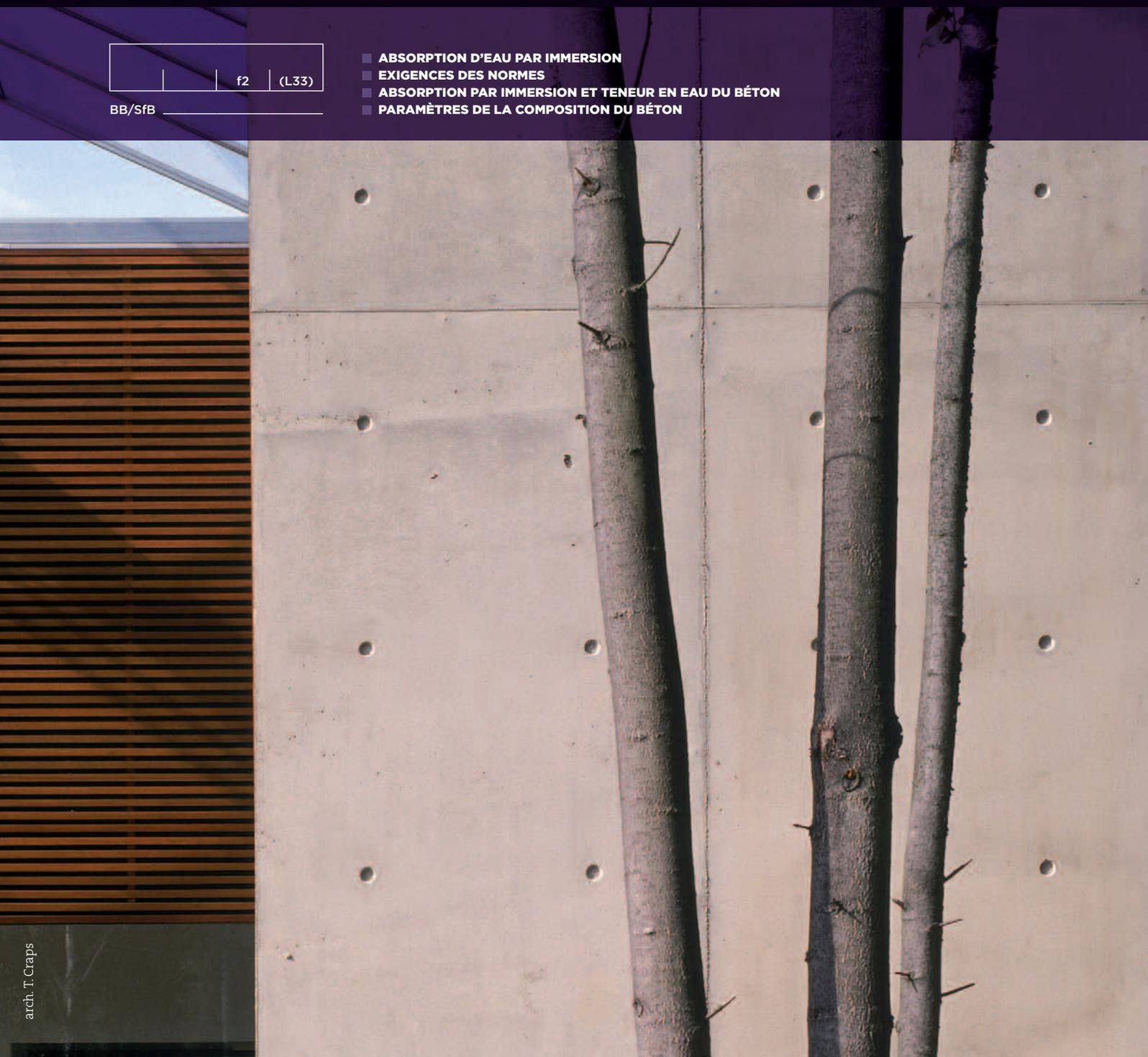


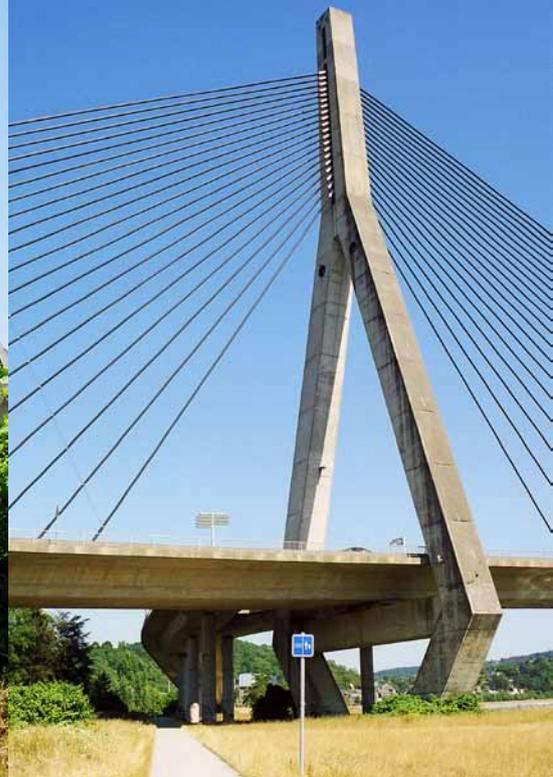
# DURABILITÉ DES BÉTONS PAR LA MAÎTRISE DE L'ABSORPTION D'EAU

TECHNOLOGIE | NOVEMBRE 2009

f2 (L33)  
BB/SfB

- ABSORPTION D'EAU PAR IMMERSION
- EXIGENCES DES NORMES
- ABSORPTION PAR IMMERSION ET TENEUR EN EAU DU BÉTON
- PARAMÈTRES DE LA COMPOSITION DU BÉTON





Maîtriser l'absorption d'eau par immersion du béton est une condition essentielle pour garantir la durabilité des bétons. (photos PVA)

La durabilité des bétons de ciment exige un contrôle efficace et effectif de tous les facteurs susceptibles d'affecter son comportement dans le temps. L'expérience montre que les facteurs d'influence, de très loin les plus importants en matière de durabilité et qui doivent donc faire l'objet d'un contrôle suivi, sont la composition du béton (teneur en ciment et rapport eau-ciment), l'enrobage des armatures, la compacité du béton et la protection du béton frais en cours de durcissement.

La compacité du béton influence directement sa porosité. Le but de cette publication est d'examiner cet aspect « porosité ». Celle-ci est généralement contrôlée sur béton durci par la mesure de l'absorption d'eau par immersion. En outre, la norme NBN B 15-001:2004 permet aujourd'hui de prescrire des bétons à performances en intégrant des spécifications d'absorption d'eau par immersion. Maîtriser l'absorption d'eau du béton peut paraître simple, mais encore faut-il que chacun apporte sa pierre à l'édifice. La durabilité des ouvrages en béton est pourtant à ce prix.

A la lumière des connaissances actuelles sur le sujet, cette publication examine les paramètres principaux permettant de garantir les critères d'absorption d'eau par immersion de la norme NBN B 15-001:2004.

# 1. L'ABSORPTION D'EAU PAR IMMERSION D'UN BÉTON

Le béton est un matériau poreux. En d'autres termes, il comporte des pores ou vides. Ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs.

