

Limiter la fissuration : conditions indispensables à la durabilité des structures en béton

Paul ACKER
Valérie MICHAUD-POUPARDIN
LAFARGE
Laboratoire central de recherche
L'Isle-d'Abeau, France

RÉSUMÉ

Des progrès considérables ont été accomplis au cours des deux dernières décennies dans quatre directions :

- la compréhension physique des processus de dégradation qui peuvent affecter les ouvrages en béton,
- la capacité à décrire ou au moins à encadrer ces processus avec des modèles numériques réalistes,
- la compréhension des processus qui gouvernent la microstructure et les propriétés de transfert,
- la capacité à formuler des bétons sur la base d'un cahier des charges comprenant plusieurs propriétés mécaniques et physiques fixées.

Les techniques de formulation et de mise en œuvre permettent ainsi, aujourd'hui, d'assurer une durabilité exceptionnelle des ouvrages en béton avec des durées de vie qui peuvent être garanties par des modèles validés et des calculs numériques, en fourchette ou probabilistes. Dans cette démarche, deux paramètres jouent un rôle central, parce qu'ils contrôlent la cinétique de pénétration et les transferts des agents agressifs : la perméabilité et l'ouverture des fissures.

Cet article fait le point sur la question de la maîtrise des fissures, et tout particulièrement des fissures dues aux effets thermiques et hydriques, aux différents retraits du béton. Les connaissances actuelles, avec les outils numériques dont on dispose aujourd'hui, permettent en effet de quantifier et de classer les différents facteurs d'influence, mais aussi de quantifier et de classer les différents leviers (de formulation et de mise en œuvre) qui permettent de réduire et de maîtriser l'ouverture des fissures. Le cas des fissurations dues à l'application de forces extérieures autres que celles dues à un retrait géné ou empêché (erreur de dimensionnement, par exemple, ou action accidentelle) n'est pas traité ici.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

ABSTRACT

LIMITING CRACKING: ESSENTIAL CONDITIONS FOR ENSURING THE DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES

Considerable progress has been made on this topic over the past twenty years with efforts being concentrated in four primary directions:

- *cracking capable of affecting concrete structures,*
- *enhanced capacity to describe, or at least frame, these processes with realistic numerical models,*
- *physical understanding of all degradation processes that govern both the microstructure and transfer properties,*
- *capacity to mix concretes on the basis of a set of specifications with respect to several established mechanical and physical properties.*

Mix design and setting techniques now make it possible to ensure outstanding durability of concrete structures with service life cycles that can be guaranteed thanks to validated models and numerical computations, either over given ranges or probabilistically. Within this approach, two parameters play a critical role, by virtue of controlling penetration kinetics as well as the transfer of aggressive agents: permeability and crack opening.

This article provides a comprehensive review of the methods employed to limit cracking, with special emphasis on cracking due to thermal and hydric effects and different types of concrete shrinkage. The current state of knowledge, along with the panoply of numerical tools available, does in essence enable quantifying and categorizing not only the various influential factors, but also the various means of intervention (in terms of both mix design and setting) that serve to reduce and control crack openings. The case of cracks caused by application of external forces other than those due to constrained or imposed shrinkage (e.g. design error, accidental maneuver) is not covered herein.

FIELD: Structural engineering.

Introduction

L'expérience acquise (depuis plus d'un siècle !) et le retour d'expérience en matière de construction en béton montre que, chaque fois que les règles de l'art (de formulation, de mise en œuvre et de dimensionnement) ont été respectées, les ouvrages en béton sont extrêmement durables et résistent aux agressions du climat et de l'environnement. Dans ces conditions, en effet, les voies de pénétration et

les transferts des agents agressifs sont limités, d'une part, parce que le béton est peu perméable et, d'autre part, parce que sa fissuration reste limitée, notamment en terme d'ouverture de fissures.

Par ailleurs, des avancées récentes considérables ont été réalisées sur la compréhension des principaux mécanismes physiques et chimiques qui sont à l'origine des retraits, ce qui permet de fournir aujourd'hui aux praticiens une vision bien plus précise des règles de prévention, des critères à respecter sur ces deux propriétés (perméabilité et ouverture de fissures) et des moyens pour y arriver en termes de formulation et de mise en œuvre.

L'objectif de cet article est de faire le point, à la lumière des connaissances acquises, sur la question du contrôle des fissures.

La fissuration est le résultat d'effets mécaniques qui peuvent avoir différentes origines :

- un gradient d'humidité dans le béton, gradient qui existe toujours en surface à cause des fluctuations du climat ambiant, mais qui peut parfois être amplifié par un décoffrage prématué, par un défaut de protection de la surface du béton, ou encore par un traitement thermique ;
- un gradient de température dans la structure du béton, qui peut résulter soit d'un échauffement de la surface, d'origine naturelle (climat) ou d'origine technique (lorsque l'on chauffe pour accélérer l'acquisition des résistances mécaniques), soit d'un échauffement en volume dû à la chaleur produite par l'hydratation du ciment (cas des bétons de masse, notamment, lorsque la vitesse du dégagement de chaleur est grande devant la vitesse de son refroidissement).

Dans la plupart des applications, ces deux phénomènes sont sans conséquence ou, du moins, leurs effets sont parfaitement contrôlés : dès lors que les « *règles de l'art* » (délai de décoffrage, cure, ...) sont respectées, les fissures restent trop fines pour être visibles ou, du moins, leur ouverture reste inférieure à celle des fissures qui correspondent au fonctionnement normal du béton armé (0,2 à 0,3 mm).

Ces règles de l'art, cependant, sont anciennes et n'ont pas été fixées sur des bases scientifiques (en tout cas pas sur celles dont on dispose aujourd'hui) mais sur des bases *empiriques*, sur l'observation et sur l'expérience et, pour les ouvrages courants, elles sont tout à fait efficaces. Mais l'ingénieur ne construit pas seulement des ouvrages courants : de nouvelles applications apparaissent, la taille des constructions est toujours plus grande, la gamme des performances et des formulations du matériau ne cesse de s'élargir. Dans ces cas, on n'a pas le choix et il faut utiliser les connaissances scientifiques et les outils de simulation qu'offre l'ingénierie moderne. Pour chaque nouvelle application, en tout cas, l'ingénieur doit se poser la question de ces effets et, le cas échéant, en refaire l'analyse quantitative.

