

GUIDE PRATIQUE

Concevoir et mettre en oeuvre des bétons durables
Une publication de Holcim (Belgique) S.A.



Table des matières

1. Les constituants du béton

1.1	Le ciment	6
1.2	L'eau de gâchage	18
1.3	Les granulats	20
1.4	Les adjuvants	26
1.5	Les additions et les ajouts	30

2. Du béton frais au béton durci

2.1	Classification des bétons	36
2.2	Ouvrabilité et consistance	43
2.3	Composition et formulation du béton	46
2.4	Fabrication et transport	51
2.5	Coffrage	53
2.6	Pompage du béton	55
2.7	Mise en place et compactage	57
2.8	Cure	59
2.9	Bétonnage par temps chaud	62
2.10	Bétonnage par temps froid	65

3. Les bétons spéciaux

3.1	Béton de dallage	70
3.2	Béton autoplaçant	75
3.3	Béton fibré	80
3.4	Béton apparent	84
3.5	Béton de route	90
3.6	Bétons à hautes performances	94
3.7	Béton pour fondations profondes	99

Table des matières

4. Causes et prévention des altérations du béton

4.1	Ségrégation	104
4.2	Retrait et fissuration	105
4.3	Corrosion des armatures	112
4.4	Efflorescences	116
4.5	Action du gel et des sels de déverglaçage	118
4.6	Attaque sulfatique externe	121
4.7	Réaction sulfatique interne	122
4.8	Action des produits chimiques	123
4.9	Réaction alcali-silice	125
4.10	Résistance au feu	128
4.11	Approches de la durabilité du béton	129

5. Sécurité et construction durable

5.1	Le béton et la construction durable	132
5.2	Sécurité	136

6. Glossaire

7. Bibliographie, normes et liens utiles

**Copyright by
Holcim (Belgique) S.A.**

Auteurs

Holcim Belgique, Technical Support Center :
Geert De Mets
Thibaut Mercenier (coordination)
Steven Schaerlaekens

Remerciements pour leur contribution à :

Peter Allaert
Séverine Baudoin
Eric Fosseur
Jean-Marc Vanbelle

2^{ème} édition 2018

**"Holcim ne peut être tenu
responsable d'une mauvaise
application ou interprétation
du contenu du présent guide.**

**En cas de question ne pas
hésiter à nous consulter"**

A tous les stades de la production et de la mise en œuvre du béton interviennent des bonnes pratiques. Ce Guide Pratique tente de les consigner pour les rendre accessibles à tous. Cette brochure contient également des informations et directives générales que l'on trouve dans les manuels et les ouvrages de référence habituels.

Ce Guide Pratique s'adresse à tous ceux qui interviennent sur la conception, la fabrication et la mise en œuvre du béton, qu'il soit prêt à l'emploi ou préfabriqué. Les maîtres d'ouvrages et les prescripteurs trouveront également de l'intérêt à lire ces informations et recommandations.

D'une manière générale, on considère le béton comme un matériau inaltérable d'une durabilité exceptionnelle. Si l'on observe aujourd'hui çà et là quelques dégâts, la cause en est le plus souvent due à une conception erronée au stade du projet ou à la mise en œuvre de procédés mal adaptés.

Le Guide Pratique veut contribuer à éliminer ces "mafaçons". En suivant ses conseils, on s'apercevra que, par des méthodes simples et en respectant les règles traditionnelles, on obtient un béton de qualité et durable.

Les données spécifiques d'un projet peuvent cependant nécessiter des méthodes constructives particulièrement complexes. La réussite exige alors une qualification supérieure des exécutants et des contrôles plus poussés de la mise en œuvre et de la qualité. Dans de tels cas, l'équipe de support technique de Holcim (Belgique) est à la disposition des utilisateurs pour les assister.

La seconde édition de ce guide a été complétée par de nouveaux chapitres consacrés aux bétons spéciaux. Une attention a également été portée à la sécurité et à la construction durable. En fin de guide, un glossaire apporte un éclairage sur de nombreux termes liés au monde du béton. Nous accueillerons avec plaisir vos suggestions ou propositions d'améliorations.



Les constituants du béton

1.1

Le ciment

1.2

L'eau de gâchage

1.3

Les granulats

1.4

Les adjuvants

1.5

Les additions et les ajouts



1.1 Le ciment

Généralités

Le ciment est un liant hydraulique. C'est à dire une substance qui, mélangée à l'eau, est capable ensuite de durcir aussi bien à l'air que sous l'eau. La pâte de ciment durcie est pourvue d'une résistance mécanique élevée et elle ne se dissout plus dans l'eau.

Les ciments fabriqués en Belgique répondent aux exigences de la norme européenne NBN EN 197-1 (Ciment: composition, spécifications et critères de conformité). L'évaluation de la conformité des ciments à la norme précitée est réglée par la norme NBN EN 197-2, selon des essais repris dans la série des normes NBN EN 196.

Historique

Jusqu'à l'époque moderne, le ciment est un liant, souvent une chaux, que l'on mélange à d'autres matières argileuses cuites, comme les tuiles ou briques concassées. Le liant ainsi obtenu a des propriétés hydrauliques. On y ajoute également de la pouzzolane naturelle (terre volcanique de Pouzzoles, région de Naples, Italie).

La recherche sur l'hydraulicité des chaux commence à la fin du 18e siècle pour aboutir vers 1840 avec la fabrication des ciments modernes.

En 1796, James Parker découvre sur l'île de Sheppey en Grande Bretagne, le ciment prompt (une chaux éminemment hydraulique ou ciment naturel à prise rapide, cuit à 900°C comme les chaux naturelles ordinaires) qu'il baptise commercialement ciment romain.

Louis Vicat élabore en 1817 la théorie de l'hydraulicité des chaux. Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson et broyage, sera un véritable liant hydraulique fabriqué artificiellement. Il publie ses travaux sans prendre de brevet.

En 1824, le Britannique Joseph Aspdin dépose un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il appelle commercialement le ciment Portland, car la couleur de son produit ressemble aux célèbres pierres des carrières de la péninsule de "Portland" située dans la Manche.

En 1840, Louis Vicat découvre les principes d'hydraulicité des ciments: une cuisson à la température de fusion - soit 1450°C - qui permet d'obtenir le clinker et la régulation de prise par ajout de sulfate de calcium. Une réelle fabrication des ciments modernes peut démarrer.



Fig 1.1.1
Vue générale
d'une cimenterie

1.1 Le ciment

Les constituants du ciment

Le ciment, tel que défini dans la norme européenne NBN EN 197-1, est constitué de différents matériaux. Les constituants principaux utilisés dans nos régions sont le clinker Portland, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et le calcaire.

Clinker (K)

La fabrication du clinker Portland consiste à préparer un mélange des matières premières de granulométrie et chimie (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) définies et à le cuire jusqu'au seuil de fusion à 1450°C .

En fonction de la teneur en eau du calcaire, la fabrication du clinker se fera par un procédé appelé "voie sèche" ou "voie humide". Globalement, on peut distinguer trois étapes dans la fabrication du clinker :

Extraction des matières premières

Pour produire une tonne de clinker en "voie sèche", il faut compter une tonne et demie de matières premières – calcaire ou marne et argile – qui libéreront à la cuisson de l'eau et de l'anhydride carbonique (CO_2). Dans la carrière, la matière première est extraite (fig 1.1.2) et concassée en morceaux de dimension maximale de 60 mm environ. En "voie humide", le calcaire (sous sa forme tendre de craie) est extrait sous eau (fig 1.1.3).

Mélange et réduction de la matière première

Lors de l'étape suivante, les différentes matières premières sont mélangées dans des proportions correspondant à la composition chimique optimale.

Dans le procédé "voie sèche", les matières premières sont simultanément séchées et réduites en poudre fine, dans un broyeur à boulets ou à meules. A la sortie, on obtient une farine brute, appelée également "cru" qui va être homogénéisée pour garantir une composition uniforme.

Dans le procédé "voie humide", les matières premières sont mélangées avec de l'eau pour former une pâte liquide (le "cru") qui est homogénéisée dans des grands bassins.

Cuisson et transformation du cru en clinker

Le processus de cuisson du cru à une température d'environ 1450°C est l'opération principale de la fabrication du clinker (fig 1.1.4 et 1.1.5). A la sortie du four rotatif, la matière se présente sous forme de clinker incandescent qui sera rapidement refroidi à l'air (fig 1.1.6).

Durant la cuisson, les oxydes (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) contenus dans les matières premières se combinent entre eux pour former des constituants minéralogiques - notés C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF (annotations abrégées utilisés dans le jargon cimentier $\text{C}=\text{CaO}$, $\text{S}=\text{SiO}_2$, $\text{A}=\text{Al}_2\text{O}_3$ et $\text{F}=\text{Fe}_2\text{O}_3$) - capables de réagir avec de l'eau (voir également hydratation du ciment).



Fig 1.1.2
Engins à l'oeuvre dans une carrière



Fig 1.1.3
Extraction de la craie sous eau

1.1 Le ciment

Pour produire la chaleur nécessaire au processus de fabrication, on utilise des combustibles nobles tels le charbon, l'huile ou le gaz naturel et de plus en plus de combustibles de substitution tels des solvants, des huiles usées, des pneus, des matières plastiques ou des boues d'épuration séchées.

Des variantes à ces deux processus existent :

- ▶ Dans la "voie semi-sèche" : la farine est transformée en granules par humidification sur des grandes plaques tournantes. Ces granules sont ensuite préchauffés sur une grille mobile avant d'entrer dans le four rotatif.
- ▶ Dans la "voie semi-humide" : la pâte, préparée comme en voie humide, est partiellement déshydratée dans des filtres-presses et ensuite séchée et broyée avant d'être introduite dans le four.