La porosité est la conséquence naturelle de la quantité d'eau mise en plus de celle nécessaire à l'hydratation et des vides éventuels présents dans les granulats. Le désagrément de cette porosité se marque à deux niveaux : sur la résistance mécanique et sur la durabilité du béton. La quantité d'eau pouvant être liée chimiquement par un ciment Portland est d'environ 25 % de la masse de ciment. En outre, une quantité d'eau, environ égale à 15 % de la masse de ciment, est liée physiquement. Cette eau est adsorbée à la surface des produits d'hydratation ou constitue un film d'eau mono moléculaire entre les produits de cristallisation plats ('interlayer water'). L'eau liée physiquement s'évapore complètement dans une étuve à 105 °C, mais, malgré cette liaison libre, elle est incapable de réagir avec le ciment non encore lié. De plus, les produits d'hydratation occupent un volume absolu inférieur à la somme des volumes absolus de l'eau et du ciment qui ont déjà réagi. De l'espace s'est donc libéré : ce sont les pores capillaires. Ceux-ci sont vides ou remplis d'eau. En effet, pour une bonne ouvrabilité du béton, le facteur E/C du béton est généralement supérieur à 0,40. Une partie de l'eau n'est donc pas liée chimiquement ni physiquement et s'installe dans les pores capillaires (eau interstitielle), d'où elle peut éventuellement s'évaporer ultérieurement. Cette formation de pores capillaires signifie un affaiblissement mécanique du béton. Etant donné que des substances agressives peuvent s'infiltrer aisément dans le béton via ce réseau capillaire, la durabilité s'en trouve influencée de manière négative [1].



La porosité d'un matériau représente le volume de tous les capillaires cumulés. Il est important de bien faire la distinction entre porosité et perméabilité. C'est ainsi qu'un matériau peut être peu poreux et à la fois très perméable (par exemple un béton à structure semi-caverneuse) ou, au contraire, être relativement poreux mais ne pas se laisser traverser par la moindre goutte d'eau (cas d'un béton compact mais de qualité très moyenne).

La porosité s'exprime en volume. Une porosité de 5 % signifie qu'un  $\text{dm}^3$  du matériau considéré présente  $0,05 \text{ dm}^3$  soit  $50 \text{ cm}^3$  de vides interne du type capillaire. Elle se mesure généralement par l'essai d'absorption d'eau par immersion à la pression atmosphérique. En effet, pour obtenir la porosité d'un béton, il suffit de multiplier l'absorption d'eau par immersion (en %) par la masse spécifique sèche de ce béton, exprimée en  $\text{kg}/\text{dm}^3$ . Soit, par exemple, un morceau de béton de  $2,2 \text{ dm}^3$  pesant  $5,0 \text{ kg}$  à l'état sec et  $5,3 \text{ kg}$  après immersion prolongée dans l'eau. La quantité d'eau absorbée est donc de  $0,3 \text{ kg}$  ou  $0,3 \text{ dm}^3$ . Son absorption d'eau par immersion sera de  $0,3 \text{ kg}/5 \text{ kg} = 6\%$ . Sa porosité peut être déduite directement de l'essai et vaudra  $0,3 \text{ dm}^3/2,2 \text{ dm}^3$  soit  $13,6\%$ . Calculée au départ de l'absorption d'eau et de la connaissance de la masse spécifique sèche du matériau, soit  $5,0/2,2 = 2,27 \text{ kg}/\text{dm}^3$ , elle sera de  $6\% \times 2,27 = 13,6\%$ .

L'absorption d'eau par immersion est donc le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion d'une éprouvette de béton dans l'eau jusqu'à masse constante et en mesurant l'augmentation de masse. Elle est exprimée en pourcentage de la masse sèche de l'éprouvette. Etant une image de la porosité, l'absorption d'eau est utilisée comme un indicateur de la qualité du béton.



Les ouvrages d'art sont particulièrement sollicités par les agents agressifs ; les bétons doivent donc être particulièrement bien composés et bien mis en œuvre afin de limiter leur porosité. (photos CLP)

## Détermination de l'absorption d'eau par immersion d'un béton durci

L'absorption d'eau par immersion d'un béton est déterminée selon les directives de la norme NBN B 15-215:1989. Certains documents normatifs ou cahiers des charges prescrivent des méthodes d'essai qui diffèrent quelque peu des directives de la norme NBN B 15-215:1989. C'est assez souvent le cas pour les produits préfabriqués en béton (voir à ce sujet l'annexe G de la norme NBN EN 13369:2004) ou encore pour les bétons routiers. Dans ce dernier cas, l'absorption d'eau par immersion est déterminée non pas sur une éprouvette prélevée dans un cube de contrôle mais sur une éprouvette prélevée dans la route et il s'agit de la partie supérieure de la carotte qui est soumise à l'essai (tranche de 4 à 5 cm d'épaisseur) car c'est elle qui est soumise aux agents agressifs, des sels de déverglaçage en l'occurrence. Il va de soi que ces divergences avec la norme NBN B 15-215:1989 ont une influence significative sur le résultat.

### TYPES D'ÉPROUVETTES

Les essais sont effectués sur des éprouvettes prélevées par forage ou sciage dans un ouvrage, un produit ou une éprouvette moulée. Le volume des éprouvettes soumises à l'essai d'absorption d'eau par immersion est d'au moins 800 cm<sup>3</sup> et au plus de 1200 cm<sup>3</sup>. De plus, le rapport V/S entre son volume, exprimé en cm<sup>3</sup>, et sa surface enveloppe, exprimée en cm<sup>2</sup>, est compris entre 1,2 et 2.

A noter que l'essai est généralement réalisé sur des carottes de 100 cm<sup>2</sup> de section (113 mm de diamètre) et de 10 cm de hauteur, toutes les faces étant obtenues par forage ou découpage.

### TRAITEMENT DES ÉPROUVETTES AVANT LES MESURES

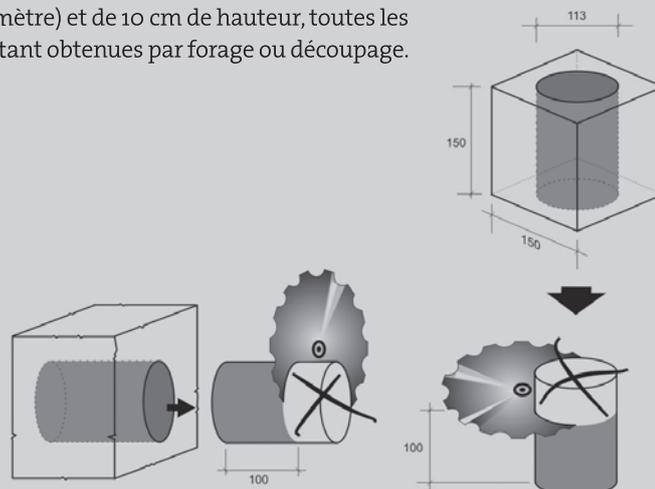
#### Eprouvettes moulées

Après démoulage, elles sont conservées en salle humide à  $20 \pm 2$  °C, à plus de 90 % d'humidité relative et ce jusqu'à l'âge de 14 jours. A ce moment s'opère le façonnage (forage, découpage) de l'éprouvette qui sera soumise à l'essai. Les éprouvettes ainsi préparées sont exposées, ensuite, durant 28 jours à l'air avec une humidité relative de  $60 \pm 2\%$  et une température de  $20 \pm 2$  °C.

#### Eprouvettes prélevées dans un ouvrage dont l'âge est d'au moins 14 jours

Les éprouvettes sont exposées durant 28 jours à l'air avec une humidité relative de  $60 \pm 2\%$  et une température de  $20 \pm 2$  °C. Cette durée peut néanmoins se limiter au temps nécessaire pour que 2 pesées successives à 24 h d'intervalle accusent une différence de masse inférieure à 0,05% de la masse de l'éprouvette obtenue lors de la dernière pesée.

*Il faut souligner que le traitement en salle sèche est absolument nécessaire afin que l'eau contenue dans des pores non interconnectés puisse quitter l'éprouvette. Dans le cas contraire, cette eau sera comptabilisée comme eau absorbée. Des essais ont montré qu'en fonction du type de béton, cette quantité d'eau, exprimée en termes d'absorption d'eau par immersion, peut varier entre 0,0 et 0,3%.*

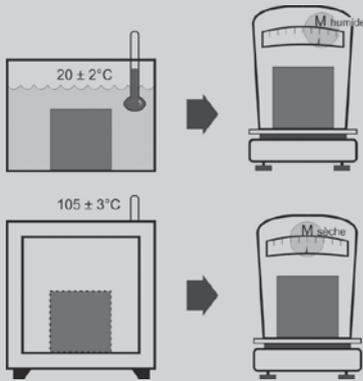


## MODE OPÉRATOIRE DE L'ESSAI

Les opérations sont effectuées dans l'ordre suivant :

- immersion dans un bac à eau à  $20 \pm 2$  °C durant un minimum de 48 h et jusqu'à masse humide constante ; avant la pesée, l'éprouvette est essuyée avec une peau de chamois humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle ;
- dessiccation durant un minimum de 72 h et jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à  $105 \pm 3$  °C.