Quatre configurations sont particulièrement critiques, et sortent du domaine couvert par les règles de l'art :

- celle des pièces massives, dans lesquelles la chaleur d'hydratation du ciment conduit à des élévations de températures qui peuvent atteindre 50 °C, ce qui entraîne, en surface, des contraintes de traction qui vont dépasser 15 MPa au cours du refroidissement,
- celle des pièces encastrées (chaussées et dallages de grandes dimensions, chapes adhérentes, enduits, reprises de bétonnage sur un voile ou une semelle continu, sur un radier, sur des pieux bloqués par des chevêtres, ...), dans lesquelles la contrainte de traction qui équilibre la somme des retraits s'ajoute aux autocontraintes de surface,
- celle des pièces ayant des parties d'épaisseurs très différentes (caissons à âme épaisse, poutres à blochet, ...) ou des pièces traitées thermiquement, dans lesquelles les zones de moindre épaisseur refroidissent plus vite et se trouvent dans la configuration des pièces encastrées, décrite au point précédent,
- celle des pièces à grande surface libre (dalles flottantes, poutres à table de compression, voussoirs, ...) dont la face supérieure n'est pas ou est insuffisamment curée (dans ce cas, cependant, les fissures de dessiccation n'apparaissent que par temps sec et vent frisant, et l'omission de la cure revient donc à faire un pari sur la météo ...); ces désordres sont spécifiques aux bétons riches en fines, ce qui est systématiquement le cas des bétons à hautes performances (BHP) et des bétons autonivelants (BAN); dans ce cas, la solution est bien connue, et elle est simple : il s'agit de la *cure*.

Les contraintes de traction qui se développent dans les trois premières configurations peuvent dépasser, selon la géométrie du produit fini et, surtout, selon les conditions d'enca斯特ment, celles qui sont dues au chargement mécanique classique (poids propre et charges de service). Si elles ne sont pas prises en compte et traitées de manière correcte par l'ingénieur, elles conduisent alors toujours à une fissuration du matériau.

En fait, le seul paramètre qui compte, à l'usage, est l'*ouverture* des fissures. Pour des raisons esthétiques, parfois, mais surtout pour des raisons de durabilité de l'ouvrage. On sait aujourd'hui que, sauf peut-être en cas d'immersion permanente, la peau d'un béton est toujours fissurée ; simplement cette

fissuration est le plus souvent invisible (lorsque son ouverture est inférieure à 20 microns, pouvoir de résolution de l'œil humain, la fissure ne se voit pas). Mais on sait aussi, à la fois par nos connaissances scientifiques sur la corrosion et par l'expérience (un siècle de recul sur la pérennité des ouvrages en béton armé, ça pèse !) qu'une fissure de faible ouverture est sans conséquence sur la durabilité de l'ouvrage. En effet, en dessous d'une certaine ouverture (de l'ordre de 0,3 mm) les forces de tension superficielle sont supérieures aux forces de gravitation et empêchent tout mouvement d'eau en phase liquide, si bien que l'eau qui peut y pénétrer, soit par capillarité, soit par condensation, et qui va alors dissoudre certains ions, ne peut en ressortir que par évaporation, et par conséquent sans déplacer les ions, et notamment sans lixivier la chaux qui assure le maintien d'un pH élevé, protecteur des aciers. C'est la raison pour laquelle les méthodes de calcul du béton armé n'ont pas fondamentalement changé depuis l'origine des premiers règlements : la vérification par le calcul d'une pièce en béton armé est fondée sur une approche qui est équivalente à celle qui consiste à fixer une limite à l'ouverture des fissures. C'est aussi une des raisons du succès du matériau de construction qu'est le béton armé et des principes qui sont à la base de sa méthode de calcul.

Si le calcul d'une structure en béton armé est, fondamentalement, lié au contrôle de l'ouverture des fissures par les armatures (celles qui constituent le ferraillage *passif*), il faut bien comprendre que la fissuration évoqué ici, par contre, est du type « *retrait empêché* », et ne mobilise pas les armatures de la même manière que les sollicitations dues au chargement extérieur, pour lesquelles la structure a été dimensionnée, pour lesquelles son ferraillage a été conçu, dessiné, calculé et vérifié. On peut dire que la fissuration par *retrait empêché* mobilise les aciers du béton armé de manière indirecte, en tout cas avec un rendement nettement plus faible.

Dans la fissuration par *retrait empêché*, notamment, les caractéristiques de la liaison acier-béton ne constituent plus le paramètre *premier* qui contrôle le pas de fissuration (*i.e.* la distance moyenne entre deux fissures consécutives), donc celui qui contrôle *in fine* l'ouverture des fissures. C'est d'abord la géométrie locale (l'épaisseur de la zone, notamment) et le gradient local de retrait (*via* le gradient de température ou de teneur en eau, qui sont toujours maximaux en surface) qui contrôlent ces deux paramètres, et dont résulte *in fine* l'ouverture des fissures.

Heureusement, la compréhension de ces mécanismes est aujourd'hui très avancée et elle va jusqu'à la possibilité de simuler numériquement les champs de déformation et de contrainte, ce qui a permis d'améliorer l'efficacité des moyens de prévention, d'en développer de nouveaux, de comparer leurs coûts et de faire, au cas par cas, le meilleur choix.

Sources de fissurations précoce dans les bétons. Facteurs aggravants et moyens de prévention

Le retrait d'autodessiccation ou retrait endogène

Le retrait d'autodessiccation est d'origine endogène. Toute éprouvette de béton, qui n'est pas immergée sous eau, a tendance à se rétracter au cours du temps, même si elle est isolée du milieu extérieur afin d'éviter sa dessiccation. Les hypothèses avancées pour expliquer ce retrait sont les suivantes :

- le volume des hydrates formés est plus petit que le volume initial d'eau et de ciment ; ce phénomène porte le nom de contraction Le Chatelier ;
- dès le début de la prise, cette diminution de volume n'est plus libre, elle est gênée par le squelette minéral naissant. Or l'hydratation du ciment progresse. Il en résulte, au sein d'un volume de pores qui décroît, une augmentation du volume occupé par la phase gazeuse, dont l'interface avec la phase liquide se met sous la forme d'une surface de moindre énergie, avec une courbure croissante. C'est cette courbure qui impose une différence de pression entre les deux phases donc, dès que la phase gazeuse est connectée et en équilibre avec la pression atmosphérique, une pression capillaire. Cette pression capillaire est négative car le rayon de courbure est toujours inférieur au micron mais peut atteindre, dans les bétons peu poreux, assez rapidement quelques dizaines de MPa. Cet effet est mis en évidence et peut être quantifié par la chute brutale mesurée par un capteur d'hygrométrie noyé dans le matériau. Une telle pression engendre, bien sûr, à l'échelle macroscopique, une contraction de la matrice minérale.

Ce retrait peut en général être considéré comme uniforme dans le volume de la pièce, du moins à l'intérieur d'une zone correspondant à une même opération de bétonnage, car les gradients d'humidité au sein de la structure sont relativement faibles en raison de la faible perméabilité du béton.

