

LIMITER LA FISSURATION : CONDITION INDISPENSABLE À LA DURABILITÉ DES BÉTONS

TECHNOLOGIE | NOVEMBRE 2010

BBSfB

	Ef2	(F47)
--	-----	-------

- HYDRATATION ET MÉCANISMES DE RETRAIT
- RESSUAGE
- RETRAIT PLASTIQUE
- RETRAIT ENDOGÈNE
- RETRAIT HYDRAULIQUE
- RETRAIT THERMIQUE

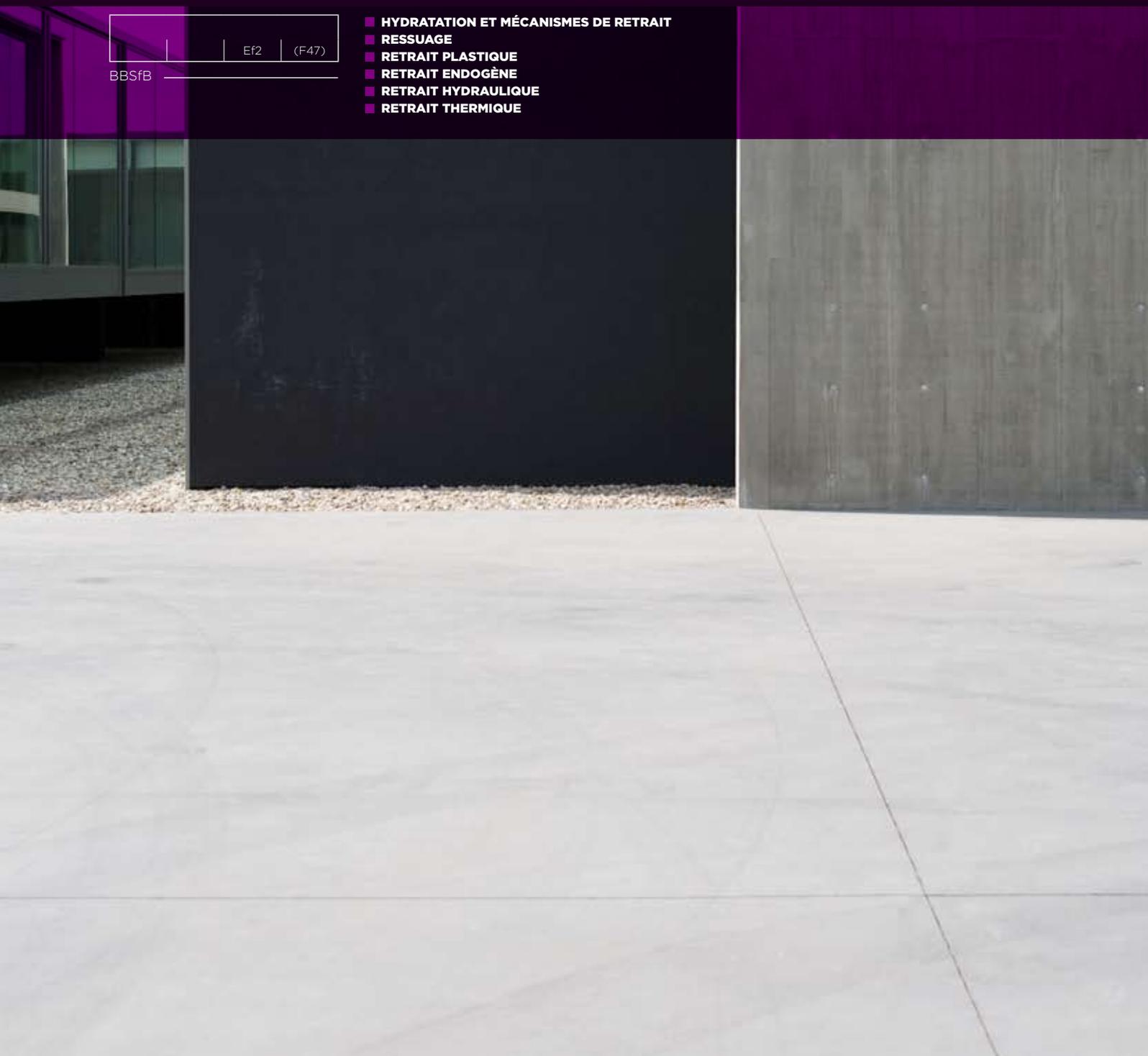




photo PHA

(photo couverture.)
arch. Govaert en
Vanhoutte
©A. Nullens

Les connaissances actuelles de composition de béton et de mise en œuvre permettent d'assurer une durabilité exceptionnelle des ouvrages en béton. Celle-ci passe toutefois par une maîtrise des déformations de ceux-ci. En effet, toute déformation (ou retrait) empêchée joue un rôle central parce qu'elle contrôle la cinétique de pénétration et les transferts des agents agressifs. Lorsqu'il est empêché, le retrait est responsable de la formation de microfissures voire de fissures traversantes. Ceci entraîne une augmentation de la porosité et par conséquent de la perméabilité.

Ce bulletin fait le point sur la question de la maîtrise des fissures, et tout particulièrement des fissures dues aux différents retraits du béton. Le cas des fissurations dues à l'application de forces extérieures autres que celles dues à un retrait gêné ou empêché n'est pas traité ici.

1. LE PROCESSUS D'HYDRATATION ET LES MÉCANISMES DE RETRAIT

La réaction exothermique entre l'eau et le ciment consiste à transformer les silicates et aluminates de calcium anhydres en silicates et aluminates hydratés.

L'hydratation des silicates est relativement lente et joue un rôle essentiel. En effet, elle procurera les résistances mécaniques. Au départ, elle forme des produits d'hydratation (des silicates calciques hydratés) qui prennent une consistance de gel. Mous au départ, ils deviennent, progressivement, plus cohésifs et insolubles. Non encore totalement hydratés, ces gels se trouvent, à ce moment, environ deux fois plus « gros » qu'à l'état anhydre. Au début, ces produits ralentiront les processus de réaction, la formation de ces gels empêche l'eau d'atteindre les cristaux encore anhydres. Mais après un certain temps, le processus est accéléré, la surface spécifique grandit sensiblement, et les fronts d'hydratation se transforment en une structure continue. Cette microstructure en évolution constitue la base de la résistance qui est en train de se développer. Elle est également prépondérante pour la protection du béton contre les substances agressives.

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.

De plus, les réactions d'hydratation sont exothermiques, elles dégagent une grande quantité de chaleur. Cette chaleur s'accumule dans les constructions massives et peut être à l'origine d'un retrait thermique à jeune âge. La vitesse du 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. 1). Dans cette phase, la résistance est encore très faible (période critique), si bien que la dessiccation et les effets thermiques peuvent entraîner des fissurations.

L'eau est donc fondamentale pour l'hydratation du ciment mais en même temps, elle est responsable, conjointement avec les réactions d'hydratation, de divers types de déformation ou de retrait (fig. 2) :

- tassement du béton frais (par gravité, par ségrégation et ressuage de l'eau) ;
- réaction d'hydratation et autodessiccation (retrait endogène y compris le retrait chimique) ;
- évaporation de l'eau de gâchage en cours de prise (retrait plastique) ;
- départ d'eau après durcissement (retrait hydraulique ou de dessiccation, aussi appelé retrait de séchage) ;
- retrait thermique dû à l'abaissement de la température succédant soit à l'échauffement occasionné par la chaleur d'hydratation du ciment (réaction exothermique), soit à la variation thermique du milieu de conservation.

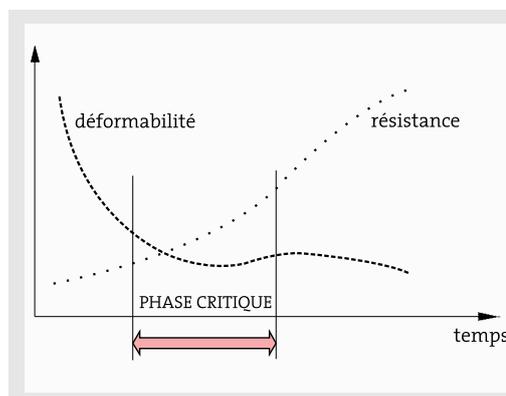


Fig. 1 – Evolution de la déformabilité et de la résistance au cours de l'hydratation

Fig. 2 – Présentation schématique des phénomènes engendrés par les modifications dans le transport d'humidité

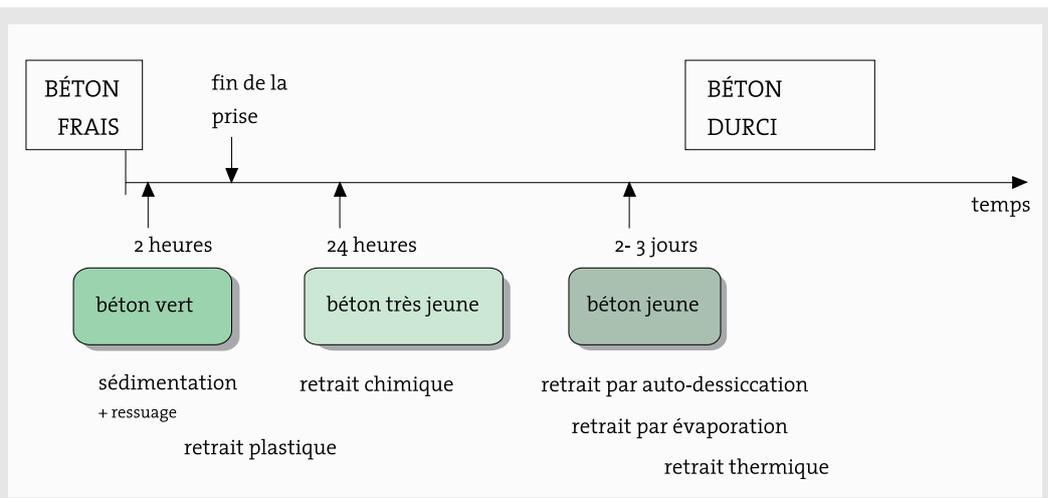


TABLEAU 1 – RISQUES DE FISSURATION EN FONCTION DU TYPE DE RETRAIT

Type de retrait	Risques de fissuration		Utilité / Efficacité de diverses mesures		
	Délat d'apparition	Types de fissures	Composition du béton	Cure	Armatures
Retrait plastique	avant ou pendant la prise	superficielles	faible	très élevée	nulle
Retrait par (auto) dessiccation, c.-à-d. consommation de l'eau du béton durant le durcissement (retrait endogène) ou séchage du béton durci (retrait hydraulique)					
• à court terme	quelques jours à quelques semaines après bétonnage	superficielles à traversantes	très élevée	très élevée	moyenne
• à long terme	quelques mois à quelques années après bétonnage	traversantes	très élevée	élevée	très élevée
Retrait thermique	15 h à 10 jours après bétonnage	superficielles à traversantes	élevée	très élevée	moyenne

Pour être complet, il faut encore noter le retrait de carbonatation qui provient de la diminution de volume lors de la transformation de la portlandite en carbonate de calcium (réaction de carbonatation). Ce retrait est, toutefois, négligeable.