La masse est considérée constante lorsque deux pesées successives à 24 h d'intervalle ne donnent pas une différence supérieure à 0,1 %.



## 4) EXPRESSION DU RÉSULTAT

L'absorption d'eau par immersion  $A_{bs}$  est exprimée en pour-cent de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

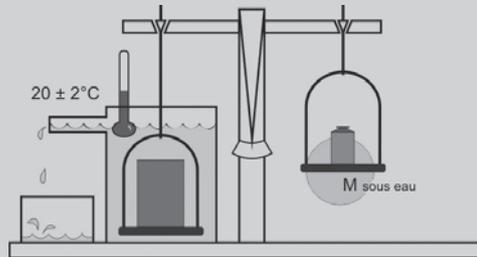
$$A_{bs} = \frac{m_{humide} - m_{sèche}}{m_{sèche}} \times 100$$

avec :

- $m_{humide}$ , la masse humide constante de l'éprouvette après immersion ;
- $m_{sèche}$ , la masse sèche constante de l'éprouvette après séchage à l'étuve.

## Mesure des masses volumiques humide et sèche

Conjointement avec la détermination de l'absorption d'eau par immersion, il peut être utile de déterminer les masses volumiques humide et sèche de l'éprouvette. Ces déterminations se font selon les directives de la norme NBN EN 12390-7:2009.



Le volume de l'éprouvette est déterminé grâce à une pesée hydrostatique. Après obtention de la masse humide constante, la masse sous eau de l'éprouvette est déterminée.

Le volume  $V$  de l'éprouvette est calculé par la relation suivante :

$$V = \frac{m_{humide} - m_{sous\ eau}}{\rho_w (= 1000)}$$

avec

- $m_{humide}$ , la masse humide de l'éprouvette après immersion et déterminée à l'air ;
- $m_{sous\ eau}$ , la masse sous eau de l'échantillon déterminée par pesée hydrostatique ;
- $\rho_w$ , la masse volumique de l'eau considérée égale à  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

Les masses volumiques humide (MVH) et sèche (MVS) sont alors calculées par les expressions ci-après :

$$MVH = \frac{m_{humide}}{V} \quad \text{et} \quad MVS = \frac{m_{sèche}}{V}$$

## 2. EXIGENCES DES NORMES NBN EN 206-1 ET NBN B 15-001

Les normes NBN EN 206-1:2001 et NBN B 15-001:2004 permettent de prescrire conjointement avec certaines classes d'environnement, une classe d'absorption d'eau par immersion du béton à l'état durci. Les classes sont désignées par les lettres WAI (de l'anglais Water Absorption by Immersion) et sont liées au type de béton. Les exigences des normes liées aux classes d'absorption d'eau par immersion sont résumées au tableau 1 ci-après. Ainsi, pour un béton prescrit, par exemple, en classe d'environnement EE4 soit pour un béton de type T(0,45), il est possible de prescrire la classe d'absorption

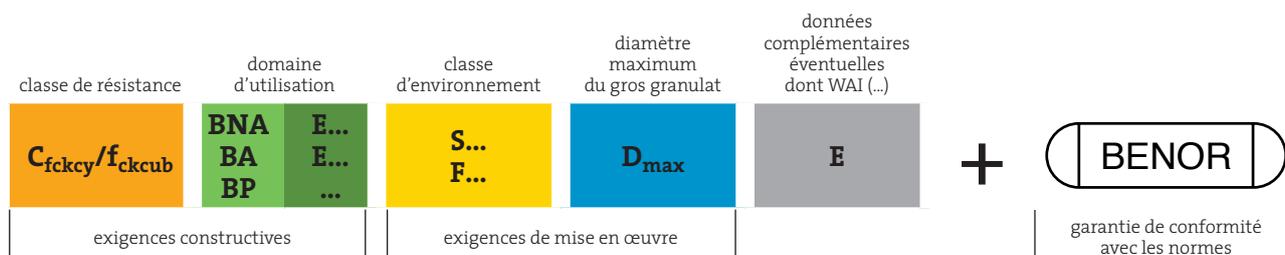
d'eau par immersion WAI (0,45). Le béton devra donc présenter, outre les performances suivantes : classe de résistance minimale C35/45, béton non armé ou armé, classe d'environnement EE4 – soit type de béton T(0,45), rapport E/C  $\leq 0,45$  et teneur en ciment  $\geq 340 \text{ kg/m}^3$  –, une absorption d'eau par immersion, mesurée sur éprouvettes de contrôle conformément aux directives de la norme NBN B 15-215, inférieure à 5,5% en moyenne (mesure de 3 éprouvettes) et 6,0% en valeur individuelle. Remarquons que la norme fixe ces exigences en fonction du rapport E/C du béton.

**TABLEAU 1** – Classes d'absorption d'eau par immersion et exigences de durabilité correspondantes selon la norme NBN B 15-001:2004

Absorption d'eau par immersion	Classes	WAI (0,50)	WAI (0,45)
	Valeur moyenne (%)	$\leq 6,0$	$\leq 5,5$
	Valeur individuelle (%)	$\leq 6,5$	$\leq 6,0$
Types de béton		T(0,50)	T(0,45)
Classes d'environnement	Béton non armé	EA2	EE4 ES4 EA3
	Béton armé	EE3 ES1 ES2 EA2	EE4 ES3 ES4 EA3
Rapport eau/ciment		$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Dosage en ciment ( $\text{kg/m}^3$ )		$\geq 320$	$\geq 340$
Classe de résistance minimale		C30/37	C35/45

Dans le présent document, il est fait abstraction des bétons à air entraîné dont le domaine d'application le plus courant sont les revêtements de sols extérieurs soumis aux sels de déverglaçage. Les normes NBN EN 206-1:2001 et NBN B 15-001:2004 permettent néanmoins de prescrire des absorptions d'eau limitées conjointement avec des bétons à air entraîné. Dans ce cas, les limites maximales d'absorption d'eau sont augmentées d'exactement 0,3% par rapport aux valeurs reprises au tableau 1

ci-avant. D'un côté, la présence des bulles d'air coupant les pores capillaires réduit la quantité d'eau absorbée ; d'un autre côté, un béton à air entraîné présente une masse plus faible qu'un béton sans air entraîné. Ce second phénomène est prépondérant de sorte que l'absorption d'eau exprimée en % par rapport à la masse sèche du béton est généralement plus élevée. Le lecteur retiendra toutefois, que les principes étagés ci-après sont également valables pour des bétons à air entraîné.



Prescrire un béton sur base des performances souhaitées signifie :

(1) se référer aux normes NBN EN 206-1:2001 et NBN B 15-001:2004 ;

(2) indiquer la classe de résistance, le domaine d'utilisation, la classe d'environnement, la classe de consistance, le diamètre maximum des granulats ;

et (3) indiquer éventuellement des données complémentaires dont la classe d'absorption d'eau tel que développé en annexe O de la norme NBN B 15-001:2004. Seule cette méthode permet de prescrire un béton porteur de la marque BENOR. Celle-ci garantit la conformité du béton aux performances spécifiées y compris à la classe d'absorption d'eau éventuellement prescrite.