L'évolution du retrait endogène au jeune âge suit donc de très près la cinétique d'hydratation du ciment ; sa vitesse est donc très rapide dans les premiers jours. C'est la raison pour laquelle ce retrait a longtemps été ignoré des praticiens. En effet, les essais courants de retrait – notamment ceux qui ont servi à fournir les lois de nos règlements de calcul (dans le but, à l'origine, de pouvoir estimer les pertes de précontrainte) – commençaient à 48 h ou à 3 jours. Cependant, il faut se rappeler que, dans les conditions d'une déformation totalement gênée (comme dans l'essai au banc de fissuration qui est utilisé, par exemple, pour évaluer sur le plan des risques de fissuration les bétons de chaussée), l'éprouvette finit toujours par se casser, ceci même en l'absence de toute dessiccation et de toute variation de température. Ceci signifie que, malgré la relaxation des contraintes (phénomène pourtant particulièrement rapide au jeune âge), les contraintes générées par le seul retrait endogène, lorsqu'il est totalement empêché, finissent toujours par atteindre des valeurs égales à celles de la résistance à la traction du matériau (fig. 1).

Facteurs aggravants

Une diminution du rapport eau/ciment (E/C)

Le retrait d'autodessiccation ne concerne que les bétons à hautes performances (rapport E/C inférieur à 0,40) et ne peut être évité. En effet, la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation totale du ciment est de l'ordre de 25 à 30 % de la masse initiale du ciment, mais la quantité d'eau utilisée pour fabriquer un béton ordinaire est toujours nettement supérieure à cette valeur, pour des raisons de facilité de mise en œuvre. Le retrait endogène des bétons ordinaires est négligeable ou faible tant que le rapport E/C est supérieur à 0,40 (il est inférieur à 100×10^{-6} pour les bétons dont le rapport E/C est supérieur à 0,45). En revanche, ce retrait augmente très vite avec la diminution du rapport E/C quand ce rapport est inférieur à 0,40, et peut atteindre, pour certains bétons HP, 300×10^{-6} . Ce retrait se manifeste sur plusieurs jours (principalement pendant les premiers jours, mais le béton peut continuer à se rétracter pendant plusieurs mois, tant que le ciment s'hydrate).

Un blocage ou une gêne de la déformation de retrait

Ce retrait est, pour l'essentiel, uniforme dans le volume de la pièce et n'entraîne donc aucun effet mécanique, aucun risque de fissuration, ni dans une pièce préfabriquée, ni dans une pièce coulée en place et libre de se déformer (coulée en une seule phase et bloquée ni par ses appuis ni par son coffrage).

Par contre, lorsque le retrait est empêché, ou même simplement gêné (support rigide continu, appuis fixes, reprise de bétonnage, etc. qui agissent dès le début de la prise), il constitue souvent une composante non négligeable de la fissuration précoce.

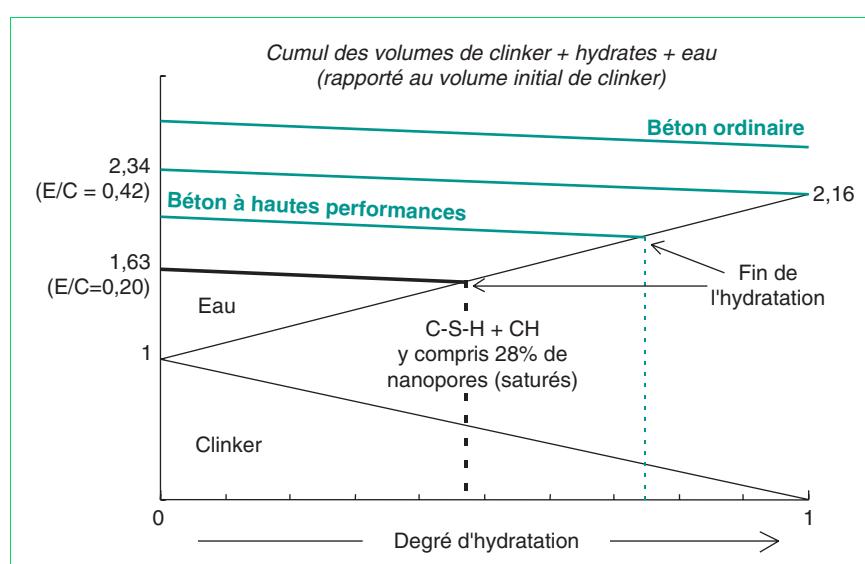


Fig. 1 - Évolution des volumes relatifs du ciment, des hydrates, de l'eau évaporable et de l'air au cours de l'hydratation, en fonction du taux de ciment consommé, pour trois valeurs types du rapport E/C initial : en dessous de 0,42, l'hydratation s'arrête par épuisement de l'eau disponible, et les tensions dans la phase liquide générèrent un retrait ; dans un BFUP comme le Ductal® , par exemple, l'hydratation et l'autodessiccation s'arrêtent très tôt.

Moyens de prévention

Dans le cas d'un béton à haute performance (rapport E/C inférieur à 0,40) dont les déformations sont bloquées, il n'est pas toujours possible d'éviter la fissuration par autodessiccation, mais il est tout à fait possible de limiter l'ouverture des fissures, par différents moyens :

- en calculant les contraintes supplémentaires engendrées et en tenant compte dans la conception de l'ouvrage (ferraillage, précontrainte) ;
- en maintenant une humidité saturée, dès la fin de la mise en place, à la surface du béton, par arrosage, brumisation, protection par une toile humide ou par un film plastique qui stoppe toute évaporation ;
- en utilisant des agents réducteurs de retrait (Tanaka et al., 1997 ; Shah et al., 1998 ; Nmai et al., 1998) qui peuvent être ajoutés au malaxage (ils seront alors mélangés au béton) ou au produit de cure. Il s'agit d'agents tensio-actifs, assez chers et modérément efficaces, qui réduisent les tensions superficielles, donc la pression dans la phase liquide ;
- en soignant l'homogénéité et la régularité de la fabrication afin d'éviter des retraits localement différents :
 - régularité des approvisionnements en ciment, adjuvants et granulats,
 - régularité de fabrication (dosages, introduction des adjuvants, durée de malaxage), d'où l'intérêt de l'enregistrement des paramètres de fabrication,
 - régularité du processus de mise en place et de l'énergie développée lors de la vibration.

Le retrait plastique

Le retrait plastique est une déformation qui se produit avant durcissement sous l'effet d'une dessiccation. C'est un mécanisme identique à celui qui se produit dans les sols fins ou argileux des zones de marnage lorsque l'eau se retire. Il peut en résulter une fissuration superficielle de l'ouvrage, parfois très ouverte, mais jamais très profonde. Ce retrait, d'origine exogène, se manifeste tant que le béton est plastique, c'est-à-dire avant et/ou au tout début de la prise, et dès que la surface de la structure n'est plus recouverte d'une pellicule d'eau, c'est-à-dire dès qu'elle est en déséquilibre hydrodynamique avec le milieu ambiant.