Pour l'ingénieur, le retrait est une déformation différée se produisant en l'absence de charge. Il croît avec le temps pour tendre, après quelques années, vers une limite qui dépend notamment de la composition du béton, des dosages en ciment et en eau, de l'épaisseur des pièces et de l'humidité relative de l'atmosphère environnante. Dans nos conditions climatiques, le retrait unitaire total d'un béton est de l'ordre de 0,4 à 0,8 mm/m (0,4

à 0,8 ‰). C'est, entre autres, l'existence du retrait qui justifie la création de joints dans les structures.

C'est surtout la fissuration due au fait que les effets de retrait sont empêchés qui, en pratique, constitue la conséquence la plus préoccupante pour la qualité et la durabilité des bétons. Le tableau 1 résume les risques de fissuration en fonction du type de retrait.

2. LE RESSUAGE

Le béton fraîchement coulé a tendance à libérer son eau. Sous l'effet de la pesanteur et du compactage, les composants les plus lourds du béton se tassent dans la pâte de ciment aqueuse (sédimentation), poussant l'eau vers le haut. Un film d'eau se forme à la surface du béton frais, on parle de ressuage ('bleeding'). 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 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, la pellicule d'eau en surface du béton frais protège le béton contre la dessiccation. Néanmoins, toute l'eau apportée par ressuage en surface du béton y développe une peau à E/C élevé. Celle-ci est donc de moindre qualité et dans le cas de revêtements de sols par exemple, le béton sera moins résistant à l'usure, au gel, aux sels de déverglaçage, ...

Le ressuage peut entraîner un tassement du squelette du béton, et être à l'origine de fissures ouvertes pouvant mesurer plusieurs dixièmes de millimètres (type A, B ou C - fig. 3). Cependant, tant que le béton garde une déformabilité suffisante, aucune fissuration typique n'est à craindre.

FACTEURS D'INFLUENCE ET PRÉCAUTIONS À PRENDRE

- Les fissures de tassement au-dessus de l'armature (type A - fig. 3) 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 les armatures en vibration.
- Les fissures de tassement peuvent être éliminées par recompactage (en-dessous de la nappe d'armature). Le recompactage ne doit toutefois pas se faire trop tôt. Le moment propice est celui juste avant lequel une aiguille vibrante commence à laisser des traces; ceci est encore possible 2 à 3 heures après le coulage du béton.
- Une température ambiante basse ou un retardateur de prise augmentent le temps de prise et ainsi la durée pendant laquelle le ressuage ou le tassement sont possibles. De même, par temps froid, il y a lieu d'éviter les ciments de classe de résistance 32,5.

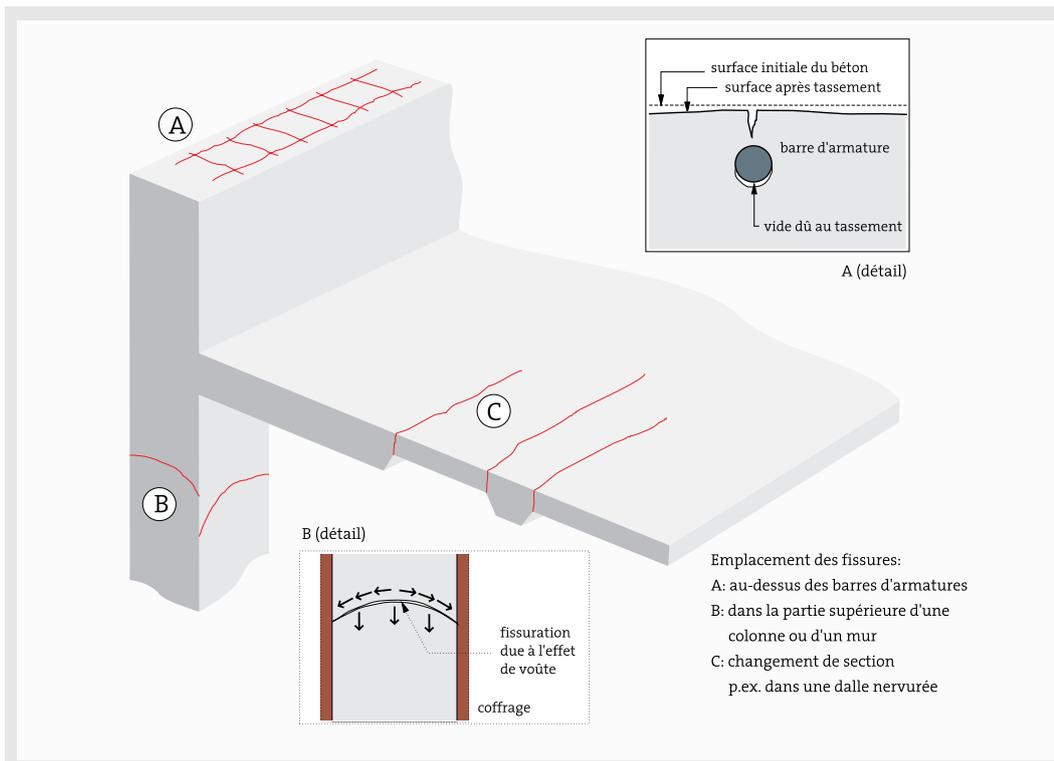


Fig. 3 – Fissures de tassement

Ces ciments sont moins fins que les ciments de classe de résistance plus élevée. Ils offrent donc moins de stabilité au béton. Il est indispensable que le béton soit bien formulé c'est-à-dire :

- un dosage en ciment et éventuellement en additions suffisant ;
- une teneur en eau qui ne doit pas être présente en excès ;
- un squelette granulométrique bien continu, il faut donc être particulièrement attentif au dosage en gravillons 2/8 ;
- un dosage non excessif en adjuvant superplastifiant et surtout pas au détriment du dosage en ciment.

- L'utilisation exclusive d'un sable ayant des grains plats et anguleux ainsi que de gravillons plats, est également défavorable, ils offrent beaucoup de résistance au serrage du béton et laissent plus de vides entre eux, ce qui réduit la compacité. De plus, la demande en eau de ce genre de matériaux est beaucoup plus importante. Les sables monogranulaires augmentent aussi la sensibilité du béton au ressuage.



Une désolidarisation de la couche d'usure d'un sol industriel peut trouver sa cause dans un ressuage important et de longue durée. En effet, si la couche d'usure composée d'1 part de ciment pour 2 parts de sable d'usure durcit plus rapidement que le béton (généralement composé d'1 part de ciment pour environ 6 parts de matériaux inertes), de l'eau de ressuage peut être bloquée entre ces 2 couches provoquant ainsi un défaut d'adhérence. Dans le cas des sols industriels, le ressuage sera d'autant plus important que le béton contient plus d'eau, que celui-ci n'a pas correctement été vibré (vitesse de ressuage lente) et que son temps de prise est long.



Le phénomène de ressuage à la surface du béton est bien connu. Mais il en est d'autres tels que la migration vers le haut d'eau entre le béton et le coffrage. Dans cet exemple, l'eau remonte en se rassemblant en petits ruissellements et en entraînant des fines en surface.

Causes : gros excédent d'eau, granularité du béton discontinue et vibration localement trop prolongée

3. LE RETRAIT PLASTIQUE

Le retrait en phase plastique du béton résulte d'un séchage rapide du mélange non encore durci, principalement en surface, sous l'effet du vent ou de l'ensoleillement ou encore sous l'effet de succion d'une couche inférieure sèche. La différence de température entre l'air et le béton joue également un rôle important : il est évident que le retrait plastique n'est pas uniquement à craindre en période de forte chaleur mais aussi en hiver. Cette dessiccation provoque une diminution de volume considérable (0,2 à 5 mm/m : retrait libre – voir fig. 4) pouvant être jusqu'à 10 fois supérieure au retrait du béton en phase de durcissement (retrait hydraulique).

La fig. 5 (fissures D et E) démontre clairement que surtout les bétons durcissant à l'extérieur

doivent être protégés contre le retrait plastique mais attention, les revêtements de sols intérieurs peuvent également être exposés au vent (courant d'air !).

La fissuration due au retrait plastique est la manifestation visible d'une dessiccation prématurée du béton. Les effets non visibles sont bien plus graves encore pour la qualité du béton. En effet, un défaut de protection contre la dessiccation entraîne :

- une surface de moins bonne qualité résistant mal à l'abrasion (poudroisement de surface, farinage) ;
- une porosité plus forte du béton de peau et donc une réduction des performances du béton (e.a. moins bonne résistance au gel en présence de sels de déverglaçage).

