkeling van jong beton op basis van de gewogen rijpheid*  
CUR Aanbeveling nr. 9, februari 1986
- *Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*  
RILEM-Symposium, München, 1994
- *Temperatuurbeheersing van verhardend beton*  
Cursus Nederlandse Betonvereniging, 1997

## EPILOGUE

Il faut effectivement tenir compte des déformations précoces des éléments et des constructions en béton, tant au stade de la conception qu'au moment de l'exécution. Les processus chimiques et physiques qui sont à la base des phénomènes de retrait concernés sont cependant bien connus.

En particulier dans la phase d'exécution, il y a lieu d'y prêter toute l'attention nécessaire.

- Une **composition du béton** adaptée à la construction limitera le ressuage et la sédimentation.
- Un **traitement** judicieux, appliqué en temps utile et de manière effective pendant **au moins 3 jours**, évitera dans des conditions normales, les fissures de retrait plastique.
- Dans le cas d'un rapport eau-ciment peu élevé ( $E/C < 0,45$ ), le retrait par auto-dessiccation devient important. Pour les bétons à hautes performances (BHP), le traitement par **aspersion d'eau** est indispensable.
- Le retrait thermique peut être maîtrisé principalement par un bon **choix du ciment** et par une **stratégie de coffrage** réaliste.
- Le **PROFESSIONALISME** dans le court laps de temps (2 à 3 jours) durant lequel le béton frais perd sa déformabilité et se transforme en béton jeune en cours de durcissement, est particulièrement important pour la **durabilité** de la construction.