Ce retrait est dû aux tensions capillaires, de même que le retrait d'autodessiccation traité dans le paragraphe précédent, à la différence près que dans le cas présent il ne s'agit plus d'une dessiccation au sein du matériau (*autodessiccation*), mais d'un séchage avec départ d'eau vers l'extérieur. Le retrait plastique est donc principalement limité à la surface du béton (quelques centimètres sur un béton HP, 10 à 20 cm dans un béton ordinaire), contrairement au retrait d'autodessiccation qui se manifeste dans l'ensemble de la pièce.

Le retrait plastique dépend largement des conditions climatiques et notamment de la vitesse de dessiccation au niveau des surfaces non coiffées de l'ouvrage. Ainsi, par exemple, un béton mis en œuvre suivant des procédures adéquates, un jour où la vitesse du vent est relativement faible, ne sera pas ou peu affecté par ce phénomène. En revanche, la couche d'eau à la surface du béton s'évaporera rapidement par vent fort, et la déformation pourra commencer à se manifester quelques minutes après sa mise en place. Des abaques, établis par l'ACI [1999], et fondés sur des données thermodynamiques et expérimentales, permettent d'estimer le taux d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air, de la vitesse du vent et de la température du béton (fig. 2).

Facteurs aggravants

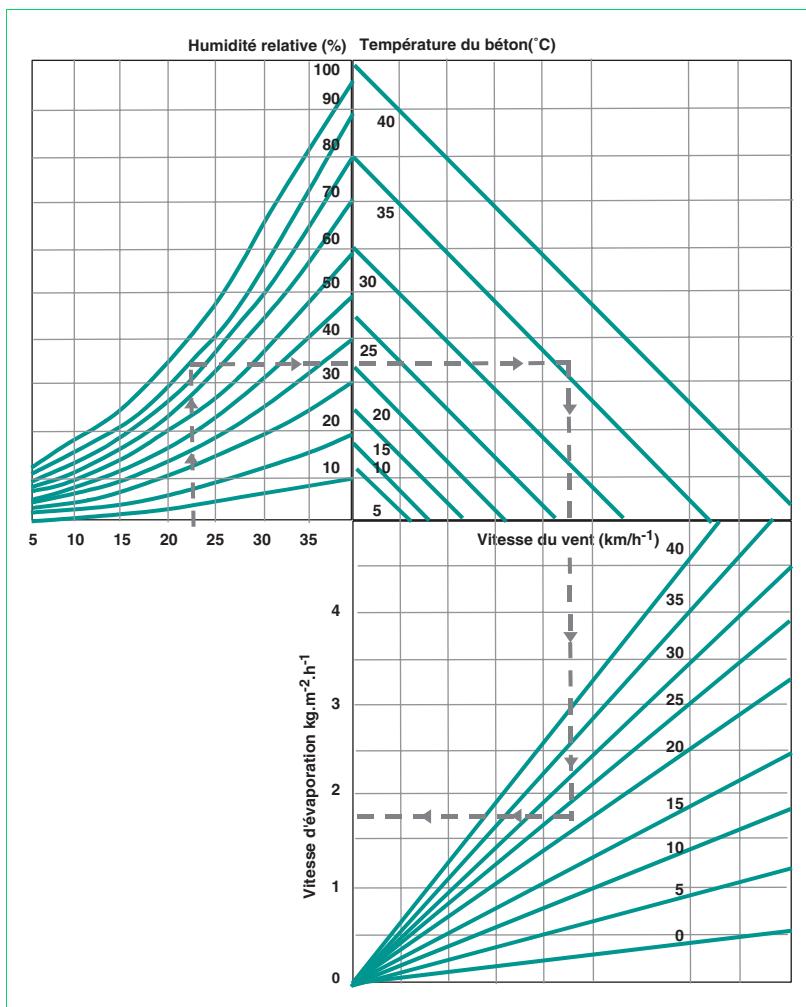
Le retrait plastique est d'autant plus important que :

La dessiccation est forte

La dessiccation est favorisée par une hygrométrie faible, un vent fort et une différence de température élevée entre le béton et le milieu ambiant. Le risque de fissuration plastique peut en conséquence être aussi important l'hiver que l'été, et même plus important l'hiver si le béton est chauffé. La dessiccation se produit dès que l'eau de ressauage est entièrement évaporée.

La dessiccation peut parfois être aggravée par la succion de l'eau par le coffrage, si celui-ci est poreux et absorbant, et s'il n'a pas été humidifié avant que le béton soit coulé. Des coffrages non absorbants constituent une protection efficace contre cet effet.

Fig. 2 - Abaque permettant d'estimer la perte en eau du béton jeune sans protection à partir des données climatiques ambiantes (ACI, 1999).



La pièce est fine

Ce type de retrait se manifeste essentiellement sur des pièces qui présentent de grandes surfaces d'évaporation par rapport à leur volume (enduit, revêtement routier, dalle), donc des pièces fines, où il peut alors engendrer une fissuration importante. Sur des surfaces horizontales larges, les fissures constituent en général un maillage, dont la maille varie de quelques centimètres à quelques décimètres. À la surface des pièces verticales (voiles, poutres, longrines) elles constituent un réseau de fissures transversales parallèles. Ces fissures n'apparaissent que si les déformations sont empêchées, soit par une partie de la pièce (plus massive ou plus ancienne), soit par des conditions aux limites (cas des revêtements routiers ou des enduits de façade), ou si la géométrie de la pièce et sa taille peuvent conduire à la localisation de l'endommagement en une ou plusieurs fissures principales. Ces fissures n'apparaissent pas dans une chape désolidarisée, par exemple.

Dans des pièces plus épaisses (radier, chevêtre, semelle épaisse, tête de pieu), la profondeur de la zone affectée par la dessiccation, et donc par le retrait, est très faible. Par conséquent, la fissuration est peu profonde. Elle est également peu ouverte.

La prise est lente et la rétention de l'eau de gâchage est mauvaise

Une température ambiante basse, des constituants secondaires (laitiers, cendres volantes, etc.), un excès d'eau de gâchage, ou encore l'utilisation d'adjuvants ayant une composante retardatrice, allongent la période de prise et ainsi accentuent le retrait plastique.

Moyens de prévention

Ce type de fissuration peut être évité :

- en assurant une cure efficace, c'est-à-dire en humidifiant la surface du béton, en projetant un produit de cure efficace, ou encore en recouvrant la surface du béton d'une feuille de polyane, et ce le plus tôt possible après la mise en place du béton,

- en fermant les ouvertures si le béton est coulé en intérieur,
- en érigéant temporairement des paravents et des pare-soleil pour réduire respectivement la vitesse du vent et la température à la surface du béton frais,
- en humidifiant les coffrages ou en utilisant des coffrages non absorbants,
- en évitant les trop forts écarts entre la température du béton et celle de l'air ambiant.