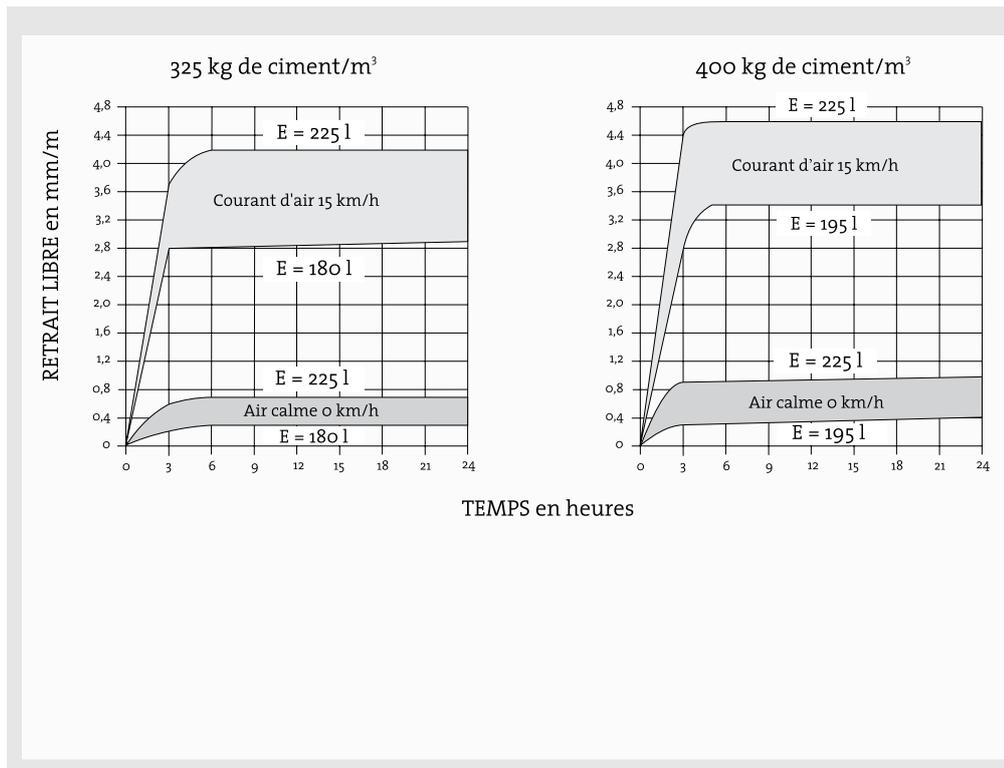


Fig. 4 – Retraits plastiques libres développés sous courants d'air de vitesse variable. Il s'agit dans ces diagrammes de retraits libres mesurés sur de petites éprouvettes. Dans la pratique, il y a lieu de considérer non les valeurs absolues mais les rapports entre valeurs figurant sur ces diagrammes. En effet, il ne faut pas s'imaginer qu'une dalle de béton soumise à un vent de 15 km/h se fissurera au point que la somme des ouvertures des fissures réparties sur 1 m donnera 4 mm ! Par friction sur son coffrage, par fluage plastique, le béton frais s'adaptera plus ou moins à son nouveau volume mais le risque de fissuration et/ou l'ouverture des fissures seront accrus dans les proportions relevées sur ces diagrammes.

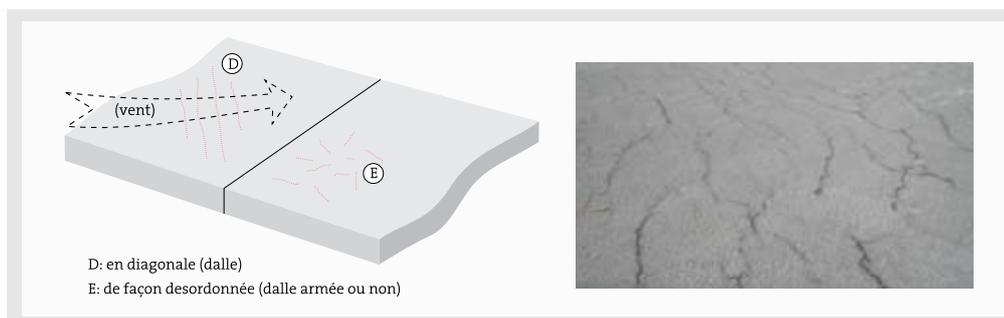


Fig. 5a,b – Fissures dues au retrait plastique



Fig. 7a,b – Voile en béton protégé par une toile après décoffrage

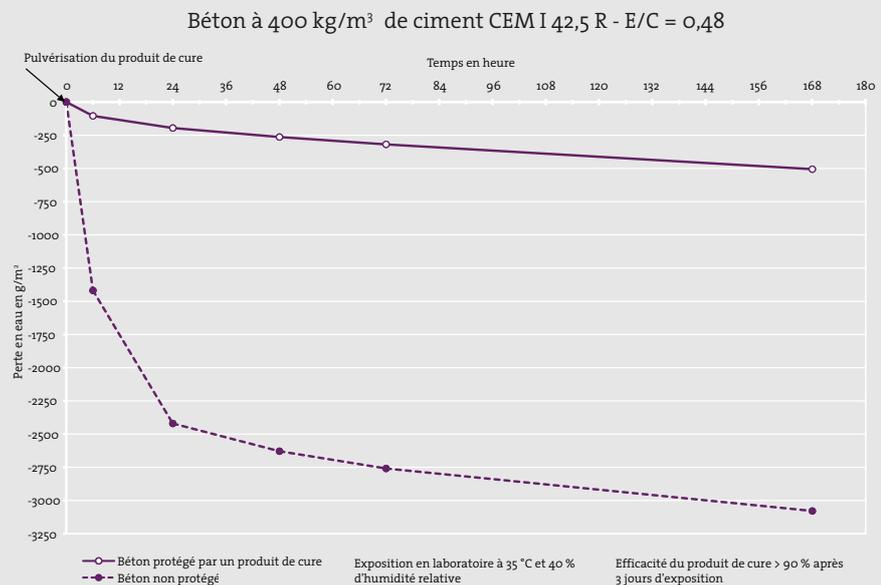
FACTEURS D'INFLUENCE ET PRÉCAUTIONS À PRENDRE

Le principe consiste à retenir l'eau dans le béton en empêchant l'évaporation (« protéger le béton contre la dessiccation »). Pour maintenir l'humidité, il y a lieu de protéger les surfaces exposées par un produit de cure, une membrane imperméable ou un autre procédé en réduisant, autant que le permet l'exécution, le délai entre la coulée du béton et l'application de ces moyens de protection. En effet, les pertes en eau maximales se produisent toujours durant les premières heures après compactage du béton (fig. 6). Généralement, le béton est recouvert d'une feuille de plastique ou on applique des produits de cure par pulvérisation au moment où l'eau de ressuage est pratiquement éliminée étant donné que ces produits ne peuvent pas former un film continu sur une pellicule d'eau.

Dans le cas du béton coffré, le fait de garder les coffrages en place aide également à maintenir l'humidité dans le béton. Néanmoins, il y a toujours lieu de protéger la surface supérieure non coffrée. Après décoffrage, les bétons doivent encore être protégés quelques jours en les couvrant d'une toile qui sera maintenue humide, voire d'une feuille de plastique.

La durée de la protection dépend d'un grand nombre de facteurs (conditions climatiques, type de ciment, composition du béton – des constituants secondaires comme du laitier ou des cendres volantes, 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 risque de retrait plastique –, ...).

Fig. 6 – Evolution de la perte en eau d'éprouvettes de béton (une face exposée) protégées ou non par un produit de cure



Le tableau 2 donne les durées minimales recommandées en jours. Il ne faut pas perdre de vue que la protection n'est pas seulement efficace contre l'apparition des fissures durant les premières heures, mais également plus tard car c'est alors que se développe une bonne partie du retrait après prise. Ce retrait, moindre quant à son ampleur, est toutefois très dangereux quant à ses effets car il agit sur une matière déjà solidifiée, mais encore trop peu résistante. Ce tableau définit les durées minimales de cure en fonction des conditions ambiantes et de l'évolution de la résistance du béton traduite par le rapport f_{cm2}/f_{cm28} . En l'absence de ces données sur béton, une bonne approche est d'utiliser le

rapport des résistances à la compression à 2 jours et 28 jours obtenues lors du contrôle des ciments (mortier fabriqué et testé selon la norme NBN EN 196-1). Ces valeurs sont renseignées sur les fiches techniques des ciments. A noter que la norme prNBN EN 13670 ANB : 2010 définit autrement le développement de la résistance du béton. La définition se base uniquement sur le type de ciment et sur le rapport E/C du béton. Nous sommes toutefois d'avis que cette définition est assez conventionnelle pour représenter le comportement du béton. Nous ne pouvons donc qu'encourager le lecteur à préférer les recommandations du tableau 2.

TABLEAU 2 – RECOMMANDATIONS CONCERNANT LA DURÉE MINIMALE DE LA CURE

Conditions ambiantes	Température à la surface du béton	Evolution de la résistance du béton (*)			
		Rapide	Moyenne	Lente	Très lente
BONNES Pas d'exposition directe au soleil et au vent Humidité relative de l'air $\geq 80\%$	$\geq 10\text{ °C}$ $< 10\text{ °C}$	1 jour 2 jours	2 jours 4 jours	3 jours 5 jours	4 jours 6 jours
NORMALES Ensoleillement moyen et/ou humidité relative $\geq 50\%$	$\geq 10\text{ °C}$ $< 10\text{ °C}$	2 jours 4 jours	3 jours 6 jours	4 jours 8 jours	6 jours 12 jours
MAUVAISES Fort ensoleillement et/ou vent fort et/ou humidité relative $< 50\%$	$\geq 10\text{ °C}$ $< 10\text{ °C}$	3 jours 5 jours	4 jours 8 jours	7 jours 10 jours	10 jours 15 jours
(*) Evolution de la résistance du béton à 20 °C = (f_{cm2}/f_{cm28}) [rapport entre la résistance moyenne à la compression à 2 jours (f_{cm2}) et à 28 jours (f_{cm28})]					
Rapide $\geq 0,5$	Moyenne $\geq 0,3$ à $< 0,5$	Lente $\geq 0,15$ à $< 0,3$	Très lente $< 0,15$		

Les précautions suivantes permettent également de diminuer le risque de fissuration par retrait plastique :

- par temps chaud, réduire la température du béton frais ;
- humidifier les granulats pouvant absorber de l'eau ;
- avant la mise en place du béton, humidifier, lorsque par leur nature ils peuvent absorber de l'eau, les coffrages, fond de coffre ou autres aires en béton ;
- empêcher, par une isolation appropriée, l'échauffement du béton suite à l'ensoleillement; c'est pourquoi il est recommandé d'utiliser

des produits de cure à pigmentation blanche ou métallisée qui forment ainsi un film réfléchissant.