Fig 1.1.4
Le four rotatif,
cœur de la
cimenterie



Fig 1.1.5
Intérieur
d'un four rotatif

Constituants à hydraulicité latente

En présence d'eau et en milieu alcalin - suite à la libération de la chaux lors de l'hydratation du clinker - les constituants à hydraulicité latente réagissent en formant des composés semblables aux hydrates de clinker, en durcissant de manière plus lente que le ciment type CEM I.

Laitier de haut fourneau (S)

Le laitier granulé de haut fourneau (fig 1.1.7) est un sous-produit de l'industrie sidérurgique. Sa préparation nécessite des installations spécifiques (granulateur) dans lesquelles le laitier est brusquement refroidi (trempé) afin de lui conférer sa réactivité et son aspect granulaire. En cimenterie, le laitier granulé est séché puis cobroyé ou mélangé avec le clinker dans une proportion qui varie de 6 à 95% pour donner des ciments Portland au laitier (CEM II, jusqu'à 35% de laitier) et des ciments de haut fourneau (CEM III, jusqu'à 95% de laitier).

Constituants pouzzolaniques

Les constituants pouzzolaniques peuvent être naturels, comme les pouzzolanes, ou artificiels, comme les cendres volantes et la fumée de silice.

Dans une première phase de l'hydratation, ces constituants sont inactifs et retardent plus ou moins la montée en résistance du béton. Dans une deuxième phase, ils réagissent lentement avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés insolubles, semblables aux hydrates de clinker. Par cet effet pouzzolanique, ces constituants contribuent ainsi à élever la compacité et la résistance finale de la pâte de ciment.

1.1 Le ciment

Cendres Volantes (V)

Les cendres volantes proviennent de la combustion du charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermiques (production d'électricité). Leur qualité dépend non seulement du combustible utilisé (houille ou lignite et co-combustibles éventuels), mais aussi du type de centrale et de son mode d'exploitation. Ces raisons expliquent que la qualité des cendres volantes puisse largement fluctuer d'un producteur à l'autre.

Constituants inertes

Calcaire (L,LL)

Le calcaire est considéré comme un constituant inerte dans le ciment. Il n'est donc ni hydraulique (latent) ni pouzzolanique. Son ajout permet d'améliorer certaines propriétés physiques dans l'application finale. Suivant la teneur en carbone organique du calcaire, sa désignation sera "L" ou "LL".

La fabrication du ciment

Afin d'obtenir un ciment ayant les caractéristiques recherchées, les constituants principaux sont broyés à une finesse ciblée dans une unité de broyage appropriée (fig 1.1.8), avec une petite quantité de régulateur de prise (généralement gypse ou anhydrite), en respectant les proportions définies dans le tableau 1.1.1. Dans certaines usines, les constituants sont broyés séparément puis mélangés.



Fig 1.1.6
Le clinker à sa sortie du four et du refroidisseur



Fig 1.1.7
Laitier granulé de haut fourneau

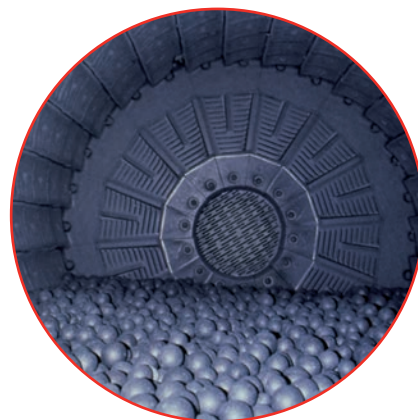


Fig 1.1.8
Intérieur d'un broyeur à boulets

1.1 Le ciment

Les types de ciment courants et leur classe de résistance

La norme NBN EN 197-1 définit les types de ciments et leurs classes de résistance mécanique.

Le type de ciment fournit une indication sur la composition du ciment (type de constituants et quantité).

La norme définit 5 types principaux de ciments (CEM I à CEM V) et distingue 27 types de produits.

Tous les types de ciment ne sont pas présents sur le marché belge.

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse ^{a)})											
			Constituants principaux										Constituants secondaires	
			K	S	D ^{c)}	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S CEM II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Ciment Portland composé ^{b)}	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A CEM III/B CEM III/C	35-64 20-34 5-19	36-65 66-80 81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Ciment pouzzolanique ^{b)}	CEM IV/A CEM IV/B	65-89 45-64	-	← 11-35 →	← 36-55 →	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM V	Ciment composé ^{b)}	CEM V/A CEM V/B	40-64 20-38	18-30 31-49	-	← 18-30 →	← 31-49 →	-	-	-	-	-	0-5	

^{a)} Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires, à l'exclusion des sulfates de calcium (gypse et anhydrite), utilisés pour réguler la prise du ciment.

^{b)} Dans le cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment.

^{c)} La proportion de fumée de silice est limitée à 10%

Tab 1.1.1
Composition des ciments selon la NBN EN 197-1

1.1 Le ciment

Les ciments sont répertoriés en trois classes de résistance désignées par les valeurs 32,5 - 42,5 et 52,5 (tab 1.1.2). Ces trois classes sont complétées par trois sous-classes selon leur résistance au jeune âge :

- ▶ montée en résistance normale (classe de résistance accompagnée de la lettre "N")
- ▶ montée en résistance rapide (classe de résistance accompagnée de la lettre "R")
- ▶ montée en résistance lente (classe de résistance accompagnée de la lettre "L"), sous-classe réservée aux ciments de type CEM III.

Classe de résistance	Résistance à la compression [N/mm ²]		
	Résistance à court terme		Résistance courante
	2 jours	7 jours	28 jours
32,5 L ^{a)}	-	≥ 12	≥ 32,5 ≤ 52,5
32,5 N	-	≥ 16	
32,5 R	≥ 10	-	
42,5 L ^{a)}	-	≥ 16	≥ 42,5 ≤ 62,5
42,5 N	≥ 10	-	
42,5 R	≥ 20	-	
52,5 L ^{a)}	≥ 10	-	≥ 52,5 -
52,5 N	≥ 20	-	
52,5 R	≥ 30	-	

Tab 1.1.2
Classes de résistance des ciments selon la NBN EN 197-1

^{a)} Classe de résistance définie uniquement pour les ciments CEM III.

Caractéristiques complémentaires selon la norme NBN EN 197-1

Ciment à faible chaleur d'hydratation

La norme NBN EN 197-1 désigne les ciments à faible chaleur d'hydratation par le suffixe "LH".

Un ciment LH est un ciment dont la chaleur d'hydratation ne dépasse pas 270 J/g, déterminée selon la NBN EN 196-8 après 7 jours ou selon la NBN EN 196-9 après 41 heures. Cette caractéristique permet de limiter l'élévation de température - consécutive à l'hydratation du ciment - dans le béton. Elle est principalement appréciée lors des bétonnages de masse où la dissipation de chaleur vers l'extérieur est très lente.

Ciment résistants aux sulfates

La norme NBN EN 197-1 désigne les ciments résistants aux sulfates par le suffixe "SR".

Un ciment SR se caractérise par des teneurs en C₃A et en SO₃ limitées (tab 1.1.3). Ces ciments sont utilisés pour la réalisation de bétons soumis à des environnements (sols ou liquides) particulièrement riches en sulfates (voir chapitre 4.6).

Principaux types	Notation des 7 produits (types de ciments courants résistants aux sulfates)		C ₃ A dans le clinker	Teneur en SO ₃
CEM I	Ciment Portland résistant aux sulfates	CEM I-SR0	= 0%	≤ 3,0% pour classes 32,5 N / 32,5 R / 42,5 N ≤ 3,5% pour classes 42,5 R / 52,5 N / 52,5 R
		CEM I-SR3	≤ 3%	
		CEM I-SR5	≤ 5%	
CEM III	Ciment de haut fourneau résistant aux sulfates	CEM III/B-SR	-	≤ 4,0%
		CEM III/C-SR		≤ 4,5%
CEM IV	Ciment pouzzolanique résistant aux sulfates	CEM IV/A-SR ^{a)}	≤ 9%	≤ 3,0% pour classes 32,5 N / 32,5 R / 42,5 N ≤ 3,5% pour classes 42,5 R / 52,5 N / 52,5 R
		CEM IV/B-SR		

Tab 1.1.3
Types et exigences chimiques des ciments résistants aux sulfates selon la NBN EN 197-1

^{a)} Exigences au niveau composition

1.1 Le ciment

Caractéristiques complémentaires belges

En Belgique, certains ciments ont des caractéristiques complémentaires, non couvertes par la norme européenne. Ces caractéristiques complémentaires sont reprises ci-après :

Ciments à haute résistance aux sulfates (HSR) selon la norme NBN B12-108

Les ciments "High Sulfate Resisting" (HSR), correspondent à l'expérience belge pour les applications en environnement à haute teneur en sulfates.

Ces ciments sont :

- ▶ les ciments Portland CEM I-SR0 et CEM I-SR3
- ▶ les ciments de haut fourneau CEM III/B-SR et CEM III/C-SR
- ▶ le ciment composé CEM V/A (S-V) HSR, s'il a une teneur en CaO $\leq 50\%$
- ▶ le ciment sursulfaté CSS HSR.