Une technique nouvelle pour maîtriser la fissuration par retrait plastique consiste à utiliser des fibres de polypropylène. Ces fibres (résistance à la traction de 600 MPa, module d'Young de 3,5 GPa) sont utilisées pour cette application en faible proportion (de l'ordre de 0,1 à 0,5 % en volume). Elles réduisent l'ouvrabilité des bétons, mais la mise en place sous vibration peut s'effectuer normalement (Al-Tayyib et al, 1988). Ces fibres réduisent le retrait dans des proportions qui ne sont pas très importantes, tout au plus 10 % (Hannant, 1978), mais elles diminuent considérablement la fissuration qui est associée au retrait plastique. Le mécanisme est encore mal compris, mais de nombreux essais de retrait empêché ont montré que les fibres de polypropylène à la fois retardent l'apparition des fissures, mais aussi diminuent (jusque dans un rapport 10) l'ouverture de ces fissures (Grzybowki et Shah, 1990 ; Kraii, 1985). Ce dernier point, qui permet un contrôle de l'ouverture des fissures, est particulièrement intéressant en ce qui concerne la durabilité. Ainsi, dans des conditions climatiques sévères (température de 40 à 46 °C en surface avec une vitesse de vent de 16 à 24 km/h) des échantillons possédant 0,2 % de fibres n'ont présenté aucune fissure visible, alors que les échantillons non armés présentaient, au bout de 6 à 8 heures, des fissures qui pouvaient atteindre un millimètre d'ouverture (Al-Tayyib et al, 1988).

L'utilisation de fibres de polypropylène doit donc être envisagée dans le cas de bétons particulièrement exposés aux risques de dessiccation rapide.

Le ressage

Le ressage correspond à l'exsudation superficielle d'une partie de l'eau de gâchage à la surface supérieure du béton frais. Ce phénomène n'est pas rare avec les bétons ordinaires et se manifeste avant la prise du béton. Tant qu'il reste limité, il est bénéfique pour le béton car il empêche le retrait plastique de se manifester. Dans certains cas, cependant, il peut générer des désordres, notamment s'il s'accompagne d'un tassement de la phase solide du béton sous l'effet de la pesanteur. La déformation résultante peut atteindre quelques pour-cent, et peut générer des fissures ouvertes pouvant mesurer plusieurs dixièmes de millimètre au droit des obstacles qui empêchent le tassement du béton, comme les armatures, la présence d'un étranglement au niveau de la pièce, etc.

Facteurs aggravants

Le béton se tassera d'autant plus rapidement et d'autant plus en valeur absolue que :

La durée de vibration est importante

La vibration du béton peut être génératrice de fissures dans le cas de bétons contenant des armatures au voisinage de la surface supérieure, notamment si les vibrations sont transmises aux armatures, c'est-à-dire si les aiguilles vibrantes sont mises au contact des armatures. Ces armatures constituent des points fixes qui gênent localement le tassement du béton. Il y a alors désorganisation du squelette granulaire au voisinage de l'armature et génération de fissures qui peuvent pénétrer jusqu'à l'armature supérieure. Le profil de fissuration reproduit alors le quadrillage de l'armature supérieure.

La profondeur du béton frais est plus grande

La vitesse de tassement augmente avec l'épaisseur du béton frais. Par conséquent, si une pièce coulée en une seule fois est constituée de zones d'épaisseurs différentes (cas des voussoirs, des poutres en T, etc.), la vitesse de tassement du béton sera plus importante sur la partie centrale de la pièce, où l'épaisseur du béton est plus élevée, que sur les côtés. Il se créera un cisaillement entre les zones d'épaisseurs différentes pouvant aller jusqu'à une décohésion suivant des plans verticaux des différentes zones de la pièce.

La durée avant prise est importante

Une température ambiante basse ou un retardateur de prise augmentent le temps de prise et ainsi la durée pendant laquelle le tassement est possible.

La suspension est instable

Ceci peut résulter :

- d'un manque d'éléments fins dans le sable ou d'un dosage en ciment insuffisant,
- de grains plats dans les éléments fins du sable,
- d'un dosage en eau excessif,
- d'un excès de vibration,
- de la présence de certains électrolytes (une trop forte adjuvantation, par exemple).

Moyens de prévention

La fissuration par tassement peut être facilement évitée. Pour ce faire, il est indispensable que le béton soit correctement formulé, avec un dosage en ciment suffisant et le cas échéant en fines inertes, et que l'eau de gâchage ne soit pas en excès. Le diamètre maximal des granulats doit être compatible avec la dimension du coffrage et l'encombrement des armatures. Dans les cas qui nécessitent un fort retard de prise, on pourra être amené à augmenter le dosage en fines.

Le retrait thermique

Ce type de retrait peut entraîner la génération de fissures dans deux cas de figure :

- les bétons de masse,
- les bétons traités thermiquement.

Cas des bétons de masse

Dans les pièces massives, la température s'élève à cœur en raison de l'exothermicité des réactions mises en jeu au cours de l'hydratation des ciments. En effet, lorsque l'épaisseur est supérieure à 1 mètre, le cœur est pratiquement dans des conditions adiabatiques parce que le béton est peu conducteur de la chaleur (1,5 à 1,8 W/m/K), et la température peut monter jusqu'à 70 °C-75 °C (fig. 3). Ce gradient de température dans la structure crée des retraits différentiels. Au cours du refroidissement, la température de la zone située en bordure des surfaces d'échange (appelée « peau » du béton) diminue beaucoup plus rapidement que celle au cœur de la structure, ce qui génère un retrait nettement plus élevé en surface qu'au cœur. La « peau » du béton est donc soumise à des contraintes de traction très importantes (*retrait géné*) alors que le cœur de la structure est en compression. Il en résulte des gradients de contraintes, et potentiellement une fissuration superficielle de l'ouvrage si les contraintes en traction au niveau de la peau du béton sont supérieures à sa résistance en traction.

Au cours du refroidissement d'une structure en béton, l'écart de température dans la structure peut facilement dépasser 30 °C, par exemple. La peau de l'échantillon sera alors mise en traction et soumise à une contrainte de l'ordre de 10 MPa (si on considère le module d'Young du béton de l'ordre de 30 GPa, et le coefficient de dilatation thermique de l'ordre de $10 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Cette valeur est nettement supérieure à la résistance en traction d'un béton et la peau se fissurera toujours au cours du refroidissement.

En France, il existe un essai normalisé (AFNOR NF P 15-436) qui permet de déterminer la chaleur d'hydratation susceptible d'être libérée par un ciment en condition quasi-adiabatique. L'essai est effectué sur mortier normalisé dans un calorimètre semi-adiabatique (bouteille de Langavant), et la chaleur dégagée est mesurée durant cinq jours.