L'ajout au béton de fibres synthétiques (par exemple en polypropylène) permet également de réduire la formation de fissures de retrait plastique. Si dans ce cas des fissures persistent, elles seront plus fines mais aussi plus nombreuses. Indépendamment de la présence de fibres de polypropylène, l'application d'un produit de cure est absolument nécessaire. Les fibres de polypropylène peuvent également réduire la tendance à la sédimentation du béton.

4. LE RETRAIT ENDOGÈNE

Le retrait endogène trouve son origine dans une autodesiccation c'est-à-dire une consommation interne de l'eau lors de l'hydratation du ciment. En effet, tout élément en béton, qui n'est pas immergé sous eau, a tendance à se rétracter au cours du temps, même s'il est isolé du milieu extérieur afin d'éviter sa dessiccation. Les hypothèses 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 : il s'agit du retrait chimique ;
- 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 un phénomène physico-chimique couplé à des effets capillaires dus à la consommation de l'eau des pores.

Pendant les premières heures de l'hydratation du ciment (depuis le contact eau-ciment jusqu'au début de prise), les effets capillaires sont considérés comme négligeables. Au cours de cette phase, le retrait endogène correspond majoritairement à du retrait chimique.

Le retrait endogène est faible mais peut être non négligeable lorsqu'il s'ajoute aux autres formes de retrait. De plus, si ce retrait est empêché ou même simplement gêné dès le début de la prise (support rigide continu, reprise de bétonnage), il constitue souvent une composante non négligeable de la fissuration précoce.

La cinétique d'évolution du retrait endogène suit assez fidèlement celle de l'évolution des résistances mécaniques : très rapide dans les premiers jours, son avancement est de 80 à 90 % à 28 jours. 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.

FACTEURS D'INFLUENCE ET PRÉCAUTIONS À PRENDRE

Le retrait endogène est d'autant plus important que le rapport E/C du béton est faible. A partir d'un faible rapport E/C ($< 0,40$ voire $0,45$) dont les déformations sont bloquées, il n'est pas toujours possible d'éviter la fissuration par autodesiccation, mais il est tout à fait possible de limiter l'ouverture des fissures, par différents moyens :

- en tenant compte des contraintes supplémentaires engendrées 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.

L'intensité du retrait endogène augmente inversement au rapport E/C. Ainsi, les bétons dits courants dont le rapport E/C dépasse 0,50 ont un retrait endogène très faible alors que les bétons à hautes performances ont un retrait endogène non négligeable.

5. LE RETRAIT HYDRAULIQUE

Le retrait hydraulique résulte du séchage lent du béton dans le temps. Il résulte donc d'un déséquilibre hygrométrique entre le béton et le milieu extérieur. Dans le cas où l'humidité relative extérieure est inférieure à l'humidité interne, un processus de séchage se déclenche et génère une diminution de volume. Dans le cas contraire un gonflement se produit.

Le processus de séchage et le retrait qui en résulte sont d'autant plus élevés et rapides que l'excès d'eau non liée dans le béton est important (E/C élevé) car la porosité et la perméabilité de celui-ci augmentent, ce qui accélère encore le phénomène. De plus, lorsque la quantité d'eau non liée s'évapore rapidement, le retrait du béton est également plus élevé et rapide.

La valeur finale du retrait hydraulique se situe généralement entre 0,3 et 0,8 mm/m. Cette valeur dépend essentiellement de la quantité d'eau de gâchage du béton. Toute augmentation du dosage en eau entraîne une augmentation relative deux fois plus grande de la valeur du retrait. D'où l'importance de minimiser la demande en eau d'une recette de béton grâce au choix approprié et au contrôle régulier de la granularité du mélange, en particulier celle des sables.

FACTEURS D'INFLUENCE ET PRÉCAUTIONS À PRENDRE

Les mesures suivantes permettent d'éviter la fissuration due au retrait hydraulique :

- choisir une granularité du béton continue et un diamètre nominal du granulat le plus élevé possible (de manière à minimiser la porosité du mélange et à réduire le plus possible sa demande en eau) ;
- réduire à un niveau optimal le rapport E/C au moyen d'adjuvants superplastifiants (en règle générale, $E/C \leq 0,50$) ;
- appliquer les mesures et les durées de cure recommandées ci-avant ;
- prévoir des joints de retrait, ceux-ci permettent de concentrer les fissures ;
- prévoir une armature minimale suffisante et/ou des fibres métalliques de manière à répartir la fissuration (l'apparition de multiples microfissures est moins préjudiciable que l'apparition de fissures moins nombreuses et largement ouvertes).



Les revêtements de sols extérieurs qui subissent un lissage à l'hélicoptère ne peuvent être protégés contre la dessiccation qu'une fois la finition complètement achevée, c'est-à-dire plusieurs heures après la mise en œuvre proprement dite du béton. Il en résulte donc une période très longue, dangereuse, pour la survenance de fissures dues au retrait en phase plastique. Néanmoins, un réseau de fissures de retrait plastique n'a aucune incidence sur le plan structurel. En effet, ces fissures sont, en général, superficielles. C'est l'ouverture des fissures et non leur présence qui est déterminante. Le risque d'une perte de durabilité au gel (en présence de sels de déverglaçage) qui peut résulter du défaut de protection contre la dessiccation est bien plus préjudiciable.



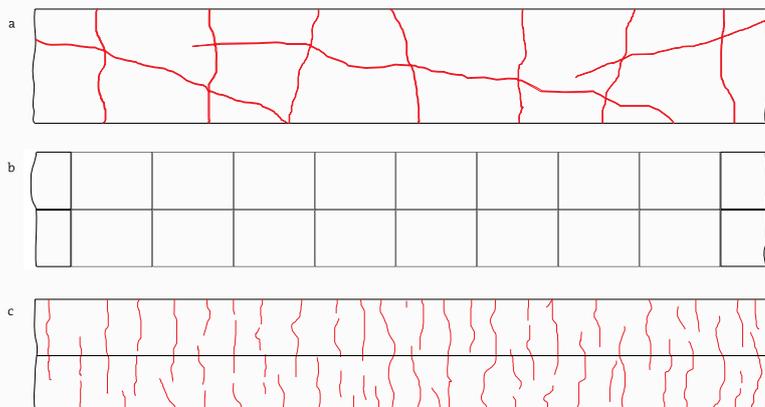
Pulvérisation d'un produit de cure à la surface d'un béton routier fraîchement mis en œuvre.



Lors du durcissement, le béton en séchant, développe du retrait hydraulique. A ce retrait, viennent se rajouter les contractions thermiques. Tous ces rétrécissements, s'ils sont freinés ou empêchés, par exemple pour un revêtement en béton, par le frottement sur le sol ou la fondation, entraînent le développement de contraintes de traction dans la dalle qui peuvent se marquer par l'apparition de fissures erratiques. Contrairement aux fissures dues au retrait plastique, celles-ci sont plus larges et traversantes.



Pour éviter l'apparition de ces fissures non contrôlées, il faut protéger le béton contre l'évaporation de l'eau et appliquer une des solutions disponibles pour contrôler la fissuration : soit les fissures sont concentrées dans des joints de retrait (revêtements en dalles), soit les fissures sont réparties en une série de microfissures (cas du béton armé continu – les fissures sont réparties en de nombreuses fissures fines grâce à une armature longitudinale calculée de manière à assurer la continuité structurelle du béton : ouverture des fissures d'au maximum 0,3 mm et entredistance de 0,80 à 1,5 m)



- a- Fissuration non contrôlée
- b- Fissuration localisée sous des joints de retrait
- c- Microfissuration obtenue grâce à une armature continue

6. LE RETRAIT THERMIQUE

L'hydratation du ciment s'accompagne d'un dégagement de chaleur qui peut donner lieu à une augmentation considérable de la température du béton. Celle-ci peut éventuellement aussi avoir lieu lors d'une variation thermique du milieu de conservation (ensoleillement direct après décoffrage par exemple). Dans la période de refroidissement ultérieure c'est-à-dire de contraction ou de retrait thermique, des fissures peuvent se produire lorsqu'un obstacle empêche le retrait de l'élément. On parle de fissuration par bridage des mouvements d'ensemble. Une fissuration peut également avoir lieu par gradient thermique lorsque 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 alors que le cœur de la structure est en compression. Néanmoins, ce processus n'est, en général, rencontré que dans les pièces massives (plus de 50 cm d'épaisseur) et ne donne pas lieu à des fissures traversantes.

Le retrait thermique peut se calculer par la formule suivante : $\varepsilon = \alpha \Delta T$

avec : α , le coefficient de dilatation thermique du béton;
 ΔT , la différence de température.

A l'état durci, le coefficient α du béton varie de 7 à $14 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (7 à $14 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$). Il varie fortement en fonction du dosage et de la nature des granulats du béton comme le montre la fig. 8. Pour un même ΔT , le béton à base de gravillons roulés siliceux présentera un retrait thermique de 33 % plus élevé que le béton à base de gravillons concassés calcaire. De plus, comme la fig. 9 permet de le constater, la résistance à la traction des bétons à base de gravillons roulés est bien plus faible que celle des bétons à base de concassés dont la rugosité est favorable à la bonne adhérence du mortier du béton.