Ciments à haute résistance initiale (HES) selon la norme NBN B12-110

Les ciments CEM I "High Early Strength" (HES) satisfont à des critères additionnels de résistances minimales à 1j (24h) et permettent donc des décoffrages ou une mise en service très rapide :

- ▶ CEM I 42,5 R HES $\Rightarrow R_c$ 1 jour ≥ 10 N/mm²
- ▶ CEM I 52,5 N HES $\Rightarrow R_c$ 1 jour ≥ 15 N/mm²
- ▶ CEM I 52,5 R HES $\Rightarrow R_c$ 1 jour ≥ 20 N/mm²

Ciments à teneur limitée en alcalis (LA) selon la norme NBN B12-109

L'utilisation des ciments "Low Alkali" (LA) est une des mesures possibles pour la prévention de la réaction alcali-silice (RAS ou ASR). Cette réaction délétère du béton peut se produire lorsque les trois conditions suivantes sont remplies :

- ▶ environnement humide
- ▶ présence en quantité élevée d'alcalis solubles
- ▶ présence dans le béton de granulats sensibles aux alcalis.

La caractéristique complémentaire LA peut être accordée aux ciments CEM I, CEM III/A, B ou C et CEM V en fonction de la teneur totale en Na₂O équivalent (tab 1.1.4).

Ciment		Limite maximale de la teneur en Na ₂ O-équivalent (%)
CEM I LA		0,60
CEM III/A LA	S ^{a)} < 50%	0,90
	S ^{a)} $\geq 50\%$	1,10
CEM III/B LA		1,30
CEM III/C LA		2,00
CEM V/A LA		1,50

^{a)}S est la teneur en laitier du ciment en % par rapport à la somme des constituants principaux et secondaires

Tab 1.1.4
Teneurs maximales Na₂O-équivalent des ciments LA selon la norme NBN B 12-109

1.1 Le ciment

Exemples de désignations normalisées

CEM Ciment	I Ciment de type I (Ciment Portland)	52,5 Classe de résistance 52,5	R Montée en résistance rapide	CE Conforme à la NBN EN 197-1	HES Haute résistance initiale	BENOR Conforme au PTV 603 et à la norme NBN B12-110			
CEM Ciment	II Ciment de type II (Ciment Portland composé)	B Taux d'ajout compris entre 21 et 35%	M Mélange d'ajout	LL-S-V Les ajouts sont du calcaire, du laitier et des cendres volantes	32,5 Classe de résistance 32,5	R Montée en résistance rapide	CE Conforme à la NBN EN 197-1	BENOR Conforme au PTV 603	
CEM Ciment	III Ciment de type III (Ciment de haut fourneau)	B Taux d'ajout compris entre 66 et 80%	42,5 Classe de résistance 42,5	N Montée en résistance normale	LH Faible chaleur hydratation	SR Ciment à haute résistance aux sulfates	CE Conforme à la NBN EN 197-1	LA Ciment à faible teneur en alcalis	BENOR Conforme au PTV 603 et aux NBN B12-108 et B12-109

Contrôle de la qualité du ciment et de sa conformité aux normes

La qualité des ciments et la conformité aux normes sont garanties par une triple procédure :

- ▶ système de gestion de la qualité
- ▶ contrôle interne à la fabrication (autocontrôle)
- ▶ contrôle externe par un organisme agréé.

Système de gestion de la qualité

Holcim a mis en place un système de management de la qualité certifié selon la norme ISO 9001, de façon à garantir la documentation, la traçabilité et la transparence de tous les processus de travail.

Contrôle interne à la fabrication

A tous les stades de la fabrication, de la carrière à l'expédition, des échantillons sont prélevés et analysés. Une surveillance de la production garantit une qualité élevée et constante.

Les méthodes de contrôle des ciments sont décrites dans la série des normes NBN EN 196. Le traitement statistique des résultats de prélèvements à l'expédition doit répondre aux exigences de la norme NBN EN 197-1.

Organisme extérieur agréé de contrôle

Le contrôle interne à la fabrication est renforcé par un organe de contrôle extérieur indépendant, suivant les prescriptions de la norme NBN EN 197-2. Ce contrôle extérieur est effectué sur des échantillons prélevés en silo d'expédition. Il doit être conduit par un organisme accrédité.

Certification

La certification, délivrée par un organisme notifié par l'état, permet à l'utilisateur final d'avoir la garantie que le ciment qu'il utilise répond aux normes. Le produit est marqué par un label. Le marquage **CE** - obligatoire - garantit que le ciment répond aux normes européennes.

La marque de qualité **BENOR** - volontaire - garantit que le ciment répond à certaines caractéristiques complémentaires propres aux ciments utilisés en Belgique (exemple HSR, HES, LA,...) et renforce la fréquence de contrôle extérieur.



Fig 1.1.9

Le marquage CE et la marque BENOR attestent que les ciments sont conformes aux normes européennes et belges en vigueur et que leur qualité est contrôlée par un organisme extérieur

1.1 Le ciment

Stockage et conservation du ciment

Stocké longtemps en silo ou en sacs et sans protection, le ciment absorbe l'humidité de l'air. Il peut se former des grumeaux et le processus de durcissement risque de s'en trouver altéré. Tant que les grumeaux s'écrasent facilement entre les doigts, la perte de résistance est négligeable.

Densité du ciment en vrac :	
Non tassé (en silo)	900 - 1 250 kg/m ³ (selon le type de ciment)
Tassé (en sac)	1 600 - 1 900 kg/m ³ (selon le type de ciment, ainsi que la durée et les conditions de stockage)

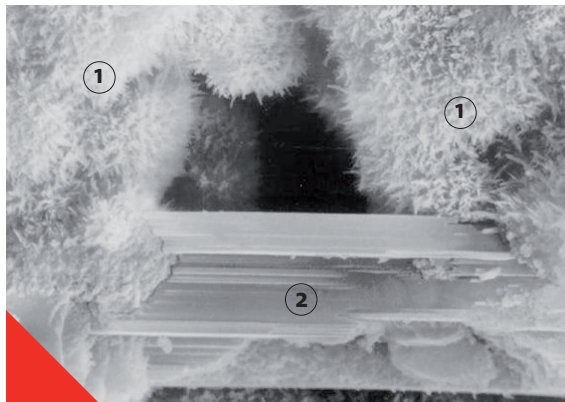


Fig 1.1.10
Pâte de ciment portland hydratée observée au microscope électronique à balayage

Hydratation du ciment

Mélangé à l'eau, le ciment réagit en s'hydratant. Il s'agit en réalité d'une cascade complexe de réactions chimiques dans lesquelles interviennent l'eau et le régulateur de prise, les constituants minéralogiques (C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF) du clinker et les autres constituants éventuels (laitier, cendres volantes, ...) ainsi que leurs produits de réaction.

En simplifiant, on peut considérer que l'hydratation mène essentiellement à la création de deux types de produits (fig 1.1.10) :

- ▶ des aiguilles (silicates de calcium hydratés ou CSH) qui croissent lentement et s'enchevêtrent pour donner un réseau dense et résistant (1)
- ▶ des plaquettes d'hydroxyde de calcium (ou chaux hydratée Ca(OH)₂) fortement alcalines et sans effet sur la résistance, mais jouant un rôle dans la protection des armatures contre la corrosion (2).

Cette réaction entraîne le durcissement progressif de la pâte de ciment et dégage une certaine quantité de chaleur (fig 1.1.11). La cinétique de ces phénomènes dépend énormément du type de ciment et de sa finesse et peut continuer bien au-delà de 28 jours. Par convention, on considère généralement les caractéristiques "finales" à 28 jours.

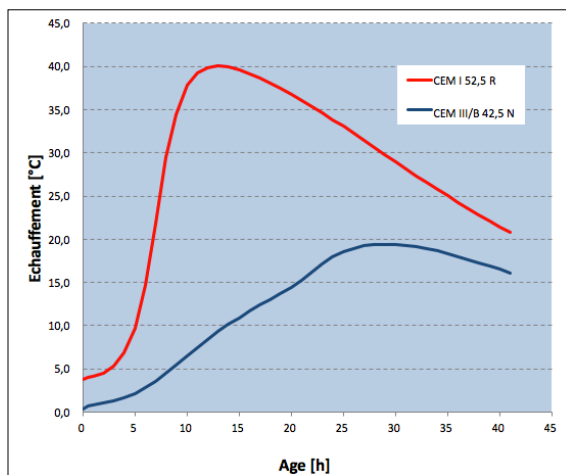


Fig 1.1.11
Echauffement de mortiers fabriqués avec du CEM I 52,5 R et du CEM III/B 42,5 N

Comportement et utilisation des ciments

Comme expliqué dans les paragraphes précédents, le ciment est un mélange - broyé plus ou moins finement - de plusieurs constituants. Ces derniers donneront chacun au produit final des caractéristiques spécifiques (tab 1.1.5).

Clinker

Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland. Utilisé pur, il offrira au ciment une grande réactivité et des résistances élevées. De ce fait, la chaleur d'hydratation qu'il dégage est souvent importante.

1.1 Le ciment

Laitier

Les ciments contenant du laitier ont une montée en résistance d'autant plus lente que leur teneur en laitier est élevée. Ils demandent généralement un allongement du temps de coffrage et une durée de cure plus importante.

Ils ont néanmoins des qualités qui les rendent intéressants dans plusieurs domaines d'applications :

- ▶ chaleur d'hydratation réduite, utile pour les bétonnages de masse et les bétonnages par temps chaud
- ▶ très bonne durabilité en présence d'eau douce, à l'eau de mer, aux eaux sulfatées et à la pénétration des ions chlorures
- ▶ diminution du risque d'efflorescences (pour des teneurs élevées en laitier)
- ▶ bon maintien d'ouvrabilité
- ▶ résistance mécanique très élevée à longue échéance
- ▶ réduit les risques de réactions alcali-silice
- ▶ teinte claire.