Dans le cas d'ouvrages de masse, le retrait thermique peut atteindre, selon le dosage et la nature du ciment, $400 \text{ à } 500 \times 10^{-6}$ dès que l'épaisseur dépasse 60 à 80 cm (40 à 50 pour un radier). Il débute avec la fin de la prise (la température maximale est atteinte entre 20 et 40 h), et peut se manifester pendant plusieurs jours voire quelques semaines après la mise en œuvre du béton (la durée de refroidissement peut être estimée par $d = 8 \times e^2$, où d est en jours et e est l'épaisseur en mètre).

Cette fissuration de peau peut être observée dans les massifs de fondation coulés en continu, les chevêtres, ou les voussoirs sur pile. Les fissures sont cependant rarement très ouvertes car la distance entre deux fissures principales consécutives est du même ordre que la profondeur de la zone tendue, laquelle ne peut dépasser le quart de l'épaisseur. L'espacement entre les fissures est donc un critère d'analyse : quand cet espacement est inférieur au double de l'épaisseur d'un voile, elles sont dues au gradient de surface (et elles ne sont généralement pas traversantes) ; lorsque les fissures sont dues au retrait géné au niveau de la reprise de bétonnage (fondation ou levée précédente), cet espacement est plutôt compris entre une fois et deux fois la hauteur du voile (et dans ce cas, elles sont toujours traversantes).

Dans le cas des chevêtres ou des voussoirs sur pile, les effets du retrait thermique s'ajoutent à ceux du retrait endogène, notamment lorsque ces structures sont réalisées en bétons à hautes performances

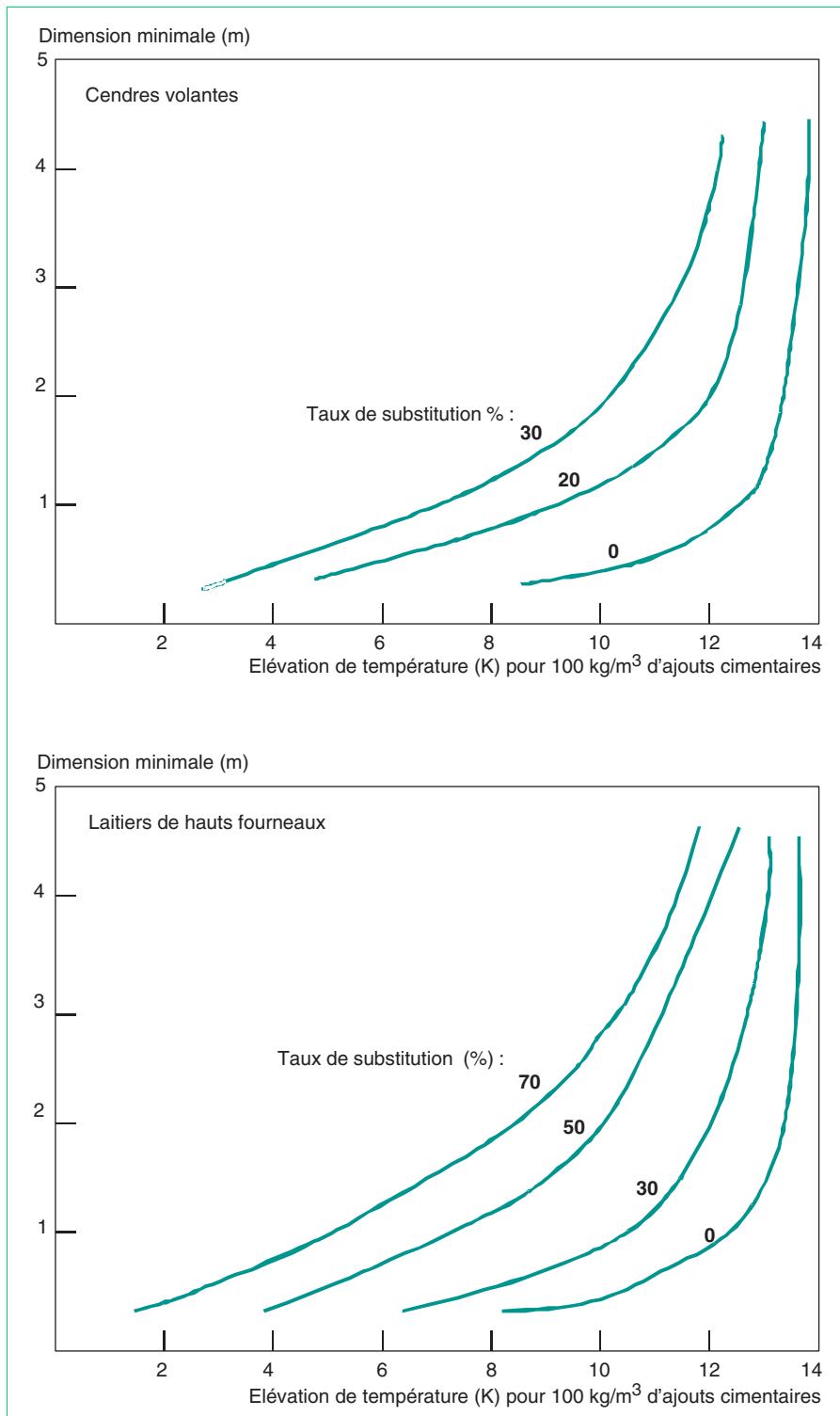


Fig. 3 - Influence de la substitution partielle de ciment Portland par des cendres volantes ou du laitier sur l'élévation de température dans une structure en béton (Bamforth, 1984).

(BHP) qui sont généralement des bétons à forte chaleur d'hydratation et à fort retrait endogène. Il ne faut pas confondre cette cause de fissuration avec le mécanisme de DEF (*delayed ettringite formation*). Ce mécanisme, qui peut se produire, pour certaines formulations, lorsque la température en cours de prise dépasse 70 °C, n'est pas décrit dans ce papier (on pourra se reporter, notamment, aux références (Taylor, 2001 ; Thomas, 2000 ; Divet, 2001).

Cas des bétons traités thermiquement

Les traitements thermiques sont aujourd’hui soigneusement contrôlés, car ils présentent un risque particulier : lorsque l’apport de chaleur coïncide avec la fin de la période dormante et que la montée en température est rapide, il y a un effet de couplage entre l’apport extérieur d’énergie calorifique et la

chaleur d'hydratation, couplage qui peut conduire, au cœur de la pièce, à des élévations de température largement supérieures à la température programmée. Contrairement au cas des bétons de masse, c'est dans les ouvrages de faible épaisseur (plus petite dimension inférieure à 15 cm, ce qui est très fréquent en préfabrication) que ce risque est le plus élevé. Dans des petits éléments préfabriqués traités à la vapeur juste avant ou au tout début de la prise, et chauffés en une heure à 80 °C par exemple, on a mesuré des températures à cœur supérieures à 90 °C (Acker, 1986). On observe alors une dégradation rapide de toutes les performances mécaniques du matériau et de sa durabilité (avec, en plus, le risque de formation d'ettringite différée).