### 3. RELATION LIANT L'ABSORPTION D'EAU PAR IMMERSION ET LA TENEUR EN EAU DU BÉTON

La figure 1 donne l'absorption d'eau par immersion de différents bétons confectionnés en laboratoire en fonction de leur rapport E/C et ce, quels que soient le type et la teneur en ciment, le squelette granulométrique, etc. A noter toutefois que le diamètre nominal du plus gros granulat est toujours supérieur à 16 mm. Après observation de ce graphique, il paraît assez évident qu'il n'existe aucune relation directe entre l'absorption d'eau par immersion d'un béton durci et son rapport E/C.

La figure 2 ci-contre donne la relation qui lie l'absorption d'eau par immersion d'un béton durci à la teneur en eau totale mesurée sur béton frais. Ce graphique reprend des données obtenues sur différents bétons de chantiers. Il s'agit de bétons confectionnés avec différents types de ciment ainsi que différentes teneurs en ciment, différents squelettes granulaires (type et teneur en sable, type et teneur en gravillons, néanmoins tous naturels et présentant un coefficient d'absorption d'eau inférieur à 1 %). Pour chacun de ces bétons, des contrôles à l'état frais et à l'état durci ont été réalisés par le laboratoire du Centre national de Recherche scientifique et technique pour l'Industrie Cimentière (CRIC-OCCN).

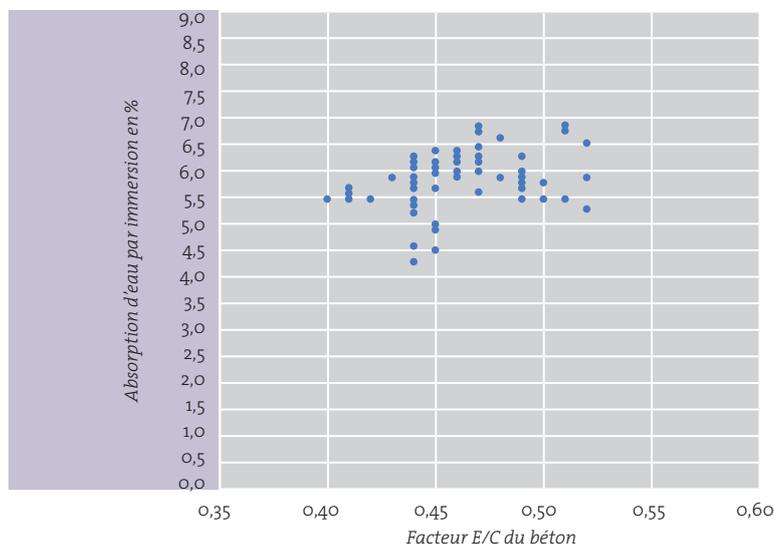
A l'état frais et sur chantier, les essais suivants sont généralement réalisés :

- affaissement au cône d'Abrams (slump) selon NBN EN 12350-2:2009 ;
- masse volumique humide selon NBN EN 12350-6:2009 ;
- teneur en air selon NBN EN 12350-7:2009 ;
- teneur en eau du béton selon la méthode donnée à la page 15 ;
- fabrication d'éprouvettes pour le contrôle du béton à l'état durci selon NBN EN 12390-2:2009.

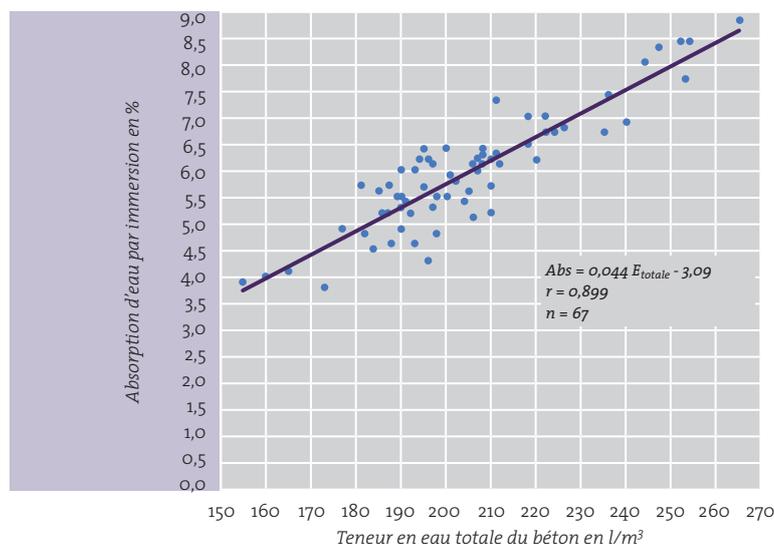
A l'état durci, les essais suivants sont réalisés :

- résistance à la compression selon NBN EN 12390-3:2009 sur cubes de 15 cm de côté ;
- absorption d'eau par immersion selon NBN B 15-215:1989 sur carottes de 1 dm<sup>3</sup> forées dans des dalles.

Les dalles sont ramenées au laboratoire du CRIC à l'âge de 1 jour où elles sont démoulées et conservées en salle humide à (20 ± 2) °C et à plus de 90% d'humidité relative. A l'âge de 14 jours, trois carottes sont prélevées conformément aux



**FIGURE 1** – Absorption d'eau par immersion d'un béton durci en fonction de son rapport E/C (essais sur bétons de laboratoire). Chaque point est une moyenne de 3 résultats.



**FIGURE 2** – Relation entre l'absorption d'eau par immersion d'un béton durci et la teneur en eau totale de ce béton à l'état frais. Chaque point est une moyenne de 3 résultats.

directives de la norme NBN B 15-215. Elles sont ensuite placées durant 28 jours en salle sèche à (20 ± 2) °C et 60 à 65% d'humidité relative. Les essais d'absorption d'eau proprement dit débutent alors par une mise sous eau à 20 °C jusqu'à masse humide constante suivie d'une mise à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse sèche constante.

En même temps que les absorptions d'eau, les masses volumiques humides et sèches, selon la norme NBN EN 12390-7:2009, des éprouvettes sont notées.

Graphiquement, la relation ci-après a été établie avec un coefficient de corrélation relativement correct et permet donc d'estimer l'absorption d'eau par immersion d'un béton durci au départ de la teneur en eau totale de ce béton à l'état frais :

$$Abs = 0,044 \times E_{totale} - 3,09 \quad (1)$$

avec :

- Abs, l'absorption d'eau par immersion du béton durci exprimée en % ;
- $E_{totale}$ , la teneur en eau totale du béton à l'état frais exprimée en  $l/m^3$ .

A remarquer qu'une relation du même type a été établie pour des bétons confectionnés en laboratoire. Celle-ci est néanmoins probablement incorrecte. Une explication peut être trouvée dans le fait que les bétons fabriqués en laboratoire le sont au départ de granulats secs. Ceux-ci vont donc absorber une quantité d'eau dès l'introduction de l'eau au mélange mais cette quantité est certainement inférieure à la capacité d'absorption d'eau des granulats. En effet, les grains sont enrobés assez rapidement de pâte de ciment, ce qui empêche l'absorption d'eau nécessaire à les saturer. Ceci est particulièrement le cas avec des granulats concassés, où l'eau a davantage de surface à imprégner. Il en résulte que les pores des granulats ne sont pas capables de se saturer en eau et le rapport E/C réel du béton est plus élevé que dans le cas d'une absorption maximale de l'eau par les granulats. Ainsi, toute chose restant égale, un béton confectionné au départ de granulats secs aura une résistance mécanique plus faible et une absorption d'eau plus élevée qu'un béton confectionné au départ de granulats humides et ce pour une même teneur en eau totale.

De par la relation (1), nous pouvons déduire que pour toute augmentation de la teneur en eau totale de  $1 l/m^3$ , l'absorption d'eau par immersion du béton augmente de 0,044%. Or, l'absorption d'eau par immersion déterminée selon les directives de la norme NBN B 15-215 est calculée par la relation suivante (voir p. 4-5) :

$$Abs = \frac{m_{humide} - m_{sèche}}{m_{sèche}} \times 100 \quad (2)$$

avec :

- $m_{humide}$ , la masse humide de l'éprouvette après immersion ;
- $m_{sèche}$ , la masse sèche de l'éprouvette après séchage à l'étuve.