Cendres volantes

Les cendres volantes sont constituées de particules dont la finesse, proche du ciment, et la forme sphérique contribuent à améliorer l'ouvrabilité du béton frais. L'ajout de cendres volantes dans le ciment confère également aux bétons une meilleure durabilité. Le léger retard de durcissement qu'elles induisent diffère également le développement de la chaleur d'hydratation et atténue en conséquence les pointes de température lors de bétonnages de masse.

L'usage d'adjuvants entraîneurs d'air est déconseillé avec les cendres volantes. Le carbone contenu dans celles-ci perturbe en effet le fonctionnement de ces adjuvants.

Calcaire

La fine poudre de calcaire agit comme un "lubrifiant" et améliore l'ouvrabilité des bétons, notamment lorsque ce dernier doit être pompé. L'ajout de calcaire confère au ciment une bonne capacité de rétention d'eau, ce qui réduit les risques de ressuage et favorise le compactage du béton.

Aptitude à l'emploi des ciments

Malgré leur aptitude générale à l'utilisation prévue dans la norme européenne béton (NBN EN 206), il est important de noter que tous les types de ciment ne sont pas conseillés pour tous les usages en Belgique. La norme NBN B15-001 contient une "matrice de l'aptitude à l'emploi" de tous les types de ciment en fonction de l'environnement auquel le béton sera exposé.

Constituant	Type d'action	Réaction chimique	Effet sur les caractéristiques du béton ↑ = Augmentation ↓ = Diminution
Laitier granulé de haut fourneau	Hydraulité latente	En milieu basique (l'hydratation du clinker permet de faire monter le pH à 13) et en présence d'eau : formation d'hydrates analogues à ceux formés par le clinker.	↓ Porosité ↑ Durabilité ↓ Chaleur d'hydratation ↓ Résistance initiale ↑ Résistance à très long terme
Cendres volantes siliceuses, Pouzzolanes naturelles, Fumées de silice	Pouzzolanique	Réaction avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH) ₂ , produit d'hydratation du clinker) et l'eau : formation d'hydrates analogues à ceux formés par le clinker.	↑ Ouvrabilité ↓ Porosité ↑ Durabilité ↓ Chaleur d'hydratation ↓ Résistance initiale ↑ Résistance à très long terme
Calcaire	Inerte	Aucune réaction, ou tout au plus réactions superficielles.	↑ Ouvrabilité ↓ Porosité (effet de remplissage)

Tab 1.1.5
Classification et effet des constituants

1.1 Le ciment



Fig 1.1.12
Gamme sacs
Holcim
(Belgique)

Autres ciments

Ciments à maçonner

Les ciments à maçonner, désignés MC par la norme NBN EN 413-1, sont des ciments contenant du clinker, une teneur élevée d'ajouts, généralement du filler calcaire, et des adjuvants. Ces ciments sont spécialement destinés au montage de murs en briques ou en blocs et à la réalisation d'enduits ou à la pose de carrelages. Leur composition permet la réalisation aisée de mélanges onctueux, faciles à mettre en oeuvre et ayant une capacité de rétention d'eau élevée, afin que l'eau contenue dans le mortier ne soit pas absorbée par les supports poreux.

Ciments Very Low Heat

Les ciments "Very Low Heat", désignés VLH par la norme NBN EN 14216, se caractérisent par une chaleur d'hydratation qui ne doit pas excéder la valeur caractéristique de 220 J/g.

Une seule classe de résistance courante est couverte : la classe 22,5 (résistance caractéristique minimale 22,5 N/mm² et résistance caractéristique maximale 42,5 N/mm²).

Les 6 ciments potentiellement VLH sont :

- ▶ CEM III/B et CEM III/C
- ▶ CEM IV/A et CEM IV/B
- ▶ CEM V/A et CEM V/B

1.1 Le ciment

Ciments d'aluminates de calcium

Les ciments d'aluminates de calcium, désignés CAC selon la norme NBN EN 14647, présentent les caractéristiques particulières suivantes :

- ▶ grande résistance aux sulfates
- ▶ durcissement exceptionnellement rapide y compris aux faibles températures
- ▶ résistance aux températures élevées.

L'hydratation du ciment d'aluminates de calcium est très différente de celle des ciments Portland. Les aluminates de calcium hydratés formés dépendent de la température d'hydratation et sont métastables sur une durée pouvant aller jusqu'à plusieurs années, en fonction des températures. Il en résulte des résistances à la compression très élevées à jeune âge (R_c 6h minimale $> 18 \text{ N/mm}^2$ et R_c 24h minimale $> 40 \text{ N/mm}^2$) accompagnées, après atteinte des résistances maximales, d'une réduction des résistances jusqu'à obtention des résistances finales. Ce processus, appelé conversion, peut prendre plusieurs années.

Le clinker d'aluminates de calcium est produit par fusion ou frittage d'un mélange aux spécifications précises de matériaux alumineux et calcaires.

L'utilisation de ciment d'aluminate de calcium doit s'accompagner de nombreuses précautions, notamment celle d'éviter tout contact avec le ciment portland ou la chaux.

Ciments sursulfatés

Les ciments sursulfatés sont désignés SSC selon la norme NBN EN 15743. Le constituant principal de ce ciment est le laitier granulé de haut fourneau (S), sa teneur est supérieure à 75%. Les deux autres composants sont le sulfate de calcium (entre 5 et 20%) et le système d'activation.

Les particularités de ce ciment sont sa très faible chaleur d'hydratation mais surtout sa très haute résistance aux agents agressifs, principalement les sulfates.

Ciments blancs

Les ciments blanc sont des ciments Portland ou des ciments Portland au calcaire, conformes à la norme NBN EN 197-1. Ils sont fabriqués dans des lignes de production dédiées, à partir des matières premières brutes particulièrement choisies qui sont généralement la craie pure et l'argile blanc (kaolin) ne contenant que de très petites quantités d'oxydes de fer et d'oxydes de manganèse.

La fabrication du ciment blanc exige un contrôle rigoureux et précis durant l'ensemble des étapes du processus technologique afin d'empêcher la contamination du produit, notamment avec de l'oxyde de fer. L'oxyde de fer a habituellement un rôle de fondant dans la fabrication du ciment gris. Son absence implique donc une température de cuisson nettement plus élevée pour la fabrication de clinker blanc.

1.2 L'eau de gâchage

Généralités

L'eau joue un double rôle dans la technologie du béton. D'une part, elle permet l'hydratation du ciment et d'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité (consistance et viscosité) et un bon compactage du béton.

On entend par "eau totale", la totalité de l'eau contenue dans le béton frais.

L'"eau efficace" quant à elle comprend seulement :

- ▶ l'eau de gâchage, ajoutée au mélange
- ▶ l'eau contenue à la surface des granulats
- ▶ suivant les cas, l'eau apportée par les adjuvants ou les ajouts (suspensions de fumée de silice, de pigments, ...).

L'eau totale comprend donc l'eau efficace plus l'eau contenue dans les granulats (eau d'absorption), qui n'est pas disponible pour mouiller le mélange et ainsi participer à son ouvrabilité et à l'hydratation du ciment.

Pour cette raison, c'est la valeur de l'eau efficace qui est utilisée pour le calcul du facteur eau/ciment (E/C).



Fig 1.2.1

Equipement de traitement des eaux d'une centrale à béton : recycleuse, bassins de décantation et bâtiment filtre presse

Exigences concernant l'eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage ne peut pas contenir, en quantités appréciables, des substances susceptibles de réagir avec le béton ou l'armature.

Ces substances peuvent induire en particulier :

- ▶ une accélération ou un ralentissement de la prise et du durcissement (p. ex : sucre, acides humiques)
- ▶ un entraînement excessif d'air non contrôlé, d'où perte de résistance (p. ex : micro-organismes, huiles, graisses, suspensions, certains sels minéraux)
- ▶ la corrosion des armatures.

La norme NBN EN 1008 admet comme principe que l'eau potable peut être utilisée sans contrôle particulier pour la confection du béton.

L'aptitude à l'emploi de l'eau de gâchage d'autre provenance (eau de surface, eau souterraine, eau de process) peut être démontrée par une analyse selon la norme NBN EN 1008.

En contrôle préliminaire, il faut s'assurer que l'eau est claire et inodore, exempte de matières organiques, son pH doit être ≥ 4 et elle ne doit pas former de mousse persistante après agitation.

Les caractéristiques chimiques suivantes sont également vérifiées :

- ▶ teneur en chlorures :
 - ≤ 500 mg/l pour le béton précontraint
 - $\leq 1\ 000$ mg/l pour le béton armé
 - $\leq 4\ 500$ mg/l pour le béton non armé
- ▶ teneur en alcalis $\leq 1\ 500$ mg/l
- ▶ teneur en sulfates $\leq 2\ 000$ mg/l.

Pour les teneurs en chlorures et en alcalis, l'eau peut éventuellement dépasser ces limites si le bilan en chlorures et en alcalis de la formule de béton est conforme.

Finalement, l'eau est analysée pour détecter la présence d'éventuels contaminants qui risquent de perturber la prise ou la résistance : sucres, phosphates, nitrates, zinc, plomb.

1.2 L'eau de gâchage

Eau recyclée (eau de lavage)

Les centrales à béton sont aujourd'hui équipées de systèmes de traitement des retours de béton et des eaux de lavage. Ces systèmes permettent la récupération des granulats et le traitement des eaux chargées.