Facteurs aggravants dans le cas des bétons non traités thermiquement

L'augmentation de la taille des pièces en béton

Inexistantes en deçà de 50 cm d'épaisseur dans le cas de bétons non traités thermiquement, les fissures d'origine thermique sont pratiquement inévitables lorsque l'épaisseur du béton est supérieure à 80 cm. Elles peuvent même apparaître dans des ouvrages d'épaisseur plus modeste (dès 20 cm) lorsqu'une face est isolée thermiquement, si l'ouvrage est soumis à des conditions aux limites de déplacement empêché. L'expérience acquise sur les chantiers montre clairement que, dès qu'il existe une zone de béton dont la distance à la plus proche surface refroidie dépasse 50 cm, la température du béton peut s'y élever de 30 à 50 degrés. Il est alors indispensable de traiter les coffrages si l'on veut éviter une fissuration intense et ouverte au cours du refroidissement, par exemple avec un flocage ou une isolation thermique dans les zones moins épaisses, pour diminuer les écarts de température entre zones.

Un dosage élevé en ciment et l'utilisation de ciment réactif

Ceci est caractéristique des bétons de hautes performances qui montrent souvent des chaleurs d'hydratation plus élevées, mais aussi et surtout des cinétiques d'hydratation plus rapides que celles des bétons classiques. Des observations sur chantiers où sont mis en œuvre ces types de béton montrent que l'on peut avoir, avec des bétons HP, des effets thermiques non négligeables, même pour des épaisseurs inférieures à 30 cm.

Un retrait restreint

Ce type de fissuration est aggravé dans toutes les zones où le retrait est empêché ou restreint, comme par exemple au niveau des reprises de bétonnage (voile épais coulé par levées successives) ou d'encastrement (barrage, voile encastré sur un massif de fondation ou sur une semelle filante, parapet, chaussée sur couche ou sol rigide, revêtement de tunnel (cas décrit par Aggoun et al., 1994)). Dans certains cas, on peut avoir des fissures localisées, beaucoup plus espacées. Sur une chaussée en BAC (*béton armé continu*), par exemple, on a observé entre les fissures des distances supérieures à 50 m et dans un barrage, des distances supérieures à 90 m, donc largement plus ouvertes (plusieurs millimètres). L'espacement entre les fissures peut ainsi être très variable (la plage des distances observées sur les ouvrages va de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres) et la grande étendue des ouvertures de fissure observées est donc avant tout liée au rôle capital des conditions aux limites mécaniques de la structure, bien plus qu'aux paramètres thermiques et mécaniques du matériau.

Facteurs aggravants dans le cas des bétons traités thermiquement

Les facteurs mentionnés précédemment

Une courte durée de précure

Un traitement thermique qui débute avant que le béton ait atteint une certaine rigidité, en d'autres termes avant la prise, favorise la création de fissures.

Une élévation rapide en température, et / ou surtout un refroidissement rapide

La contrainte générée est en effet d'autant plus élevée que le gradient ($\Delta T/\Delta x$) de température au sein d'une structure est élevé. Le refroidissement est davantage susceptible d'endommager un échantillon de béton que le chauffage, pour les raisons suivantes :

- au cours du refroidissement, la peau est en traction, ce qui tend à ouvrir des microfissures en surface. À l'opposé, au cours du chauffage, la dilatation de la peau est empêchée par celle, plus faible, du cœur. Dans ce dernier cas, la peau est en compression et le cœur en traction ;
- lors du refroidissement, l'hydratation étant plus avancée qu'au cours du chauffage, le module d'YOUNG du béton est plus élevé. La contrainte générée lors du refroidissement est par conséquent plus importante que lors du chauffage ;

- au cours de la montée en température, la pâte est moins rigide qu'au cours du refroidissement, et les fissures qui auraient pu s'ouvrir alors se referment et peuvent se cicatriser plus facilement par hydratation ultérieure.

Une température élevée au cœur du béton

Le gradient de température susceptible d'être atteint dans une structure est d'autant plus élevé que la température maximale atteinte au cœur de la structure est élevée.

Moyens de prévention

Il est possible de prévoir les risques de fissuration d'origine thermique et de les réduire :

- en choisissant, notamment dans le cas des ouvrages massifs, un ciment présentant une faible vitesse de dégagement de chaleur plutôt qu'un dégagement brutal. Avec un ciment de classe 52.5, le flux de chaleur maximal (calorimétrie adiabatique sur mortiers normalisés) dépasse souvent $40 \text{ J.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ($> 50 \text{ J.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$ pour un 52.5R) et il est obtenu très tôt (entre 7 et 9 heures après le gâchage) ; avec un CPJ 32.5, ce même flux maximal ne dépasse que très rarement $30 \text{ J.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$ vers 10 heures et, avec un CHF CEMIII/B 42.5, on descend à $15 \text{ J.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$ au bout de 15 heures environ. Lorsque cela est possible, et c'est généralement le cas pour les bétons de masse qui ne requièrent pas des résistances initiales importantes, l'utilisation de ciments contenant des additions minérales (cendres volantes, laitier) en substitution d'une partie du clinker, permet de réduire le dégagement de chaleur initial. Leur utilisation peut permettre de diviser par 2 l'augmentation de la température dans des pièces d'une certaine épaisseur (Bamforth, 1984) ;
- en contrôlant le profil de température suivi par la pièce en béton. Des recommandations européennes existent aujourd'hui pour limiter l'élévation trop brutale ou trop élevée lors de la mise en œuvre, aussi bien pour les ouvrages massifs [PR ENV13670] que pour des éléments préfabriqués traités thermiquement [PR ENV13369] ;
- en évitant, dans le cas des ouvrages massifs, l'utilisation de coffrages trop isolants (par exemple les coffrages en bois) ou alors en ne les démontant que lorsque la température à cœur a chuté, ce qui prend un temps parfois assez long, afin de limiter les gradients thermiques ;
- en protégeant la face non coiffée contre la dessiccation au jeune âge, celle-ci étant accrue par une élévation de température de la masse du béton ;
- en ajoutant des armatures complémentaires qui permettent de réduire les ouvertures de fissures (les armatures ne peuvent pas empêcher la fissuration thermique, car elles ont le même coefficient de dilatation thermique que le béton, mais elles augmentent le nombre des fissures, donc diminuent d'autant leurs ouvertures) ;
- en effectuant une analyse numérique complète des effets mécaniques produits dans les ouvrages en béton par l'hydratation du ciment. Cette analyse est possible grâce à des logiciels numériques (CESAR-LCPC, DIANA, FEMASSE, etc.) et permet notamment d'estimer les vitesses de montée en température et de refroidissement aux différents points de la structure, et d'en déduire les contraintes générées, connaissant la conductivité thermique du béton, sa capacité calorifique, la taille et la forme de la pièce, ainsi que les conditions thermiques imposées aux limites. Ce genre de calcul est aujourd'hui opérationnel, largement validé par un grand nombre d'applications qui ont permis de confirmer, par des mesures *in situ*, les valeurs prédictes (Torrenti et al., 1994). Il est systématiquement utilisé pour les ouvrages exceptionnels ou qui présentent des zones à risque de fissuration d'origine thermique.