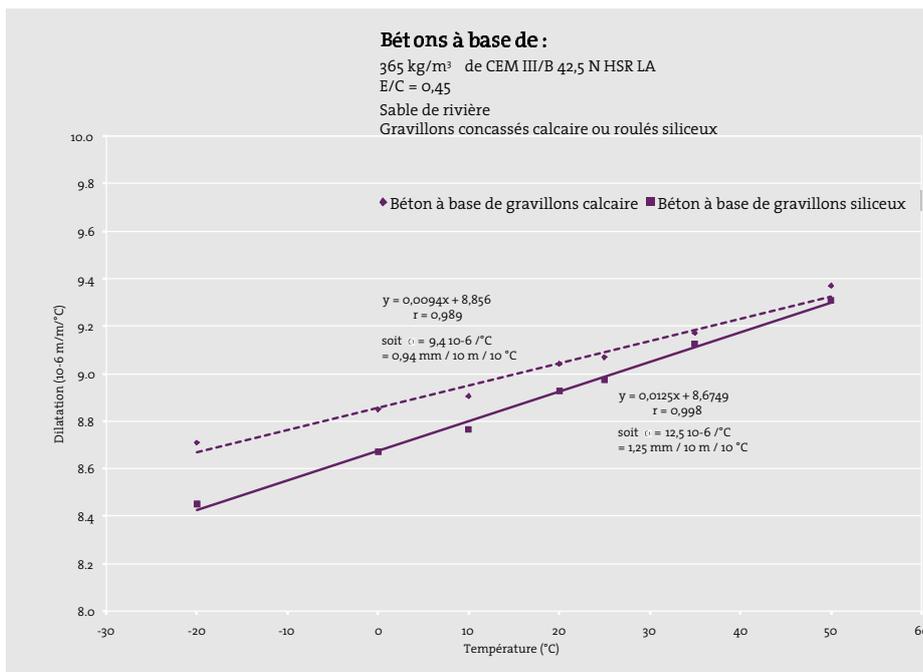
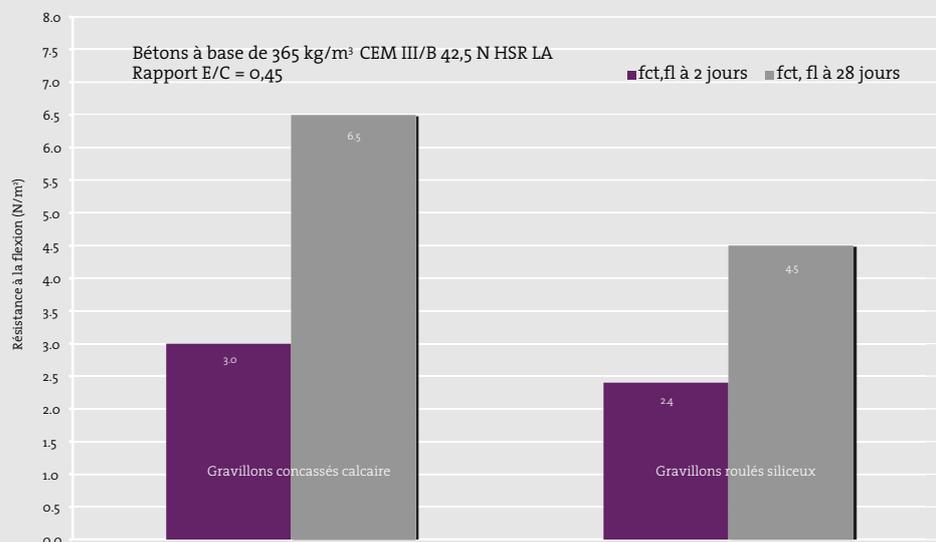


Fig. 8 – Coefficient de dilatation thermique α en fonction du type de gravillons

Fig. 9 – Résistance à la traction par flexion en fonction du type de gravillons du béton



FISSURATION PAR BRIDAGE DES MOUVEMENTS D'ENSEMBLE

Tout élément de béton libre de ses mouvements, s'échauffant et se refroidissant de manière uniforme, se dilate puis se contracte sans être le siège d'aucune contrainte. Il en est d'ailleurs de même pour les autres types de retrait. En pratique, un ouvrage massif de béton est très fréquemment bridé par des éléments préexistants, plus ou moins stabilisés, sur lesquels et/ou entre lesquels il est coulé.

L'évolution du phénomène est, dans tous les cas, similaire et trouve son origine dans le fait que l'hydratation du ciment est un processus chimique qui dégage beaucoup de chaleur. Ainsi, la température du béton augmente jusqu'à ce que les pertes de chaleur par la surface de l'élément de construction soient supérieures à la quantité de chaleur produite par l'hydratation. Cela est représenté schématiquement à la fig. 10 pour un élément de construction d'épaisseur moyenne, en même temps que l'évolution des contraintes lorsque la déformation du béton jeune est entravée.

En s'échauffant, le béton se dilate. En cas de dilatation thermique entravée, la dilatation se transforme au début entièrement en déformation plastique n'engendrant pas de tensions. Les tensions de compression ne se produisent qu'à partir de la température

T_{01} c'est-à-dire lorsque le béton oppose à la dilatation thermique une résistance mesurable. La sollicitation en compression n'est pas forte, car le module d'élasticité est encore bas, et le pouvoir de relaxation (réduction des contraintes par le fluage) encore élevé.

Lorsque le béton refroidit, les tensions de compression sont de nouveau réduites et se transforment en tensions de traction à la seconde température à tension nulle T_{02} . A partir de ce moment, la contraction empêchée du béton mûri donne lieu à des contraintes de traction de plus en plus importantes car le module d'élasticité est déjà élevé et le fluage réduit.

Des fissures traversantes peuvent se former lorsque le refroidissement se poursuit jusqu'à une température à laquelle les tensions sont supérieures à la résistance à la traction du béton. Pour rappel, la déformation limite en traction est proche de $150 \cdot 10^{-6}$ m/m (le béton se fissure à des déformations voisines de $150 \cdot 10^{-6}$ m/m). Sur base d'un coefficient de dilatation thermique α de $10 \cdot 10^{-6}$ m/m/°C, la chute de température ΔT pouvant amener la fissuration est donc:

$$\Delta T = \frac{150 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-6}} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cette fissuration se produit à une grande ampleur ; en effet, sur base du α précité, la contraction par refroidissement est d'environ 0,1 mm/m par 10 °C ; l'addition du retrait endogène, et à terme du retrait hydraulique, accroît encore l'ouverture des fissures.

La distribution et l'orientation des fissures sont aussi assez caractéristiques. Par exemple, pour une paroi verticale en béton, les fissures ont la plupart du temps une allure plus ou moins verticale et concernent toute l'épaisseur de la paroi ; elles semblent s'amorcer à quelques centimètres du sol pour terminer leur parcours à une certaine distance du bord supérieur de l'élément.

REMARQUE :

- En réalité, le phénomène est beaucoup plus complexe car aux mouvements de contraction s'ajoutent, dans bien des cas, des effets de flexion, sans compter l'incidence conjointe du gradient thermique.
- Mis à part le coefficient de dilatation α qui peut être considéré comme constant, le module d'élasticité, la résistance de rupture à la traction du béton, le fluage et l'adhérence acier-béton évoluent sans cesse au cours du durcissement mais aussi différemment. En effet, à très jeune âge, le développement de la rigidité est beaucoup plus rapide que celui de la résistance, ce qui augmente le risque de fissuration puisque la génération de contraintes est fonction du module d'élasticité (la rigidité) et la capacité à résister à ces contraintes est fonction de la résistance. Sur différents bétons de laboratoire fabriqués avec 365 kg/m³ de ciment et un rapport E/C égal à 0,45 ou 0,50, le module d'élasticité statique à 2 jours varie entre 70 et 81 % de celui à 28 jours, tandis que la résistance à la traction à 2 jours varie entre 27 et 47 % de celle à 28 jours. Une évolution du module d'élasticité est donnée à la fig. 11 ci-après selon [4]. Ce graphique confirme les résultats de laboratoire.

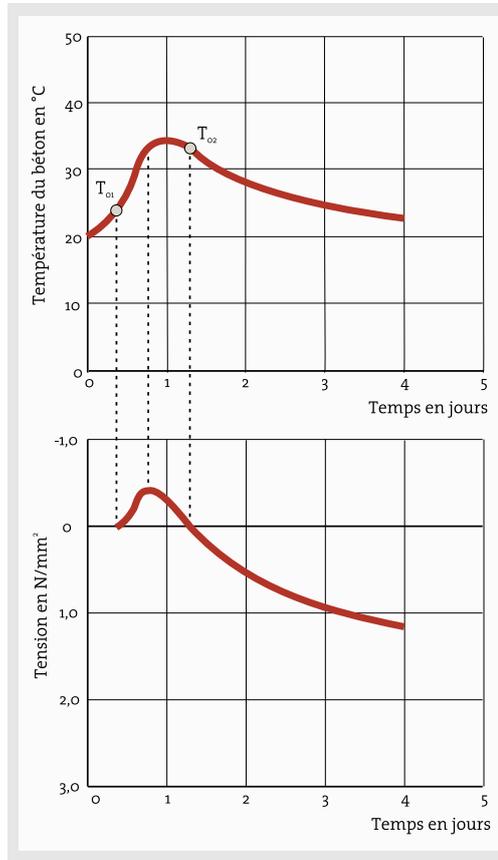


Fig. 10 – Evolution de la température pendant l'hydratation dans les éléments de construction d'épaisseur moyenne et développement des contraintes en cas de déformations entravées

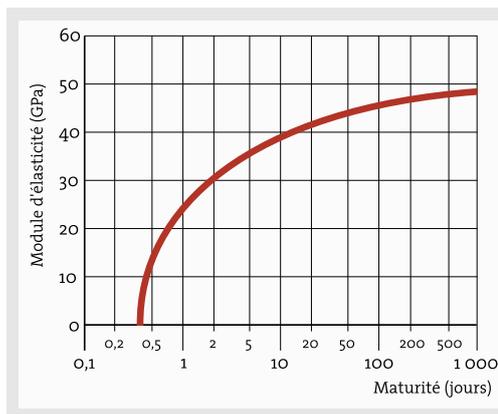


Fig. 11 – Evolution du module d'élasticité du béton au cours du temps

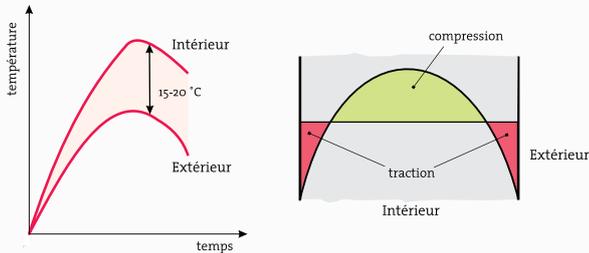


Fig. 12 – Diagramme des contraintes suite à une différence de température de 15-20 °C entre la face extérieure et le cœur du béton



Fig. 13 – Fissures de retrait thermique empêché (bridage) dans un voile en béton. Le radier en béton préalablement bétonné entrave les déformations du béton lors de la contraction thermique.