La première étape consiste à déverser le béton dans un "tambour" afin de séparer les granulats et les eaux chargées en fines (fig 1.2.1). Cette eau est ensuite traitée selon plusieurs possibilités (décantation (fig 1.2.2), filtre presse (fig 1.2.3), bassins avec agitation) et est utilisable pour le gâchage, mais doit faire l'objet de contrôles réguliers, conformément à la norme NBN EN 1008, et plus spécifiquement son annexe 2.1.

L'utilisation d'eau recyclée avec une densité $> 1,01$ kg/litre mène à des adaptations de la recette théorique (correction eau et sable). L'utilisation d'eau recyclée non suffisamment propre peut avoir un impact défavorable sur l'ouvrabilité des bétons.

Les effets possibles de l'utilisation d'eaux de lavage doivent être pris en compte s'il s'agit d'un béton devant répondre à des caractéristiques particulières comme le béton apparent, le béton précontraint, le béton à air entraîné, le béton autoplaçant, ...

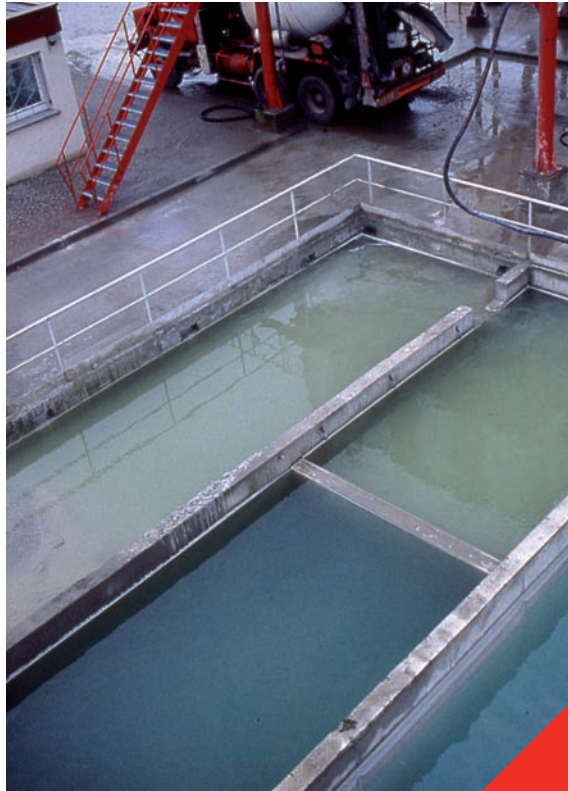


Fig 1.2.2
Bassins de
décantation
d'eaux de
lavage d'une
centrale
à béton

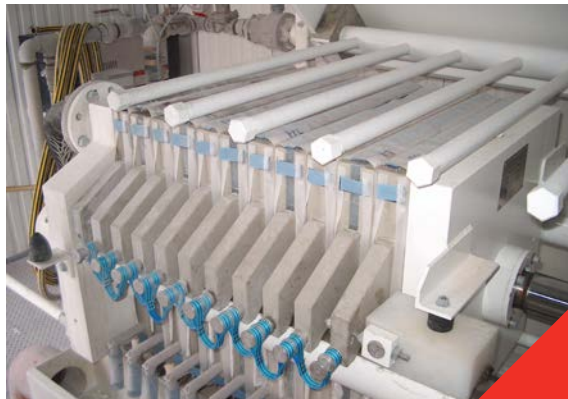


Fig 1.2.3
Filtre presse

1.3 Les granulats

Généralités

On désigne en général par granulats l'ensemble des matériaux inertes - naturels ou artificiels - qui sont solidarités par le ciment. Les granulats occupent environ les trois quarts du volume du béton et forment le squelette inerte du béton. Les propriétés du béton frais et celles du béton durci, comme la résistance à la compression et la durabilité, dépendent fortement des propriétés des granulats utilisés.

Comme l'illustre le tableau 1.3.1, on fait la distinction entre trois sortes de granulats : le sable (rond ou concassé), le gravillon, parfois dénommé gravier dans le cas d'origine alluvionnaire (ces gravillons sont en général arrondis) et la grave (désignée également par le terme "mélange de gravillons et sables").

Désignation	Définition	Exemples
Sable <i>(rond ou concassé)</i>	$D \leq 4 \text{ mm}$ et $d = 0$	0/1 0/2 0/4
Gravillon <i>(gravier ou gravillon concassé)</i>	$D \geq 4 \text{ mm}$ $d \geq 2 \text{ mm}$	2/8 8/16 16/32 4/32
Grave <i>(mélange de gravillons et sables)</i>	$D \leq 45 \text{ mm}$ et $d = 0$	0/32

Tab 1.3.1
Définition
avec exemples
des termes
"sable",
"gravillon" et
"grave"

Le terme filler est également couramment utilisé. Il désigne un granulat dont la plupart des grains passent au tamis de 0,063 mm et qui peut être ajouté aux matériaux de construction pour leur conférer certaines propriétés.

Caractéristiques

Les exigences concernant les caractéristiques des granulats pour béton sont spécifiées dans la NBN EN 12620 "Granulats pour béton" et le PTV 411 "Codification des granulats".

Les caractéristiques principales des granulats pour béton sont les suivantes :

- ▶ caractéristiques géométriques (granularité, teneur en fines, forme, propreté des sables, teneur en coquillages)
- ▶ caractéristiques physiques (Los Angeles, micro-Deval, masse volumique et absorption d'eau, résistance au polissage)
- ▶ caractéristiques chimiques (pétrographie, classification des recyclés, soufre, sulfates solubles, chlorures, constituants influençant le durcissement du béton)
- ▶ caractéristiques de durabilité (résistance au gel-dégel, réactivité alcali-silice, stabilité volumique).

1.3 Les granulats

Caractéristiques géométriques

Granularité ou courbe granulométrique

La granularité influence de manière déterminante la porosité du squelette granulaire, et par conséquent la densité du béton et sa résistance. Elle a également une influence considérable sur la demande en eau et sur l'ouvrabilité du béton.

La granularité représente la distribution dimensionnelle des grains, exprimée en pourcentage de masse passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis.

En tamisant le granulat au moyen d'une série de tamis normalisés, on obtient pour chaque tamis un refus qui permet de désigner les granulats en termes de dimension inférieure (d) et supérieure (D), exprimé en d/D. Comme les classes granulaires d'un granulat présentent généralement plus ou moins toutes la même masse volumique, il est suffisant de spécifier la granularité en pourcentage de masse (fig 1.3.1, page suivante, exemples de courbes granulométriques).

Les tamis qui délimitent les classes granulaires (série de base et séries complémentaires) sont indiqués au tableau 1.3.2. En Belgique, on utilise couramment "série de base + série 2".

D'une manière générale les granulats sont livrés et utilisés en classes granulaires bien définies (tab 1.3.3).

Lorsqu'une classe granulaire fait partiellement ou totalement défaut dans une formule béton, on parle de granularité "discontinue". A l'endroit de la classe manquante, la granularité (courbe granulométrique) est caractérisée par un palier horizontal ou légèrement incliné (fig 1.3.2). En général, on cherche à avoir une courbe continue, ce qui est favorable à une bonne ouvrabilité des bétons.

Série de base (mm)	Série de base + série 1 (mm)	Série de base + série 2 (mm)
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
-	5,6 (5)	-
-	-	6,3 (6)
8	8	8
-	-	10
-	11,2 (11)	-
-	-	12,5 (12)
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22,4 (22)	-
31,5 (32)	31,5 (32)	31,5 (32)
-	-	40
-	45	-
-	-	56
63	63	63

Tab 1.3.2
Dimensions des tamis pour la spécification des classes granulaires

Exemples de classes granulaires	Désignation selon NBN EN 12620
≤ 0,063 mm	Fines (filler)
Classes granulaires 0 – 4 mm 4 – 8 mm 8 – 16 mm 16 – 32 mm ≥ 32 mm	Sable Gravillon Gravillon Gravillon Gravillon

Tab 1.3.3
Classes granulaires usuelles

1.3 Les granulats

Influence du sable et de la teneur en fines

La fraction 0-4 mm a une influence primordiale sur la qualité d'ensemble du mélange de granulats. C'est sa porosité et la forme de sa granularité qui va jouer un grand rôle sur la demande en eau.

Un bon mélange de sable à béton doit avoir environ un tiers de ses grains compris entre 0,250 et 0,500 mm. Pour cette raison, il peut être nécessaire de recomposer la fraction 0-4 mm à partir de sable rond lavé (de mer et/ou de rivière), de sable concassé lavé et/ou de sable concassé sec (pour les bétons maigres).

Les fines ($\leq 0,250$ mm) jouent aussi un rôle déterminant. L'expérience a montré que la teneur totale en fines (ciment, additions et part des granulats de dimensions $\leq 0,250$ mm) doit s'approcher des valeurs reprises au tableau 1.3.4.

Cette quantité de fines permet notamment :

- ▶ un pompage facile du béton
- ▶ une bonne qualité de parement
- ▶ une stabilité (absence de ressuage et de ségrégation) du béton.

Il faut cependant veiller à ce que les fines soient propres.