On trouvera tous les détails sur ces modèles numériques, leur formulation mathématique, leurs bases théoriques et expérimentales dans la publication de Acker et Ulm (1996).

Conclusion

La fissuration la plus pénalisante pour la durabilité des ouvrages en béton est la fissuration précoce. Elle donne, en effet, des fissurations ouvertes. Elle est, en pratique, toujours évitable. Voici cinq précautions élémentaires pour prévenir presque toutes les fissurations précoce (il faut noter que les quatre premières relèvent des règles de l'art qui devraient être toujours appliquées) :

- composer le béton de manière à ce que son dosage en éléments fins (ciment compris) soit optimal (mélange à porosité minimale), et choisir la dimension du plus gros granulat compatible avec la dimension du coffrage et l'encombrement de l'armature. On réduit ainsi le risque de fissures par tassemement du béton frais et on assure une rétention correcte de l'eau de gâchage ;
- appliquer une brumisation ou choisir un produit de cure efficace ; l'appliquer correctement et en temps voulu au dosage recommandé. On réduit et parfois même on supprime ainsi le risque de fissuration plastique ;
- veiller à la régularité des approvisionnements et de toutes les opérations de la chaîne de mise en œuvre ;

- prendre en compte, dès la conception de l'ouvrage, le risque de retrait thermique après prise dans le cas des ouvrages de masse ;
- s'affranchir du risque de retrait thermique dans le cas d'ouvrages traités thermiquement en soignant le procédé de préfabrication et notamment la durée de cure, la vitesse de montée en température et de refroidissement, et la température maximale au cœur de la structure.

Revenons au cas des bétons traités thermiquement mis à profit surtout dans les usines de préfabrication afin d'accélérer leurs acquisitions de résistances. En 1983, Marc Mamillan pouvait écrire : « ... *le traitement thermique constitue le moyen le plus efficace pour obtenir la résistance nécessaire au démoulage en quelques heures...* ». Ceci n'est plus tout à fait exact aujourd'hui. Le développement des bétons de hautes performances (BHP), avec l'usage d'adjuvants et d'ajouts minéraux, a montré qu'il était possible d'obtenir des résistances mécaniques très élevées à des âges inférieurs à 24 heures, et ceci pour un coût global qui est du même ordre.

Il faut ajouter à cela que tout traitement thermique conduit à une diminution des performances mécaniques à long terme et, dans certains cas, de la durabilité, alors que, inversement, les formulations modernes conduisent à leur augmentation, en même temps qu'à une amélioration de la plupart des caractéristiques qui contribuent à la durabilité du matériau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACKER P., Effets thermiques dans les bétons en cours de fabrication et applications aux ouvrages d'art : de nouveaux outils, pour une optimisation simultanée du coût et de la qualité, *Annales de l'ITBTP*, **442**, Série Béton 235, **1986**, pp. 61-77.
- ACKER P., ULM F.J., *Modélisation des ouvrages en béton soumis à des effets thermiques et/ou hydriques, Emploi des éléments finis en Génie civil - La maîtrise de la modélisation des ouvrages*, Livre 2, Chap. 6, HERMÈS, Paris, **1996**.
- ACKER P., *Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physicochimique*, Rapport de recherche des LPC, **152**, Paris, **1988**, 120 pages.
- ACI Manual of Concrete Practice, Part 2, *Construction practices and inspection pavements*, ACI 305R-91, **1999**.
- AL-TAYYIB A.J., AL-ZAHRANI M.M., RASHEEDUZZAFAR, AL-SULAIMANI G.J., Effect of polypropylene fiber reinforcement on the properties of fresh and hardened concrete in the arabian Gulf environment, *Cement and Concrete Research*, **18**, 4, pp. 561-570.
- AGGOUN S., TORRENTI J.-M., LEGRAND M., PROST J., Étude de la fissuration du béton dans le cas des revêtements de tunnels, *Annales de l'ITBTP*, **526**, **1994**, pp. 1-29.
- BAMFORTH P.B., Mass Concrete, *Concrete Society Digest*, **2**, **1984**, 8 pages.
- BRESSON J., *La prévision des résistances des produits en béton*, Le Béton jeune, Proc. Colloque International RILEM, Vol.1, Éditions AENPC, Paris, **1982**, pp. 111-115.
- DIVET L., *Les réactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite*, Thèse CNAM, **2001**, 227 pages.
- GRZYBOWSKI M., SHAH S.P., Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, **87**, 2, **1990**, pp. 138-148.
- HANNANT D.J., *Fibre Cements and Fibre Concretes*, JOHN WILEY & SONS, Chichester, **1978**.
- KRAII P.P., A proposal Test to determine the Cracking Potential of Fiber reinforced Concrete, *Concrete Construction*, **1985**, pp. 775-778.
- NMAI C.K., TOMITA R., HONDO F., BUFFERIBARGER J., Shrinkage Reducing Admixtures, *Concrete International*, **20**, 4, avril **1998**, pp. 31-37.
- SHAH S.P., WEISS W.J., YANG W., Shrinkage Cracking – Can it be prevented ?, *Concrete International*, **20**, 4, avril **1998**, pp. 51-55.
- TANAKA S., HOHJOH Y., YAMAGUCHI O., TOMITA R., Long-term Durability of Concrete with organic Shrinkage Reducing Agent, *Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, SP-170, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., **1997**, pp. 1577-1590.
- TAYLOR H.F.W., FAMY C., SCRIVENER K.L., Delayed ettringite formation (Review), *Cement and Concrete Research*, **31**, **2001**, pp. 683-693.
- THOMAS M., Delayed ettringite formation in concrete. Recent developments and future directions, *Materials Science of Concrete*, **6**, edited by S. Mindess & J. Skalny, The American Ceramic Society, Westerville, **2000**.
- TORRENTI J.-M., DE LARRARD F., GUERRIER F., ACKER P., GRENIER G., *Numerical simulation of temperatures and stresses in concrete at early ages: the French experience, in Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, edited by R. Springenschmid, **1994**, E & FN Spon, pp. 281-288.