FISSURATION PAR GRADIENT THERMIQUE

Tous les auteurs s'accordent à citer des écarts de température de 15 à 20 °C entre la face extérieure et le cœur du béton comme suffisants pour engendrer des fissures. Ceci peut être le cas lorsque la surface se refroidit plus rapidement que le cœur (généralement au décoffrage des éléments). Le diagramme des contraintes prend alors la forme parabolique comme représenté à la fig. 12 et la fissuration naît en surface.

ANALYSE DE QUELQUES CAS

Les fig. 14 et 15 donnent l'évolution de la température dans des voiles de bassins de stations d'épuration. Les températures ont été mesurées par thermocouples intégrés et posés environ à mi-hauteur du voile et ce depuis la mise en œuvre du béton.

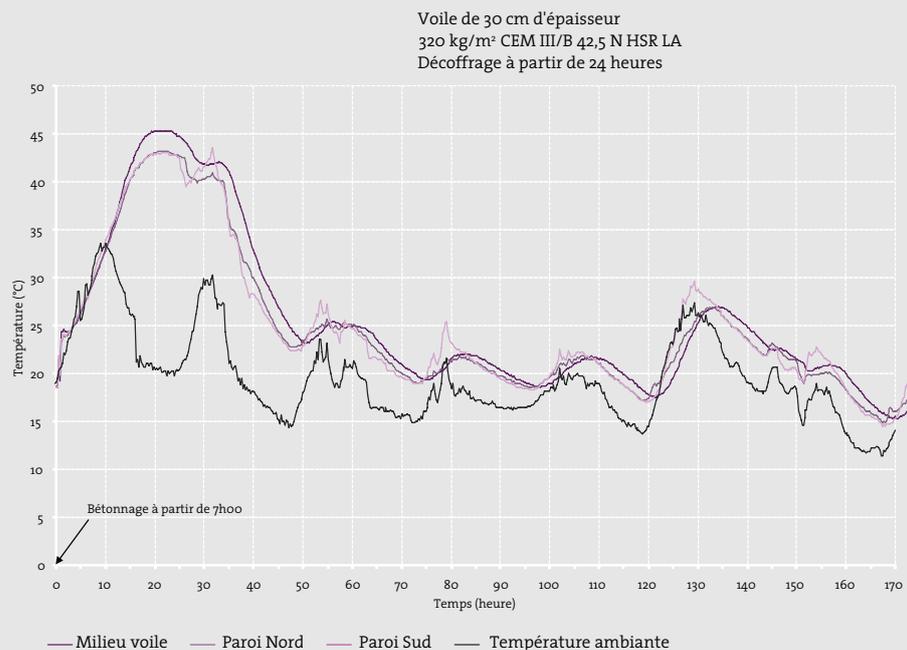


Fig. 14 – Cas n° 1 : ciment CEM III/B 42,5 N HSR LA, décoffrage rapide

La fig. 14 nous permet de constater que :

- la température du béton augmente de 20 à 45 °C ; cette augmentation de température trouve son origine dans la chaleur dégagée par l'hydratation du ciment mais aussi dans l'augmentation de la température ambiante (de 20 à 33 °C) ;
- les différences de température entre le milieu du voile et les parois nord et sud sont faibles et le restent après décoffrage (ensoleillement direct de la paroi sud) ; le risque de fissuration par gradient thermique est donc nul ;
- le décoffrage à 24 heures d'âge du béton provoque une chute rapide des températures (plus de 20 °C) ; celle-ci est néanmoins légèrement compensée par l'augmentation de la température ambiante (jour n° 2) ; le risque de fissuration thermique par bridage est bien réel et dépend :
 - de la résistance à la traction du béton (celle-ci est faible vu la teneur en ciment et le jeune âge du béton) ;
 - du module d'élasticité du béton (celui-ci est probablement peu élevé vu la faible teneur en ciment et le très jeune âge du béton) ;
 - de la relaxation éventuelle des contraintes par fluage (la capacité de relaxation est néanmoins très faible vu le refroidissement très rapide) ;
 - éventuellement d'autres mouvements de contraction qui peuvent s'ajouter (retraits endogène et hydraulique) ;
 - du pourcentage d'armature horizontale utilisé ainsi que de la répartition des armatures (il s'agissait dans ce cas précis de 2 nappes de 21 barres de 12 mm de diamètre pour une hauteur de 3 m soit de 0,53 % d'armatures horizontales).
- du degré de retenue du voile, de ses dimensions ainsi que de sa courbure éventuelle (un élément courbe a plus tendance à se fissurer qu'un élément droit) ;

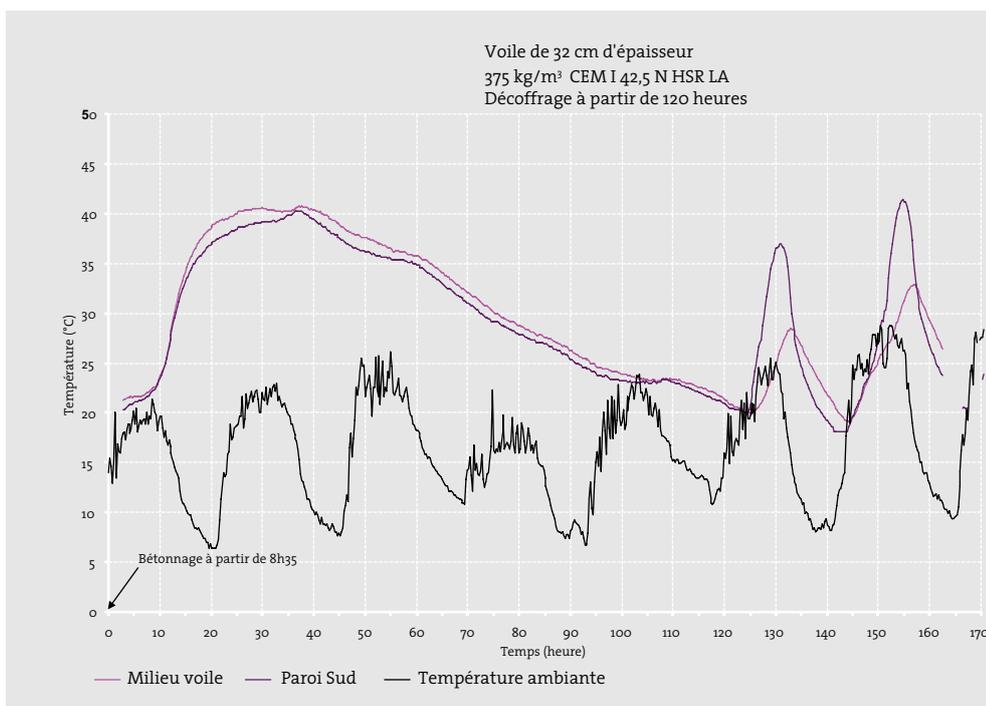


Fig. 15 – Cas n° 2 : ciment CEM I 42,5 N HSR LA, décoffrage à 5 jours

La fig. 15 nous permet de constater que :

- la température du béton augmente seulement d'environ 20 °C malgré les teneurs élevées en ciment ;
- avant décoffrage, la différence de température entre le milieu du voile et la paroi sud est faible ; le risque de fissuration par gradient thermique est donc nul ;
- le décoffrage des bétons à 120 heures a permis un refroidissement lent et total (les températures rejoignent la température ambiante), ceci est favorable à l'absence de fissuration thermique par bridage et ce d'autant plus que l'augmentation de température était limitée à 20 °C ;
- après décoffrage, l'ensoleillement direct de la paroi sud du voile provoque une augmentation de la température de 17 °C alors que celle du milieu du voile n'augmente que de 8 °C ; il s'ensuit un refroidissement important des températures en fin de journée ; il en est de même pour le jour suivant ; étant donné ces augmentations de température après décoffrage, il existe un petit risque de fissuration par gradient thermique et par bridage ; néanmoins, le décoffrage tardif permet au béton de déjà offrir une certaine résistance à la traction ; de plus, le pourcentage d'armatures horizontales utilisé pour la construction de ce bassin est très élevé (1,14 % d'acier).

FACTEURS D'INFLUENCE ET PRÉCAUTIONS À PRENDRE

Les mesures suivantes relatives à la composition des bétons et aux techniques d'exécution et de conception permettent d'éviter voire de diminuer la fissuration due au retrait thermique :

- choix du type de ciment et de la teneur en ciment : les types de ciment qui développent une faible chaleur d'hydratation – ciment désigné par LH (Low Heat) et conforme à la norme NBN EN 197-1/A1 : 2005 – sont évidemment à favoriser pour les ouvrages de masse de plus de 50 cm d'épaisseur. A teneur égale en ciment, ils font, en effet, chuter le pic de température de 10 à 15 °C par rapport aux ciments ordinaires mais ce développement lent de la chaleur d'hydratation freine le développement des résistances

mécaniques. Une moindre teneur en ciment ordinaire – pour autant qu'elle soit compatible avec les exigences de durabilité et de résistance – limitera également l'augmentation de température ;