Diamètre maximal des granulats (mm)	8	16	22,4	32
Teneur en fines (kg/m³ de béton)	575	500	465	425

Tab 1.3.4

Teneur en fines ($\leq 0,250$ mm) recommandée en fonction de la dimension maximale des granulats pour le béton pompé et le béton apparent

Fig 1.3.1
Exemple de courbes granulométriques de sable et gravillons

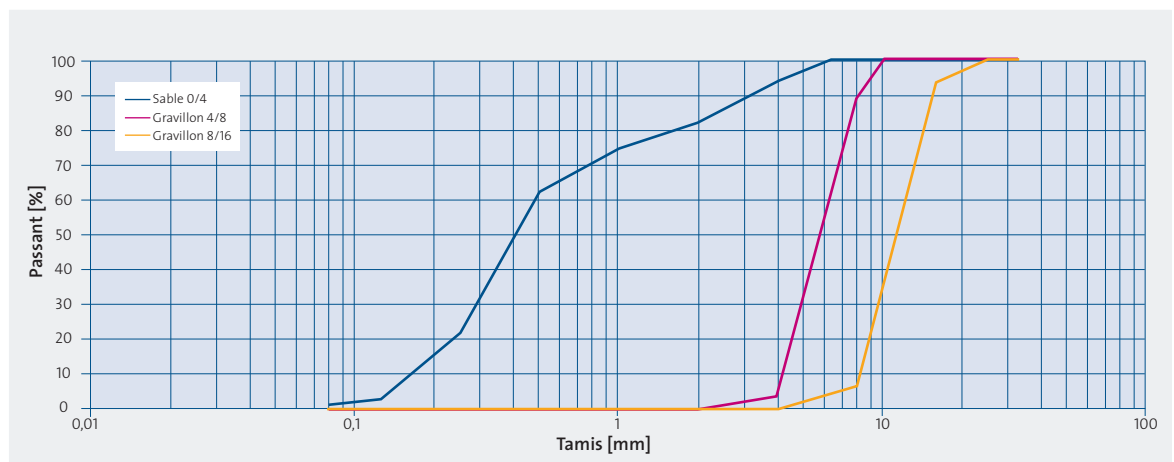
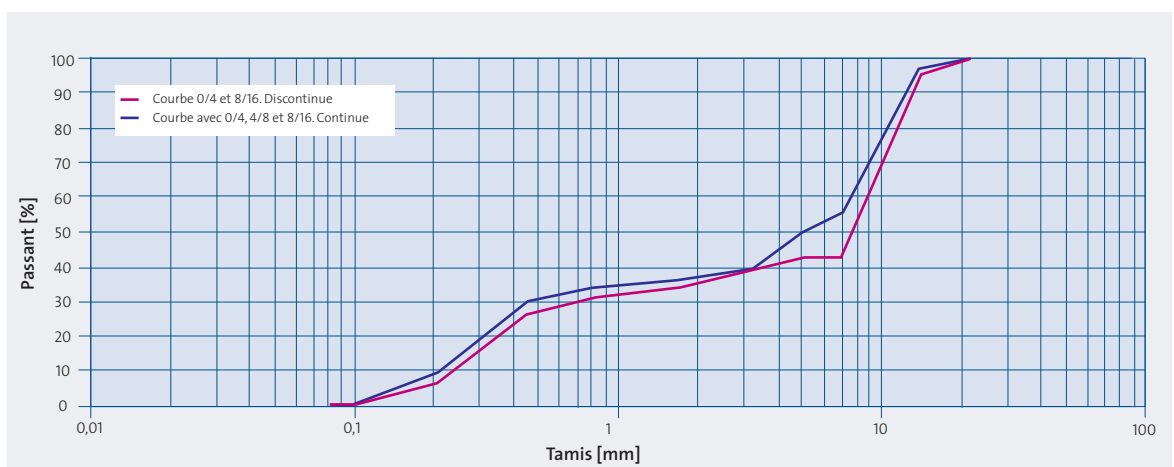


Fig 1.3.2
Courbe granulométrique d'un mélange granulaire formulé avec (courbe continue) et sans (courbe discontinue) fraction intermédiaire 4/8



1.3 Les granulats

Forme

La porosité et la forme des grains, mais aussi leur état de surface et leur distribution dimensionnelle influencent considérablement le besoin en eau, l'ouvrabilité et la stabilité (ressuage) du béton (tab 1.3.5).

L'expérience a montré qu'un mélange pour béton comprenant exclusivement des classes granulaires de gravillons concassés peut très bien être utilisé. Les granulats concassés améliorent la résistance mécanique du béton (traction, compression, abrasion) mais influencent défavorablement l'ouvrabilité. La limitation des gravières exploitables entraîne un épuisement progressif des gisements de sables et de graviers roulés, raison pour laquelle le recours aux granulats concassés et recyclés sera de plus en plus fréquent à l'avenir. Ceci ne pose aucun problème, pour autant que le volume de pâte de ciment soit adapté en conséquence.

Propreté

Une propreté insuffisante des granulats est préjudiciable à la qualité du béton. Il en résulte, par exemple, une altération de la prise et du durcissement ainsi qu'une diminution de la résistance au gel. Raison pour laquelle beaucoup de granulats doivent être lavés (fig 1.3.3), afin d'être exempts de matières organiques, dangereuses pour l'hydratation des ciments, et de particules argileuses, dont la nocivité sera appréciée par des essais tels que équivalent de sable et bleu de méthylène.



Fig 1.3.3
Lavage industriel des gravillons

Granulats roulés		Granulats concassés	
Sphériques	Aplatis/allongés	Cubiques	Aplatis/allongés
Arrondis		Anguleux	
Surfaces lisses		Surfaces rugueuses	
<p>————— Demande en eau croissante —————></p>			
<p><————— Ouvrabilité et aptitude au compactage croissante —————</p>			

Tab 1.3.5
Relation entre la forme des grains et leurs propriétés

1.3 Les granulats

Caractéristiques physiques

Masse volumique et absorption d'eau

L'origine minéralogique et la porosité des granulats déterminent leur masse volumique (tab 1.3.6).

La masse volumique en vrac (mesurée selon la NBN EN 1097-3) correspond à la masse de matériau en vrac par unité de volume. Elle est utilisée pour l'estimation d'un stock.

La masse volumique réelle (mesurée selon la NBN EN 1097-6) correspond à la masse de matériau séché à l'étuve par rapport au volume qu'il occupe dans l'eau, y compris le volume des pores fermés ou accessibles à l'eau. Elle est utilisée comme donnée d'entrée pour la formulation des bétons.

Le taux d'humidité des granulats comprend l'eau à la surface des grains et celle absorbée par ceux-ci. L'humidité des sables est généralement comprise entre 4 et 10% de la masse, tandis que celle des granulats plus grossiers n'excède pas 5%. Le taux d'humidité des granulats doit être pris en compte pour le calcul des volumes de granulats et pour celui de l'eau de gâchage.

L'eau absorbée par les granulats n'est pas disponible pour l'hydratation et la fluidité du béton.

L'eau absorbée par les gravillons peut être néfaste pour la résistance au gel.

Los Angeles

Le coefficient Los Angeles détermine la résistance à la fragmentation d'un gravillon. Un faible coefficient LA signifie une bonne résistance à la fragmentation.

Autres caractéristiques éventuelles

Pour certaines applications (ex : béton pour revêtement routier), il est parfois nécessaire de spécifier certaines caractéristiques supplémentaires : résistance à l'usure (via l'essai micro-Deval MDE), résistance au polissage (via l'essai PSV anciennement CPA).

Granulats	Masse volumique réelle (kg/m ³)	Nature des granulats	Utilisation
Granulats courants	2550 – 2800	Dépôts fluviaux, granulats concassés	Béton armé et non armé, produits en ciment
Granulats lourds	≥ 3000	Barytine, minerai de fer, hématite, granulats en acier	Béton de protection contre les radiations
Granulats légers	≤ 2000	Argile, schiste ou verre expansé, pierre ponce	Béton léger, béton isolant, béton de pente

Tab 1.3.6

Classification des granulats en fonction de leur masse volumique

1.3 Les granulats

Caractéristiques chimiques

Chlorures

La teneur en ions chlorures solubles dans l'eau doit être connue afin de faire le bilan en chlorures du béton.

La quantité de chlorures contenue dans le béton doit être maîtrisée afin de limiter les risques de corrosion des armatures (voir chapitre 4.3). Certains chlorures sont de surcroît accélérateurs de prise et de durcissement du béton. Ils se retrouvent essentiellement dans les granulats marins peu ou pas lavés.

Soufre et sulfates solubles

Les teneurs en soufre total et en sulfates sont des caractéristiques qui régionalement sont indispensables pour évaluer l'impact d'une source de granulat sur la durabilité des bétons vis-à-vis d'éventuelles réactions ettringétiques secondaires (voir chapitre 4.6).

A noter que dans le cas des granulats recyclés, la méthode d'essais est modifiée pour ne recueillir que les sulfates solubles dans l'eau. En effet, les sulfates liés présents dans la fraction mortier en seraient libérés par l'attaque acide de la méthode d'essais granulat naturel avec comme conséquence une valeur largement surévaluée de la teneur en sulfates actifs.

La présence de sulfures de fer (pyrite, marcassite, ...) est une information à prendre en compte dans le cas de béton dont l'aspect esthétique est une caractéristique importante (risque de taches de rouille).

Caractéristiques de durabilité

Géivité

Lorsque le béton doit résister au gel, il convient de s'assurer de la résistance au gel-dégel des gravillons. Un gravillon ayant une absorption d'eau $\leq 1\%$ et/ou un LA ≤ 25 sera considéré comme non gélif (sans essais complémentaires nécessaires). Certains granulats peuvent avoir un coefficient d'absorption d'eau $> 2\%$ et offrir une résistance au gel - dégel adéquate.

L'essai de géivité des granulats consiste à faire subir des cycles de gel-dégel aux granulats saturés en eau et à mesurer la perte de masse par tamisage.

Sensibilité à la réaction alcali-silice

La réaction alcali-silice est traitée au chapitre 4.9.