Cette relation peut aussi s'écrire :

$$Abs = \frac{MVH - MVS}{MVS} \times 100 \quad (3)$$

avec :

- MVH, la masse volumique humide de l'éprouvette après immersion ;
- MVS, la masse volumique sèche de l'éprouvette après séchage à l'étuve.

Si le numérateur de (3) est pris égal à 1 et si le dénominateur est considéré comme égal à 2250 ( $MVS$  moyenne du béton durci de  $2250 kg/m^3$ , ce qui correspond à une masse volumique sèche classique pour un béton normal), nous obtenons une valeur Abs = 0,044%. Cette valeur est exactement celle du coefficient angulaire de la droite donnée en figure 2 (relation 1).

A l'aide de cette même relation (1), il peut également être déduit que la teneur en eau totale pour laquelle l'absorption d'eau serait nulle est de  $70 l/m^3$ . En fait, ces  $70 l/m^3$  correspondent à de l'eau liée chimiquement (résultat moyen pour les 67 bétons considérés). Le reste de l'eau totale est comptabilisé dans la valeur de l'absorption d'eau, il s'agit de l'eau liée physiquement ainsi que de l'eau libre et de l'eau absorbée par les granulats. En terme d'essai d'absorption d'eau par immersion, cette eau est notée  $MVH - MVS$ , il s'agit du numérateur de la relation (3). Ainsi, nous avons :

$$Eau_{totale} = MVH - MVS + 70 \quad (4)$$

Ou encore en combinant (3) et (4):

$$Abs = \frac{Eau_{totale} - 70}{MVS} \times 100 \quad (5)$$

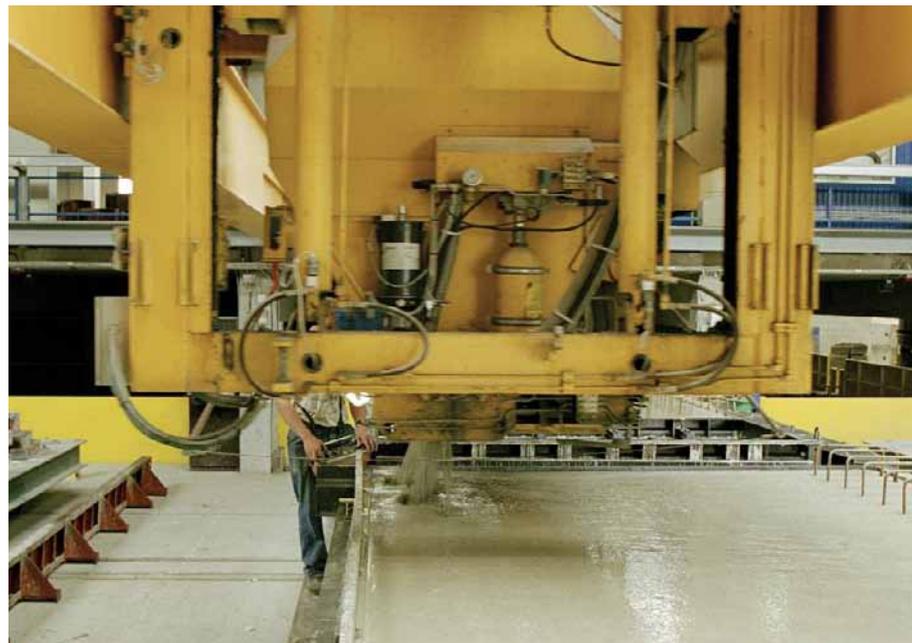
Le tableau 2 ci-après donne l'ensemble des résultats pris en compte dans cette analyse. Il peut être constaté qu'expérimentalement, la teneur en eau pour laquelle l'absorption d'eau serait nulle est de 73 l/m<sup>3</sup> en moyenne, valeur très proche de celle établie par la relation (1).

La figure 3 donne la relation entre l'absorption d'eau par immersion d'un béton et sa masse volumique sèche et ce, pour l'ensemble des résultats considérés dans la présente publication. Cette figure permet, sur base de résultats d'essais donnant pour un béton quelconque l'absorption d'eau par immersion et la masse volumique sèche, de vérifier que l'on se trouve bien avec un béton répondant à la même loi et donc d'estimer sa teneur en eau totale par les relations (1) ou (5).

Ainsi, l'absorption d'eau par immersion d'un béton ne dépend que de la teneur en eau totale du béton à l'état frais. En fait, elle dépend directement de la teneur en eau totale du béton et indirectement de tous les facteurs ayant une influence sur la teneur en eau du béton. Citons par exemple l'incidence de la qualité du sable. Un sable trop fin utilisé seul pour la confection d'un béton se passe de commentaires. Ce genre de sable requiert beaucoup d'eau de mouillage, ce qui accroît considérablement la porosité des bétons. Les sables de concassage présentent l'avantage d'avoir une granulométrie plus étalée de 0 à 4 mm mais par le caractère anguleux de leurs grains, ils se révèlent peu ouvrables. Il faut donc liquéfier la pâte de ciment pour obtenir la consistance souhaitée. Il s'ensuit que l'incidence d'un sable anguleux est exactement identique à celle d'un sable fin avec un risque complémentaire. En effet, la liquéfaction de la pâte de ciment est une opération défavorable à la stabilité du mélange frais ; elle conduit à une ségrégation et un ressuage importants, ce dernier phénomène réduisant plus particulièrement la qualité de l'épiderme du béton ; or c'est la qualité de cet épiderme que l'on vise pour assurer la durabilité du béton. Par contre, les sables 0/2 ou 0/4 de rivière et de mer dragués à l'estuaire des grands fleuves

et sous réserve d'une teneur strictement limitée en coquillages et chlorures et dans une moindre mesure les mélanges de sable de concassage lavé et de sable fin possèdent les bonnes caractéristiques pour la confection d'un béton à savoir (figure 4) :

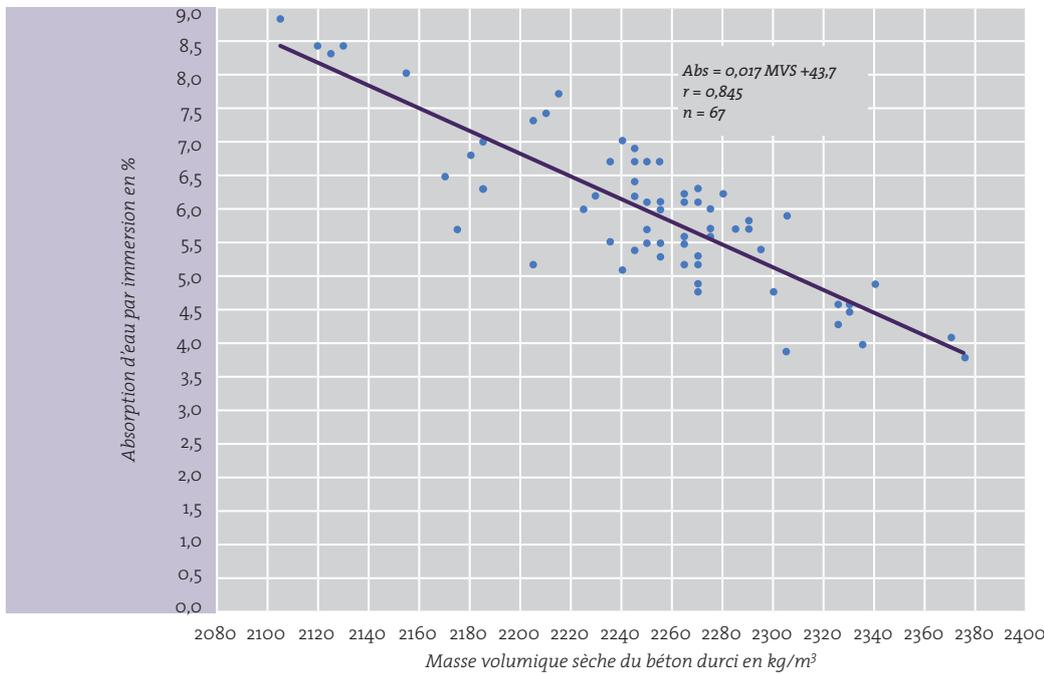
- une bonne granularité, ces sables sont essentiellement constitués de grains gros et surtout de moyens ; ils sont idéalement arrondis et demandent donc un minimum d'eau de mouillage ;
- une teneur en fines (< 0,063 mm) très faible ; ces grains sont des buveurs d'eau ;
- une proportion de grains de dimensions supérieures à 2 mm qui n'excède pas 15 voire 10 %.