- nature du granulat : comme signalé auparavant, la nature minéralogique du granulat, élément majoritaire de la composition, a son importance car le coefficient de dilatation thermique α du granulat, variable de 7.10^{-6} à 14.10^{-6} /°C, influence forcément celui des bétons. Il y a lieu de favoriser l'emploi de gravillons calcaires concassés car ces derniers possèdent un coefficient de dilatation thermique plus faible et procurent au béton une meilleure résistance à la traction que des gravillons roulés siliceux ;
- rapport E/C du béton et utilisation d'adjuvants : le développement de la résistance est favorisé par un faible rapport E/C si bien que l'usage d'un superplastifiant est toujours utile. Les retardateurs de prise permettent, par temps chaud, de conserver la rhéologie du béton frais plus longtemps et facilitent ainsi la mise en place sans ajout d'eau complémentaire. Ils ne font cependant que postposer le problème éventuel dû à l'effet de la chaleur ;
- température du béton : il y a lieu de tenir compte de la température du béton durant le coulage et donc, par temps chaud, de limiter la température du béton frais à maximum 25 °C ;
- armatures : la quantité d'armatures et la bonne répartition de celles-ci (petits diamètres, espacements faibles, barres longitudinales placées du côté extérieur, enrobages faibles tout en respectant les directives quant à la protection du béton armé contre la corrosion) ont une grande importance. Les armatures n'empêchent pas le béton de se fissurer mais permettent de contrôler la fissuration. De nombreuses petites fissures, c'est-à-dire des fissures « fermées » qui ne compromettent pas l'étanchéité de la structure, sont ainsi obtenues au lieu de quelques fissures très ouvertes ;
- température ambiante : l'influence d'une période de chaleur est évidente sur le développement de chaleur du béton. Si la seconde température à tension nulle T_{02} (voir fig. 10),

TABLEAU 3 – RECOMMANDATIONS CONCERNANT LA MISE EN ŒUVRE DU BÉTON ET LA CURE EN FONCTION DES CONDITIONS AMBIANTES

Hygrométrie	Température ambiante			
	De 5 à 20 °C	De 20 à 25 °C	De 25 à 30 °C	> 30 °C
De 60 à 100 %	Conditions normales de bétonnage			Cure renforcée
De 50 à 60 %	Cure renforcée			Bétonnage à partir de 12 heures
De 40 à 50 %	Cure renforcée		Bétonnage à partir de 12 heures	Cure renforcée
< 40 %			Cure renforcée	Pas de bétonnage

est élevée, les contraintes de traction dues au refroidissement seront plus importantes que dans le cas d'un béton mis en œuvre à plus faible température. Ainsi, les recommandations du tableau 3 seront respectées. Celles-ci permettent également de diminuer les retraits plastique et hydraulique du béton ;

- refroidissement, en phase de durcissement, des structures en béton de forte épaisseur : en faisant circuler de l'eau de refroidissement à travers des tubes noyés dans le béton, les écarts de température ainsi que les grands gradients de température dans la structure peuvent être limités. Toutefois, l'application d'un procédé de refroidissement ne peut se faire sans déterminer au préalable l'emplacement des tubes dans la structure et l'intensité du refroidissement. Il convient par ailleurs d'enregistrer et de contrôler l'évolution des températures ;
- limiter autant que possible le bridage (limiter les déformations différentielles des différentes phases de bétonnage) c'est-à-dire dans le cas d'un voile coulé sur un radier :
 - retarder le retrait de séchage du radier ; à cette fin, il convient de protéger la dalle de plancher contre la dessiccation. Une protection économique et efficace peut être obtenue de manière simple en plaçant le radier sous eau. En effet, le béton en contact permanent avec l'eau ne présente pas de retrait ;

- couler des voiles aussi rapidement que possible après la mise en place du radier. Il est, de plus, préférable de réduire les différences d'âge du béton entre chacune des étapes de bétonnage de manière à réduire le plus possible les effets néfastes du retrait différentiel entre phases de bétonnage (fig. 16 à 18).

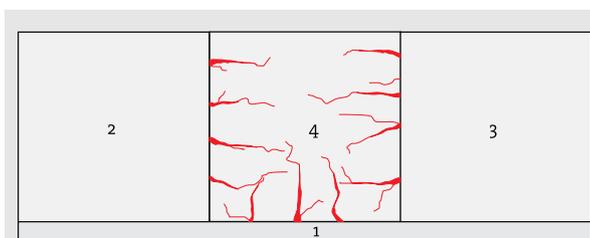


Fig. 16 – Etapes de bétonnage, situation défavorable (risque élevé de fissuration)

- Lors du bétonnage de la phase 4, la température du béton 4 est plus élevée que celle du radier 1 et des voiles 2 et 3.
- Lors du durcissement du voile 4, sa température augmente ; celle des bétons 1, 2 et 3 à peine ⇒ dilatation du béton 4 mais entravée par les bétons 1, 2 et 3. Etant donné que le voile 4 n'est pas encore très rigide, ceci conduit à de faibles contraintes : pas de fissuration.
- Lors du refroidissement du voile 4, celui-ci veut se rétracter mais ceci est empêché par les bétons 1, 2 et 3 ⇒ risque élevé de fissuration car béton rigide (module d'élasticité élevé) et peu résistant en traction (béton jeune).

Fig. 17 – Etapes de bétonnage, situation plus favorable (faible risque de fissuration)

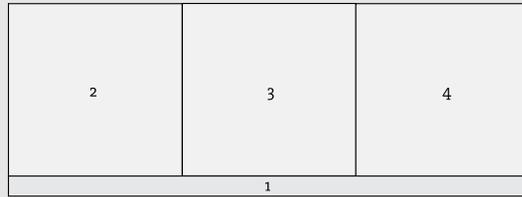
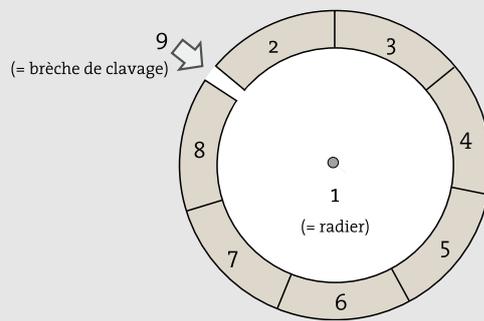


Fig. 18 a,b – Etapes de bétonnage, réalisation d'un claveau. Dans des grands ouvrages fermés (bassins par exemple), le risque de fissuration peut aussi être considérablement réduit en créant des « brèches de clavage », à savoir des joints provisoires de retrait, laissés ouverts si possible durant quelques mois et bétonnés ultérieurement.



- Décoffrage : prolonger la durée avant décoffrage permet de protéger le béton contre toute dessiccation et de laisser descendre la température de l'élément sans création de choc thermique brusque (brusque refroidissement sans permettre une relaxation des contraintes ou ensoleillement direct du béton). Ainsi les voiles ne seront jamais décoffrés à 24 heures mais au minimum lorsque la différence de température entre le cœur de l'élément en béton et la température ambiante est inférieure à 15 °C. Après décoffrage, les durées de cure du béton (conformément au tableau 2) seront encore respectées par une protection efficace du béton contre la dessiccation. Pratiquement, dans le cas d'ouvrages massifs, il faut éviter l'utilisation de coffrages trop isolants (par exemple les coffrages en bois) ou alors il ne faut les démonter que lorsque la température à cœur a chuté, ce qui prend un temps parfois assez long afin de limiter les gradients thermiques.

CAS DES REVÊTEMENTS DE SOLS

Pendant la prise et le durcissement du béton, les revêtements de sols (sols industriels, revêtements routiers, ...) sont aussi le siège de mouvements thermiques dus au développement de la chaleur d'hydratation et aux variations de la température extérieure. Les variations thermiques qui en résultent sont à mettre en relation avec les phénomènes décrits ci-avant (voir fig. 10, 14 et 15).

Les fig. 19 et 20 présentent des exemples d'évolution de la température dans un béton routier. Les températures sont mesurées par thermocouples intégrés et posés environ à mi-épaisseur du revêtement et ce depuis la mise en œuvre du béton. Nous pouvons constater que l'augmentation de la température ainsi que le refroidissement qui en découle provoquent, ici aussi, un retrait

thermique important. En effet, les refroidissements sont nettement supérieurs à 15 °C, l'apparition de fissures transversales est inévitable. En ce qui concerne l'exemple de la fig. 19, le refroidissement s'amorce, dans le cas du revêtement non isolé, dès l'âge de 15 heures. Dans le cas du revêtement isolé, le refroidissement est retardé ce qui est favorable pour la maîtrise de la fissuration. Dans le cas de l'exemple de la fig. 20, le refroidissement s'amorce environ 4 heures et demie après la mise en œuvre du béton. La température ambiante très élevée est responsable de ce laps de temps très court et provoque, de plus, un refroidissement, c'est-à-dire un retrait du béton, important ($\Delta T_{\max} = 55,0 - 30,2 = 24,8$ °C en 16 heures et demie).

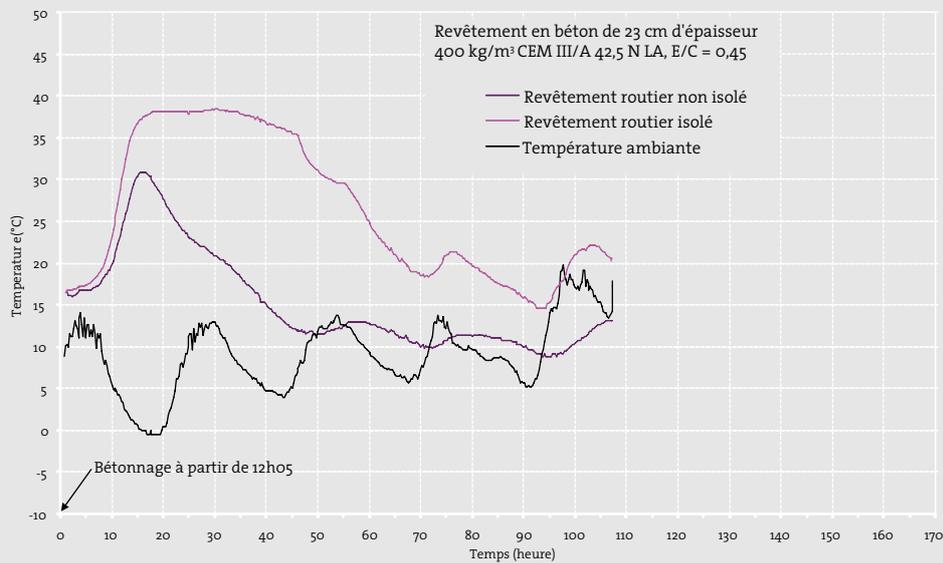


Fig. 19 – Exemple d'évolution des températures dans un revêtement routier en béton, cas où la température ambiante est faible, temps frais