Réglementation

Depuis le 1^{er} juin 2004 les granulats mis sur le marché sont soumis à l'obligation réglementaire du marquage CE.

Le producteur doit déclarer la performance de ses granulats vis-à-vis de la norme NBN EN 12620. Un certificat d'Évaluation et Vérification de la Constance des Performance atteste de cette déclaration. Un certificat de niveau 4 correspond à la déclaration par le fabricant. Un certificat de niveau 2+ implique en plus qu'un organisme notifié de certification surveille, évalue et apprécie le contrôle de production en usine.

Certification

La marque BENOR est une démarche volontaire, elle certifie la codification des granulats selon le PTV 411 ainsi que leurs éventuelles caractéristiques complémentaires. Elle garantit que les caractéristiques des produits ont été vérifiées et validées par des auditeurs et laboratoires indépendants et qu'elles sont effectivement contrôlées et respectées de façon continue par le producteur.

1.4 Les adjuvants

Définition et classification

L'emploi d'adjuvants répond à des considérations techniques et économiques. Certaines performances du béton frais et du béton durci ne peuvent être atteintes qu'avec l'aide d'adjuvants. Les adjuvants peuvent contribuer à diminuer le coût de la main-d'oeuvre et des matériaux ou celui de l'énergie de malaxage. En facilitant la mise en place des bétons, ils rendent possible l'application de méthodes plus économiques lors de la réalisation des chantiers.

Il convient généralement de procéder à des essais préliminaires en vue de déterminer l'efficacité des adjuvants.

La conformité des adjuvants pour le béton est régie par la norme NBN EN 934-2.

Les adjuvants sont constitués de molécules organiques, de synthèse ou naturelle, et de sels dissous dans l'eau. Ils sont ajoutés au béton lors du malaxage. Par leur action chimique ou physique, ces substances modifient certaines propriétés du béton frais ou du béton durci comme par exemple l'ouvrabilité, la prise, le durcissement ou la résistance au gel.

Classification des adjuvants

Adjuvants	Effets principaux
Plastifiants (ou "réducteurs d'eau")	Déflocculation des grains de ciment Diminution du rapport E/C (augmentation des résistances mécaniques) Amélioration de l'ouvrabilité et maintien dans le temps Augmentation de la cohésion du béton
Superplastifiants (ou "haut réducteurs d'eau")	Forte déflocculation des grains de ciment Forte réduction du rapport E/C (forte augmentation des résistances mécaniques) Forte fluidification du béton ; maintien dans le temps très variable
Accélérateurs de prise ou de durcissement	Réduction des temps de prise des bétons Accroissement de la vitesse de montée en résistance des bétons Bétonnage en hiver
Retardateurs de prise	Accroissement des temps d'ouvrabilité et des temps de prise Régulation de la chaleur d'hydratation Bétonnage en été et/ou déchargement lent
Entraîneurs d'air	Protection des bétons contre les actions du gel et des sels de déverglaçage par création d'un réseau de micro-bulles d'air
Hydrofuges de masse	Réduction de la capillarité et de l'absorption capillaire des bétons Renforcement de "l'étanchéité intrinsèque" des bétons Possibilité de réduire certaines efflorescences

Tab 1.4.1
Synthèse des effets principaux des adjuvants

Dosage

En général, les adjuvants sont introduits sous forme liquide, en petites quantités, lors du malaxage. Leur pourcentage en poids par rapport au ciment se situe en général entre 0,2 et 2%. Le dosage doit de toute façon être effectué selon les directives des fabricants. La part d'eau ainsi introduite dans le béton est prise en compte dans le calcul du E/C.

Les systèmes de dosage utilisés (bascales en cas de dosage pondéral, pompes et débitmètres en cas de

dosage volumétrique) doivent être adaptés aux dosages visés et à la viscosité de l'adjuvant. Il est en effet important de pouvoir doser les adjuvants de façon très précise.

Les sous-dosages diminuent très rapidement l'effet recherché, alors que les sur-dosages peuvent avoir des effets indésirables tels que ralentissement de la prise, ségrégation, entraînement excessif d'air avec perte de résistance à la compression associée.

1.4 Les adjuvants

Principaux types d'adjuvants

Les plastifiants et superplastifiants

Ils sont de loin les adjuvants les plus utilisés pour la confection du béton. Les plastifiants ont un effet "réduit" car moins concentrés ou provenant de dérivés du bois ou du maïs. Les superplastifiants, plus puissants, proviennent de la synthèse de molécules. Sur ceux-ci s'est concentré l'essentiel de l'effort de recherche des adjuvantiéristes : après les "mélamines" (PMS) et les "naphthalènes" (PNS), les "polycarboxylates" (PCP) et "éthers polycarboxyliques" (PCE) ont ouvert de nouvelles possibilités dans la réalisation des bétons. Leur utilisation doit toujours s'accompagner d'un réglage soigné de la répartition des fines particules du béton. Le mode d'action de ces adjuvants peut être décrit comme suit (fig. 1.4.1) :

- ▶ Pour un rapport E/C constant, les superplastifiants améliorent l'ouvrabilité du béton (A). Ce mode d'action est recherché pour prolonger les temps d'ouvrabilité ou encore pour bétonner par temps chaud. Le confort d'utilisation, et donc la qualité des réalisations sont grandement améliorés quand le superplastifiant est ainsi utilisé.
- ▶ A ouvrabilité constante, les superplastifiants permettent de réduire l'eau nécessaire, donc le rapport E/C (B). Les plastifiants permettent une réduction de ce rapport d'au moins 5% et les superplastifiants d'au moins 12%. Il en résulte un accroissement des résistances, de la compacité et de la durabilité des bétons. Les propriétés du béton se trouvent quasiment toutes améliorées quand le superplastifiant est utilisé pour réduire la quantité d'eau.
- ▶ Dans la pratique, c'est une action combinée (C) qui est obtenue, plus ou moins prononcée dans un sens ou dans l'autre.

L'intérêt des superplastifiants se retrouve dans l'optimisation des facteurs coût, ouvrabilité et caractéristiques finales du béton. Les superplastifiants sont devenus incontournables dans la réalisation des bétons courants et évidemment pour les bétons à hautes performances (BHP) et les bétons autoplaçants (BAP).

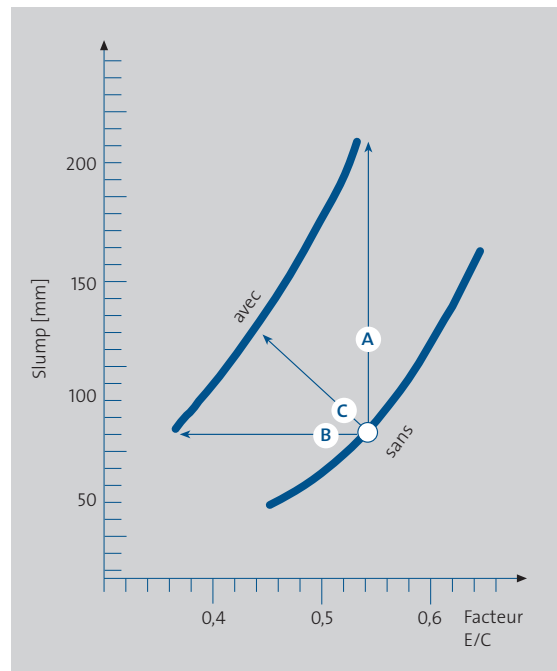


Fig 1.4.1
Effet d'un
superplastifiant

Comme effet secondaire des superplastifiants, il faut signaler un ralentissement de la prise en cas de trop fort dosage, et des difficultés parfois à régler le pourcentage d'air entraîné en combinaison avec les entraîneurs d'air. Un dosage élevé en superplastifiant peut également être à l'origine d'une augmentation importante et non désirée de la viscosité du béton.

Il est important de vérifier la bonne compatibilité entre les ciments (et dans une moindre mesure, les granulats) et ces types d'adjuvant, surtout en cas de dosage élevé ou lors de l'utilisation simultanée de plusieurs adjuvants.

Il est également important de prendre en compte la durée d'efficacité des superplastifiants. Cette durée est généralement diminuée si la température augmente. Il est courant, dans le béton prêt-à-l'emploi en Belgique, de doser (partiellement) le superplastifiant lors de l'arrivée sur chantier. Si tel est le cas, il faut veiller à la précision du système de dosage du camion mixer ainsi qu'au respect d'un temps de remalaxage suffisant après ajout de l'adjuvant (1 minute/m³).

1.4 Les adjuvants

Les accélérateurs

Les accélérateurs, improprement appelés parfois antigels, avancent le début de prise et permettent un dégagement plus rapide de la chaleur d'hydratation du ciment. La plupart d'entre eux accélèrent également le durcissement du béton.

Ils permettent ainsi de décoffrer, de mettre en charge, ou d'exposer le béton au gel dans un délai plus court.

L'effet des accélérateurs dépend beaucoup de leur constitution chimique et de celle du ciment utilisé.

Les premiers accélérateurs, à base de chlorures, ne sont plus utilisés de nos jours que dans le béton non armé du fait de leur action corrosive sur les armatures.

Leur effet étant difficile à maîtriser, les accélérateurs n'entrent en ligne de compte que dans des cas très particuliers :

- ▶ béton projeté
- ▶ bétonnage par temps froid
- ▶ délais de décoffrage très courts
- ▶ bétonnage au contact d'eaux courantes
- ▶ ancrages
- ▶ travaux de réparation
- ▶ étanchement d'infiltrations et de voies d'eau.

Les retardateurs

Ces adjuvants retardent le début de la prise du ciment et prolongent ainsi le délai de mise en place du béton.