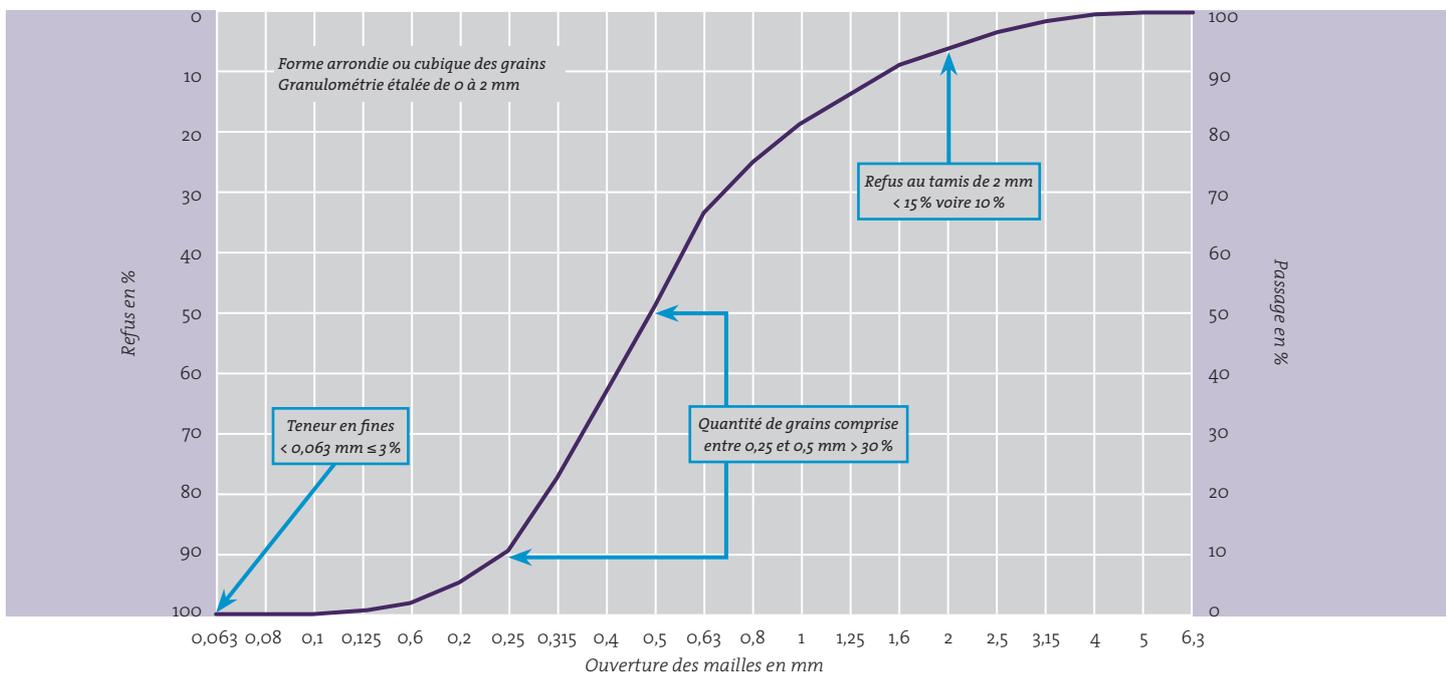
La relation qui lie l'absorption d'eau par immersion d'un béton durci à sa teneur en eau totale à l'état frais est également valable pour des bétons auto-plaçants dont certains résultats sont, par ailleurs, repris dans le graphique de la figure 1. Or, ceux-ci ont un volume de pâte plus important que les bétons ordinaires et une rhéologie spécifique différente des bétons fluides classiques. En raison du volume de pâte plus important, la porosité des bétons auto-plaçants pourrait être plus élevée mais les mesures réalisées infirment cette présomption. Des études sur l'influence du mode de cure et sur la durabilité des bétons auto-plaçants ont, de plus, montré que la durabilité d'un béton auto-plaçant vis-à-vis des agressions externes et internes est régie par des mécanismes similaires à ceux connus pour les bétons ordinaires.

Teneur en eau totale en l/m <sup>3</sup>	Résistance à la compression sur cubes à 28 jours en N/mm <sup>2</sup>	Abs en %	MVH en kg/m <sup>3</sup> (± 5 kg)	MVS en kg/m <sup>3</sup> (± 5 kg)	Eau absorbée en l/m <sup>3</sup> (= MVH - MVS)	Eau liée en l/m <sup>3</sup> (= eau totale - eau absorbée)
155	62,5	3,9	2395	2305	90	65
160	67,4	4,0	2430	2335	95	65
165	88,7	4,1	2465	2370	95	70
173	63,0	3,8	2465	2375	90	83
177	47,8	4,9	2380	2270	110	67
181	51,5	5,7	2415	2285	130	51
182	48,7	4,8	2375	2270	105	77
184	59,5	4,5	2435	2330	105	79
185	46,4	5,6	2390	2265	125	60
186	57,4	5,2	2385	2265	120	66
187	56,5	5,7	2300	2175	125	62
187	50,0	5,2	2385	2270	115	72
188	53,9	4,6	2430	2325	105	83
189	48,6	5,5	2390	2265	125	64
190	76,1	4,9	2455	2340	115	75
190	72,8	5,5	2370	2250	120	70
190	55,6	5,3	2390	2270	120	70
190	41,8	6,0	2355	2225	130	60
191	73,1	5,4	2365	2245	120	71
192	57,9	5,2	2390	2270	120	72
193	53,3	4,6	2435	2330	105	88
193	51,9	6,0	2395	2255	140	53
194	54,2	6,2	2385	2245	140	54
195	56,6	5,7	2375	2250	125	70
195	52,0	6,4	2390	2245	145	50
196	76,2	4,3	2420	2325	95	101
196	56,8	6,2	2380	2245	135	61
197	57,5	5,3	2375	2255	120	77
197	51,2	6,1	2410	2270	140	57
198	81,1	4,8	2395	2300	95	103
198	54,1	5,5	2380	2255	125	73
200	46,4	5,5	2360	2235	125	75
200	54,2	6,4	2395	2255	140	60
201	45,0	5,9	2440	2305	135	66
202	51,8	5,8	2420	2290	130	72
204	47,8	5,4	2420	2295	125	79
205	74,8	5,6	2390	2275	115	90
206	51,0	5,1	2385	2240	145	61
206	46,0	6,1	2395	2255	140	66
207	44,5	6,2	2405	2265	140	67
207	59,8	6,0	2415	2275	140	67
208	52,2	6,3	2410	2270	140	68
208	48,3	6,1	2405	2265	140	68
208	42,5	6,4	2385	2245	140	68
210	70,9	5,2	2325	2205	120	90
210	68,6	6,2	2365	2230	135	75
210	40,2	5,7	2420	2290	130	80
210	45,1	5,7	2405	2275	130	80
211	43,9	7,3	2360	2205	155	56
211	75,4	6,3	2325	2185	140	71
212	45,4	6,1	2385	2250	135	77
218	35,3	7,0	2335	2185	150	68
218	74,7	6,5	2310	2170	140	78
220	48,2	6,2	2420	2280	140	80
222	49,7	6,7	2385	2235	150	72
222	43,0	7,0	2395	2240	155	67
224	38,0	6,7	2390	2245	145	79
226	34,0	6,8	2330	2180	150	76
235	31,3	6,7	2375	2250	125	110
236	42,5	7,4	2370	2210	160	76
240	43,0	6,9	2400	2245	155	85
244	42,4	8,0	2325	2155	170	74
247	41,9	8,3	2300	2125	175	72
252	35,8	8,4	2310	2130	180	72
253	35,9	7,7	2350	2215	135	118
254	41,6	8,4	2300	2120	180	74
265	39,6	8,8	2285	2105	180	85
<b>Moyenne</b>						
205	53,1	6,0	2385	2250		73,0

TABLEAU 2 – Synthèse des résultats obtenus sur 67 bétons de chantier



**FIGURE 3** – Relation entre l'absorption d'eau par immersion d'un béton durci et sa masse volumique sèche. Chaque point est une moyenne de 3 résultats.