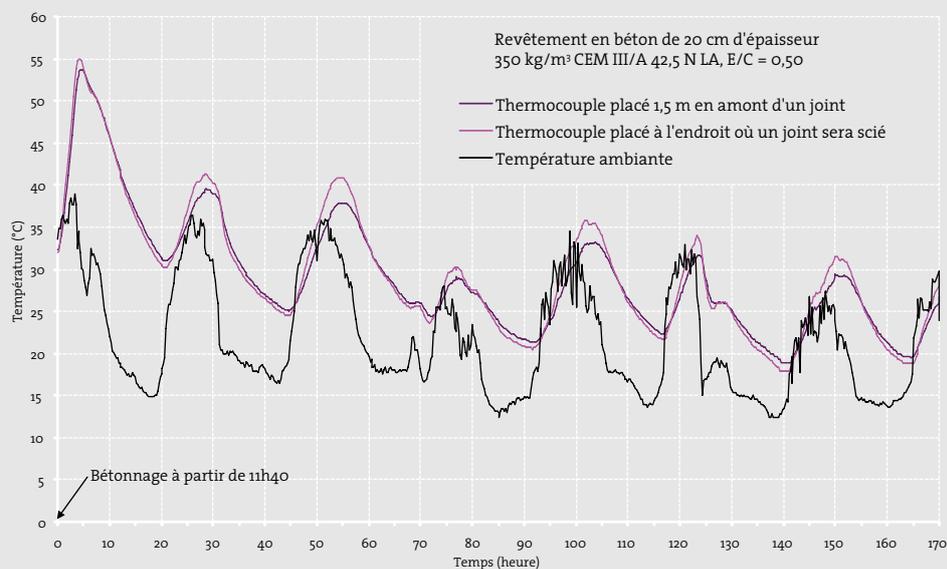


Fig. 20 – Exemple d'évolution des températures dans un revêtement routier en béton, cas où la température ambiante est élevée, temps très chaud

En plus des mouvements de dilatation et de contraction, les variations brusques de température induisent un gradient thermique dans la dalle, c'est-à-dire une différence de température entre les faces supérieure et inférieure. Ce gradient tend à déformer les dalles, mais ces déformations sont contre-carées par le poids propre du béton. Il en résulte des contraintes internes qui sont d'autant plus

élevées que le gradient est important et que la dalle est longue, large et épaisse. C'est ainsi que la combinaison des retraits hygrométriques et des mouvements thermiques peut, en l'absence de toute précaution, avoir des conséquences graves pour le béton pouvant aller jusqu'à la fissuration du revêtement.

Pour remédier aux contraintes, il y a lieu:

- de réduire la longueur des dalles en réalisant des joints rapprochés dans le cas du béton non armé ou faiblement armé ou encore d'utiliser une armature continue (les fissures faisant office de joints) (fig. 21) ;
- de limiter la largeur des dalles par des joints longitudinaux ;
- de limiter, au moins pendant les 72 premières heures, les échauffements brusques de la surface (produit de cure avec protection réfléchissante).

De même, lorsqu'un revêtement en béton est mis en œuvre le long d'un revêtement préalablement bétonné (par exemple une seconde bande de roulement mise en œuvre après une première bande de roulement), il y a lieu de toujours faire coïncider tous les joints. En effet, un joint créé dans une bande doit absolument se poursuivre dans les bandes adjacentes. Les mouvements qui se créent dans un béton durci vont provoquer des fissures dans le béton adjacent en phase de durcissement (on parle de fissure de sympathie).

De manière générale, pour l'établissement des joints, les règles suivantes sont à respecter :

- chaque dalle entre les joints doit être la plus carrée possible ; le ratio longueur/largeur doit être compris entre 1 et 1,5 ;
- les dalles de forme complexe ne doivent jamais contenir des angles aigus, les joints doivent toujours former des angles de 90° ou plus ;
- la distance entre les joints doit être inférieure à 25 fois l'épaisseur du revêtement pour les

sols extérieurs et 30 fois l'épaisseur pour les sols intérieurs. En effet, les sols intérieurs, pour autant qu'ils soient bétonnés après construction du bâtiment, sont moins sujets à l'ensoleillement et donc aux variations thermiques ;

- la superficie des dalles non armées ne doit pas dépasser 25 m² à l'extérieur et 30 m² à l'intérieur ;
- l'amorce sciée doit avoir une profondeur minimale de $\frac{1}{3}$ de l'épaisseur de la dalle et ces joints doivent être réalisés entre 5 et 24 heures après bétonnage ; il y a, en fait, lieu de tenir compte du moment où s'amorce le refroidissement (voir fig. 19 et 20) et donc le moment où apparaissent les contraintes de traction ;
- la continuité de tous les joints doit être assurée, il faut bannir des intersections en « T ».

Si pour une raison ou une autre, ces règles ne peuvent être respectées (au croisement de 2 voiries par exemple), les dalles seront pourvues d'une armature. Néanmoins, afin que celle-ci puisse maîtriser une fissuration éventuelle, elle doit être posée dans la partie supérieure de la dalle et être discontinue (sciée !) au droit des joints. Une armature constituée de barres de 10 mm de diamètre disposées tous les 15 cm dans les 2 sens avec un enrobage de 40 mm constitue généralement une bonne solution. Il faut noter que plus cet enrobage est important, plus l'efficacité de cette armature à contrôler la fissuration sera faible.

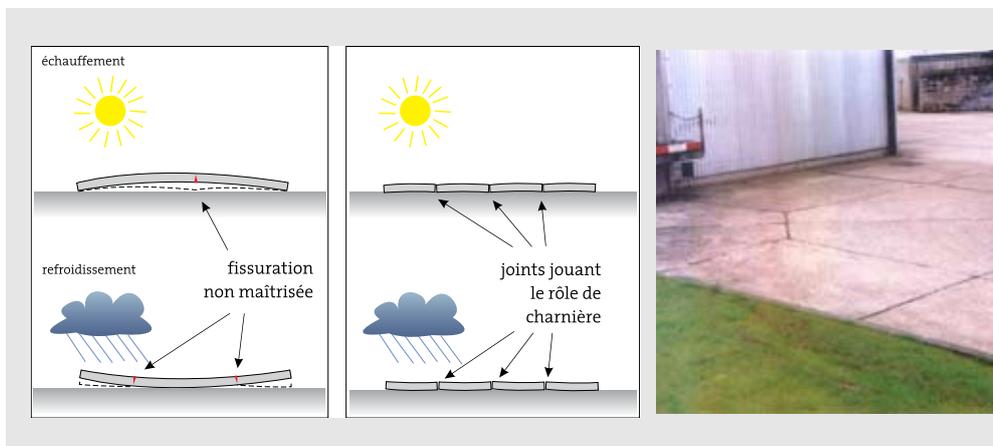


Fig. 21 – Déformation des dalles due au gradient de température

Fig. 22 – La disposition correcte des joints dans un revêtement en béton est essentielle afin de se prémunir contre l'apparition d'une fissuration erratique.

TABLEAU 4 – ESPACEMENT MAXIMAL RECOMMANDÉ DES JOINTS POUR REVÊTEMENTS DE SOLS INTÉRIEURS ET EXTÉRIEURS

Épaisseur de la dalle [cm]	Entre-distance maximale des joints [m]	
	Revêtement de sol intérieur	Revêtement de sol extérieur
10	3,0	2,5
12	3,6	3,0
14	4,2	3,5
16	4,8	4,0
18	5,4	4,5
20	5,0 à 6,0	5,0
22	5,0 à 6,0	5,0
25	5,0 à 6,0	5,0

7. CONCLUSIONS

La fissuration précoce est très pénalisante pour la durabilité des ouvrages. Elle est, en pratique, toujours évitable. Voici les principales précautions pour prévenir toutes les fissurations précoces :

- composer le béton de manière à ce que son dosage en éléments fins (ciment compris) soit optimal, et choisir la dimension du plus gros granulats compatible avec la dimension du coffrage et l'encombrement des armatures. Le risque de fissure par tassement du béton frais est ainsi réduit et une bonne rétention de l'eau de gâchage est assurée ;
- appliquer, au plus vite après compactage du béton, un produit de cure ou une méthode de cure efficace ;
- prendre en compte, dès la conception de l'ouvrage, le risque de retrait thermique ;
- s'affranchir des conditions climatiques lors du bétonnage ; le vent, la température, l'ensoleillement et l'humidité relative ont une action directe sur la fissuration et l'augmentation de la valeur de ces paramètres provoque un accroissement de la valeur du retrait et du risque de fissuration.



T-3

Ce bulletin est publié par :

FEBELCEM

Fédération de l'Industrie Cimentière Belge
Boulevard du Souverain 68 - 1170 Bruxelles
tél. 02 645 52 11 - fax 02 640 06 70
www.febelcem.be
info@febelcem.be

Auteur :

Ir C. Ployaert

Photos :

Ing. Paul Van Audenhove
(sauf mention contraire)

Dépôt légal :

D/2010/0280/11

Ed. resp. : A. Jasienski

infobeton.be

BIBLIOGRAPHIE

- [1] VERHOEVEN K.
Le retrait dans le béton jeune en cours de durcissement
Dossier ciment, bulletin n° 16, FEBELCEM, 1998
- [2] NEVILLE A. Propriétés des bétons Paris : Eyrolles, 2000
- [3] La durabilité des bétons - Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques, Paris : Presses de l'école des ponts et chaussées, 2008
- [4] ACKER P., MICHAUD-POUPARDIN V., Limiter la fissuration : conditions indispensables à la durabilité des structures en béton, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 238, 2002
- [5] VENSTERMANS J., VAN NIEUWENBURG D., VYNCKE J.
Fissuration des murs en béton armé, CSTC magazine, 1995
- [6] PLOYAERT C., Recommandations pour la construction en béton des ouvrages d'épuration des eaux, FEBELCEM, 2006
- [7] SION P., La route en béton de ciment, Fédération de l'Industrie cimentière, 1988
- [8] Scheuren in jong beton, ENCI HeidelbergcementGroup, 2001
- [9] Guide pratique - Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables HOLCIM, 2004
- [10] NBN EN 13670 : 2010 et prNBN EN 13670 ANB : 2010 - Exécution des structures en béton