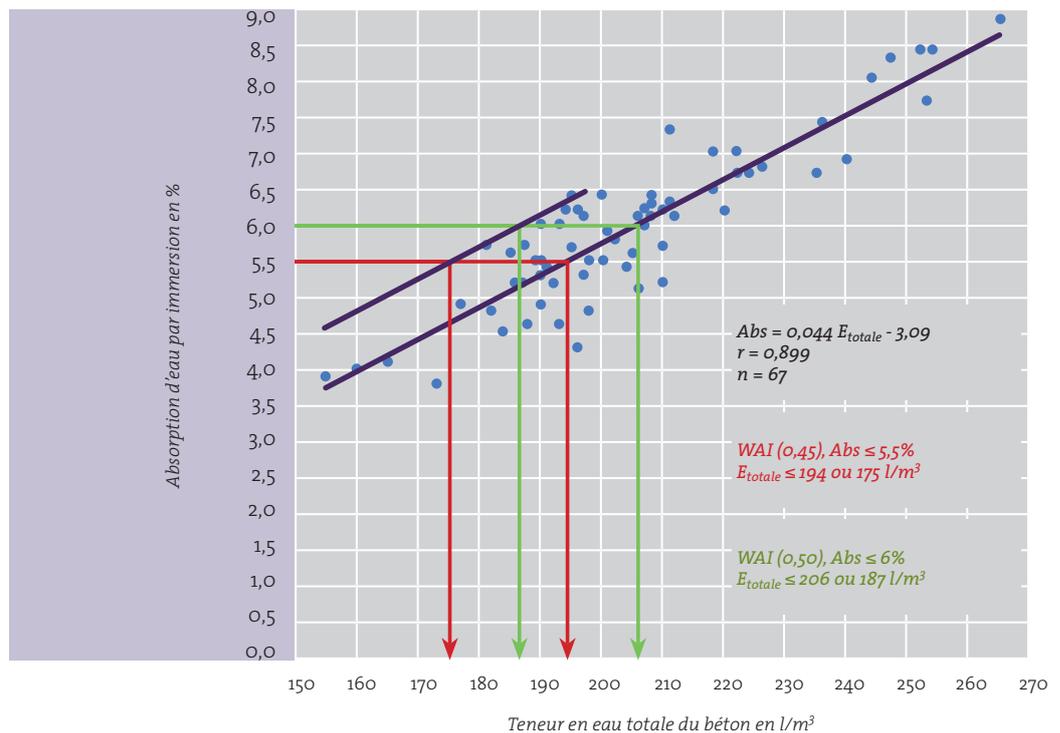


**FIGURE 4** – Qualités d'un bon sable pour la confection d'un béton.

## 4. COMPOSITION « MINIMALE » DU BÉTON AFIN DE RESPECTER LES EXIGENCES D'ABSORPTION D'EAU PAR IMMERSION AINSI QUE LE RAPPORT E/C LIÉ AUX CLASSES D'ENVIRONNEMENT

Au départ du graphique donnant la relation existant entre l'absorption d'eau par immersion d'un béton durci et la teneur en eau totale de ce béton à l'état frais (figure 2), il est possible de fixer les principaux paramètres de la composition du béton afin de respecter l'ensemble des exigences de la norme NBN B 15-001:2004 reprises ci-avant au tableau 1.

En effet, la figure 5 ci-après donne la teneur en eau totale du béton frais à ne pas dépasser pour respecter les absorptions d'eau par immersion prescrites.



**FIGURE 5** – Teneur en eau totale à ne pas dépasser afin de garantir une faible absorption d'eau par immersion

En ne considérant la teneur en eau totale déterminée que par la droite de régression (206 et 194 l/m<sup>3</sup> respectivement pour WAI(0,50) et WAI(0,45)), il subsiste un risque d'obtenir une valeur d'absorption d'eau supérieure à celle estimée. Ainsi est également tracée une parallèle à la droite de régression et passant par la valeur maximale d'absorption d'eau par immersion observée dans la zone sous les 6,0% d'absorption d'eau. Cette droite permet de déterminer 2 teneurs en eau totale du béton à l'état frais sous lesquelles une absorption d'eau supérieure à celle exigée n'a jamais été observée :

- pour WAI(0,45), la teneur en eau totale doit rester inférieure à 175 l/m<sup>3</sup> ;
- pour WAI(0,50), la teneur en eau totale doit rester inférieure à 187 l/m<sup>3</sup>.

Or, par teneur totale en eau dans le béton ( $E_{totale}$ ), il est entendu :

$$E_{totale} = E_{granulats} + E_{ajoutée} + E_{adjuvants} \quad (6)$$

La norme stipule à cet égard que seule l'eau effective ( $E_{eff}$ ) est efficace. En d'autres termes, l'eau absorbée dans les granulats ne doit pas être prise en compte pour le calcul du facteur E/C car elle n'influence pas la qualité de la matrice de ciment. Pour la simplicité, il est admis que les granulats qui sont couramment utilisés en Belgique (granulats naturels non ou faiblement poreux tels que le calcaire, le porphyre, ...) absorbent environ 10 litres d'eau par m<sup>3</sup> de béton et donc :

$$E_{eff} = E_{totale} - 10 \quad (7)$$



Comme les autres matériaux, le béton est soumis à l'agression des salissures ; il se salit plus ou moins vite, et rarement de manière uniforme. Ce phénomène complexe est accentué par l'origine des salissures dues à la fois aux minéraux et aux micro-organismes, au climat, aux vents et à l'orientation. Un béton de qualité à faible porosité peut limiter l'encrassement du parement en s'opposant à la pénétration des agents agressifs.

© arch. L.Binst / Crepain Binst Architecture nv

Ainsi :

- pour  $T(0,45)$  et  $WAI(0,45)$ , l'eau efficace doit rester inférieure à  $165 \text{ l/m}^3$ . Or le rapport E/C doit être plus faible que 0,45, d'où une teneur minimale en ciment de  $367 \text{ kg/m}^3$  et ce quels que soient le type de ciment et le squelette granulaire du béton ;
- pour  $T(0,50)$  et  $WAI(0,50)$ , l'eau efficace doit rester inférieure à  $177 \text{ l/m}^3$ . Or le rapport E/C doit être plus faible que 0,50, d'où une teneur minimale en ciment de  $354 \text{ kg/m}^3$  et ce quels que soient le type de ciment et le squelette granulaire du béton.

Il est important de connaître et d'appliquer ces teneurs en ciment et en eau. Dans le cas contraire, une teneur en eau, d'une part, voisine des valeurs ci-dessus (proche de 170 à  $180 \text{ l/m}^3$ ) et une teneur en ciment minimale

correspondant au minimum prescrit par la norme (voir tableau 1) conduira à un béton avec une plus faible teneur en pâte mais une pâte de moindre qualité (E/C non respecté). D'autre part, une teneur en eau limitée afin de respecter scrupuleusement le facteur E/C prescrit conduira à un béton ayant une pâte de bonne qualité mais en trop faible quantité pour donner de la cohésion interne au béton frais. Il ne faut pas perdre de vue qu'un léger excès de pâte (et donc d'eau de gâchage) permet de donner une meilleure ouvrabilité, un meilleur enrobage des armatures et des granulats, au bénéfice donc d'une meilleure résistance à la corrosion. Une meilleure cohésion entre les différents grains constituant le squelette du béton permettra d'accroître la résistance à la ségrégation.

## 5. CONCLUSIONS

Pour protéger un béton contre la dessiccation, différentes solutions sont possibles : un délai de décoffrage suffisamment long, pulvériser un produit de cure, poser une feuille de plastique, couvrir le béton d'une toile ou d'une couverture humide ou encore mettre le béton sous eau. (photos PVA)



Le lecteur retiendra que la durabilité d'un béton dépend d'une faible porosité, d'une bonne mise en place (meilleur enrobage, absence de ségrégation, ...) et d'une teneur en ciment suffisante, agent responsable et réservoir de l'alcalinité du béton, barrière naturelle à la carbonatation. Ainsi, les règles fondamentales ci-après doivent être respectées :

- pour un béton de classe de résistance C35/45 ou plus et de classe d'absorption d'eau WAI(0,45), une teneur en ciment  $\geq 370 \text{ kg/m}^3$  et une teneur en eau totale  $\leq 175 \text{ l/m}^3$  ( $E/C \leq 0,45$ ) ;
- pour un béton de classe de résistance C30/37 et de classe d'absorption d'eau WAI(0,50), une teneur en ciment  $\geq 350 \text{ kg/m}^3$  et une teneur en eau totale  $\leq 185 \text{ l/m}^3$  ( $E/C \leq 0,50$ ) ;
- un squelette granulométrique continu avec l'utilisation d'un bon sable pour béton (sable à grains ronds avec une granulométrie étalée de 0 à 2 mm) ;
- une ouvrabilité conforme aux moyens de mise en œuvre ; en fonction de la demande en eau des constituants du béton, la fluidité de celui-ci sera adaptée par l'ajout d'un adjuvant (super)plastifiant ;
- une protection efficace et suffisamment longue contre la dessiccation du béton mis en place.

Tous les participants à l'acte de bâtir ont intérêt à soigner davantage le matériau qu'ils utilisent et à se souvenir qu'un béton n'est durable que moyennant une composition correcte dont le dosage en ciment et la teneur en eau font partie.

Enfin, la protection efficace du béton frais contre la dessiccation immédiatement après sa mise en place reste une opération essentielle. Les surfaces de bétonnage non coffrées sont les plus critiques du fait de leur exposition au soleil et au vent. Le contrôle de leur protection efficace contre toute évaporation intempestive de l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment revêt donc une grande importance pour le comportement ultérieur en service. En effet, un manque de protection des surfaces bétonnées conduit à un déficit dans l'hydratation du ciment en surface. La peau du béton sera donc plus poreuse, ces vides internes petits et grands sont des voies de communication pour tous les agents agressifs.

## Détermination de la teneur en eau d'un béton frais

### PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Une quantité de béton frais est soumise le plus rapidement possible au séchage sur une source de chaleur intense afin d'éviter la perte d'eau liée à sa réaction avec le ciment.

La méthode décrite ci-après permet de déterminer la teneur en eau totale du béton frais ; pour connaître la teneur en eau effective, il y a lieu de tenir compte de la teneur en eau absorbée par les granulats.

### APPAREILLAGE

- Un récipient, d'une contenance d'environ 10 l, pouvant être fermé hermétiquement.
- Une balance permettant de peser l'échantillon de béton frais à 10 g près.
- Un plateau métallique d'au moins 2000 cm<sup>2</sup> de surface plane ayant les bords suffisamment relevés pour retenir son contenu.
- Une source de chaleur puissante permettant d'atteindre 300 °C (réchaud au gaz, plaque chauffante).
- Un ustensile permettant de remuer le béton (petit râteau, truelle, etc., ...).

### ECHANTILLONNAGE

L'échantillonnage est effectué conformément à la norme NBN EN 12350-1:2009.

La quantité de béton frais soumise à l'essai est comprise entre 4 et 5 l soit, une masse de béton humide de l'ordre de 10 à 12 kg (pour des bétons de masse volumique normale comprise entre 2350 et 2450 kg/m<sup>3</sup>).

L'essai doit être commencé le plus rapidement possible après échantillonnage. L'échantillon est conservé jusqu'au moment de l'essai dans un récipient hermétiquement clos.

### MODE OPÉRATOIRE DE L'ESSAI

- Peser le plateau métallique ainsi que l'ustensile permettant de remuer le béton à 10 g près, soit  $m_0$  la masse du plateau et de l'ustensile, exprimée en grammes.
- Etaler l'échantillon de béton frais dans le plateau métallique et peser l'ensemble à 10 g près, soit  $m_1$  la masse du plateau, de l'ustensile et de l'échantillon, exprimée en grammes.
- Sécher l'échantillon par chauffage au-dessus d'une source de chaleur.



Contrôle du béton frais sur chantier avec à l'arrière-plan, le séchage du béton pour en déterminer la teneur en eau.

- Effectuer le séchage en remuant régulièrement le béton frais.
- Eviter toute perte de matériaux.
- Le séchage est poursuivi jusqu'à ce que la perte de poids de l'échantillon, lors de deux pesées successives effectuées à un intervalle d'au moins 15 minutes, soit inférieure à 0,1%.
- Peser de nouveau l'échantillon après séchage, à 10 g près. Soit  $m_2$  la masse du plateau, de l'ustensile et de l'échantillon séché, exprimée en grammes.

*Note : le séchage dans une étuve à 105 °C n'est pas retenu parce qu'il est trop lent et ne permet pas d'éliminer l'eau liée par le ciment.*

### EXPRESSION DU RÉSULTAT

La teneur totale en eau du béton frais  $w$ , exprimée en pourcentage de la masse sèche, est donnée par la formule :

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100$$

Le résultat est exprimé avec une décimale. Au départ de la valeur de la masse volumique humide  $MVH$  du béton frais exprimée en kg/m<sup>3</sup> et déterminée conformément aux directives de la norme NBN EN 12350-6:2009, la teneur totale en eau du béton frais  $E_{totale}$  exprimée en l/m<sup>3</sup> peut être trouvée par les formules suivantes :

$$MVS = \frac{MVH}{1 + W/100} \text{ et } E_{totale} = MVH - MVS$$

avec :  $MVS$ , la masse volumique sèche du béton exprimée en kg/m<sup>3</sup>.  $E_{totale}$  est exprimé à l'unité.



T-2

**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](http://www.febelcem.be)**  
**[info@febelcem.be](mailto:info@febelcem.be)**

**Auteur :**  
**Ir C. Ployaert**

**Photos couverture :**  
**A. Nullens**

**Dépôt légal :**  
**D/2009/0280/11**

**Ed. resp.: A. Jasienski**

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] Technologie du béton  
Bruxelles : GBB - Groupement belge du béton, 2006
- [2] NBN B 15-001:2004 : Supplément à la NBN EN 206-1:2001 -  
Béton - Spécification, performances, production et conformité  
Bruxelles : IBN, 2004
- [3] NBN EN 206-1:2001 : Béton - Partie 1 :  
Spécification, performances, production et conformité  
Bruxelles : IBN, 2001
- [4] NBN B 15-215:1989 : Essais des bétons - Absorption d'eau par immersion  
Bruxelles : IBN, 1989
- [5] NBN EN 13369:2004 : Règles communes pour les produits préfabriqués en béton  
Bruxelles : IBN, 2004
- [6] La maîtrise de l'eau dans le béton hydraulique - Guide technique  
Paris : LCPC, 2001
- [7] NEVILLE A.  
Propriétés des bétons  
Eyrolles, Paris, 2000

[infobeton.be](http://infobeton.be)