Les applications principales des retardateurs sont les suivantes :

- ▶ bétonnage par temps chaud
- ▶ transports sur des longues distances
- ▶ bétonnage de gros volumes ou de grandes surfaces
- ▶ suppression des joints de travail en cas d'arrêts programmés (pas de discontinuité entre les étapes de bétonnage)
- ▶ étalement de la chaleur d'hydratation dégagée dans la masse du béton.

Un béton avec retardateur durcit moins vite au jeune âge mais sa résistance à 28 jours est souvent un peu plus élevée que celle d'un béton sans retardateur. Du fait de son durcissement initial ralenti, un béton avec retardateur nécessite une cure particulièrement attentive.

Comme l'effet recherché dépend beaucoup du type de retardateur, mais aussi du ciment utilisé et de la température ambiante, il est indispensable de procéder à des essais préalables, à différentes températures.

Les entraîneurs d'air

Le rôle des entraîneurs d'air consiste à stabiliser, en un réseau dense de micro-bulles d'air, l'air naturellement généré lors du malaxage du béton. On améliore ainsi sensiblement la résistance au gel du béton en présence de sels de déverglaçage (voir chapitre 4.5). Il en résulte également une amélioration de l'ouvrabilité. Un effet indésirable des entraîneurs d'air est la perte de résistance mécanique liée à leur utilisation.

Les bulles introduites dans le béton frais restent présentes dans le béton durci. En cas de gel, elles absorbent en partie l'eau mise en mouvement dans les capillaires. Le risque d'éclatement du béton par surpression de la glace s'en trouve ainsi réduit (fig 1.4.2). En outre, ces micro-bulles d'air diminuent la continuité du réseau capillaire du béton et réduisent ainsi sa capacité d'absorption d'eau par capillarité.

Dans la plupart des cas, une très petite quantité d'adjuvant suffit pour obtenir la teneur en air souhaitée. De toute manière, la teneur en air ne dépend pas seulement du type et du dosage de l'adjuvant, mais également de toute une série d'autres facteurs : type de ciment, nature des granulats et courbe granulométrique du sable, consistance, température, intensité et durée du malaxage, présence d'autres adjuvants ou ajouts, durée de transports, etc. La compatibilité de nouvelles formulations doit absolument être vérifiée par des essais initiaux.

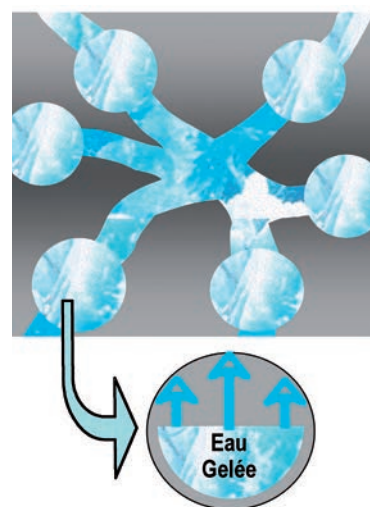


Fig 1.4.2
Bulle d'air entraînée jouant le rôle de vase d'expansion

1.4 Les adjuvants

Règle pratique

1% d'air entraîné dans le béton correspond à une réduction possible d'eau de gâchage d'environ 5 litres par m³ et produit sur l'ouvrabilité le même effet que 10 à 15 kg de fines.

1% d'air entraîné au-delà de 2% correspond environ à une réduction de 5% des résistances à 28 jours.



Fig 1.4.3

Local à adjuvants d'une centrale à béton

Règles générales pour l'utilisation des adjuvants

Si les adjuvants permettent souvent d'obtenir des performances intéressantes, il ne faut jamais perdre de vue qu'ils introduisent une complexité dans le système ciment-eau-granulats. C'est pourquoi tout usage d'adjuvant requiert beaucoup d'attention de la part des exécutants :

- ▶ Le mélange de certains adjuvants peut produire des réactions indésirables. Le risque augmente avec l'utilisation d'adjuvants provenant de producteurs différents.
- ▶ Sauf indication particulière, les adjuvants doivent être introduits dans le malaxeur après l'eau de gâchage, lorsque le mélange est déjà convenablement mouillé.
- ▶ Le stockage des adjuvants doit se faire dans un local protégé du gel et des rayons du soleil. Il faut respecter la date limite d'utilisation et ne pas utiliser des adjuvants dont les phases sont décantées.

Récapitulatif

Effet sur*	Plastifiant	Superplastifiant	Accélérateur	Retardateur	Entraîneur d'air
Consistance	+	++			+
Maintien d'ouvrabilité	++	+	-	+	+
Ségrégation / ressuage	+	+/-	+	-	+
Prise - accélération	-		++	-	
Prise - retard	+		-	++	
Aptitude au pompage	+	+			+/-
Résistance au jeune âge		+	++	-	-
Résistance finale	+	++	-	+	-
Perméabilité	+	+			
Résistance au gel en présence de sels de déverglaçage	+	+			++
Bétonnage par temps froid	-	+	+	-	
Bétonnage par temps chaud	+	+	-	++	

++ effet recherché + effet positif possible - risque d'effets indésirables

Tab 1.4.2
Synthèse de l'effet des adjuvants

* Ce tableau reprend les tendances générales de comportement attendu. Etant donné l'étendue des gammes produits proposées par les fabricants d'adjuvants (principalement pour les superplastifiants) certains effets peuvent être différents.

1.5 Les additions et les ajouts

Généralités

Les additions

Comme vu dans le chapitre ciment, lors sa fabrication, des constituants principaux autres que le clinker peuvent être utilisés et ainsi donner des caractéristiques particulières au ciment (durabilité améliorée, faible chaleur d'hydratation, ...). Ils sont incorporés au ciment en usine par mouture conjointe ou par mélange avec le clinker. On obtient ainsi, non seulement un dosage précis et constant, mais également une répartition homogène de tous les constituants dans le ciment.

Certains de ces constituants peuvent également être utilisés comme addition au ciment et être ajoutés au béton lors de sa fabrication. Il est ainsi possible de choisir librement les proportions du mélange addition – ciment et de les adapter précisément aux exigences de la formule. Cet avantage ne va cependant pas sans quelques inconvénients. D'abord, le stockage séparé des additions nécessite des silos, des équipements de dosage et des contrôles supplémentaires. Ensuite, certaines additions ont tendance à former des grumeaux lors d'un stockage prolongé. Enfin, la confection d'un béton homogène requiert parfois une durée de malaxage plus longue.

La norme NBN EN 206 définit 2 types d'additions :

- ▶ les additions de type I (quasiment inertes)
- ▶ les additions de type II (à caractère hydraulique latent ou pouzzolanique).

Les additions de type II peuvent être prises en compte dans le calcul de la teneur en liant selon le concept du "coefficient k", qui dépend du type d'addition et de sa réactivité chimique (tab 1.5.1).

D'autres concepts sont également décrits dans la norme NBN EN 206 pour tenir compte de l'effet pouzzolanique ou hydraulique latent de certaines additions (voir chapitre 4.11).

Les ajouts

Les ajouts sont des produits incorporés au béton et qui ne sont ni des ciments ni des granulats ni de l'eau de gâchage ni des additions. Il s'agit par exemple de fibres, de produits augmentant la viscosité ou la thixotropie, de colorants... Les ajouts ne peuvent être pris en compte pour le concept du coefficient k.

Propriétés des additions réactives

Cendres volantes

Les propriétés et les avantages des cendres volantes ont été abordés dans le chapitre 1.1.

Les exigences relatives aux cendres volantes pour bétons sont reprises dans la norme NBN EN 450-1.

Les cendres volantes peuvent être utilisées comme addition de type II. Leur coefficient k dépend du ciment utilisé et peut varier de 0 à 0,4.

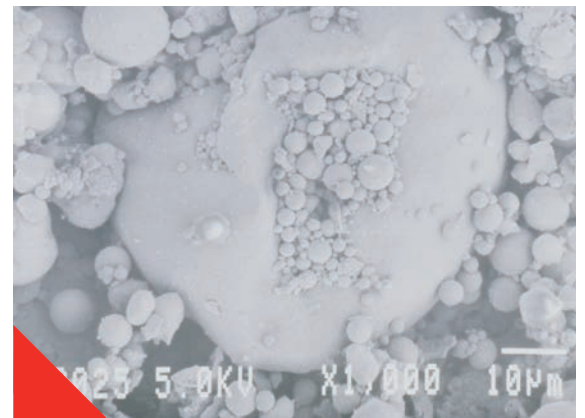


Fig 1.5.1

Cendres volantes, photo prise au microscope électronique à balayage

Laitier moulu

Les propriétés et les avantages du laitier ont été vus dans le chapitre 1.1. Les exigences relatives aux laitier moulu pour béton sont reprises dans la norme NBN EN 15167-1.

Le laitier moulu peut être utilisé comme addition de type II avec un coefficient k moyennant le fait qu'il dispose d'un agrément technique ATG certifié selon les règles définies dans le guide d'agrément technique ATG "Laitier de haut fourneau moulu - LMA". L'utilisation de laitier de haut fourneau moulu est limitée aux seuls bétons à base de CEM I de la classe 42,5 ou supérieure.

1.5 Les additions et les ajouts

Addition	Type de ciment	Coefficient k	Quantité maximale de l'addition à prendre en compte pour le concept k (par rapport au ciment)	Quantité maximale de l'addition permis dans le béton (par rapport au ciment)
Cendres volantes Catégorie A ou B selon NBN EN 450-1	CEM I	0,4	33%	50% ^{a)}
	CEM II/A-S et B-S	0,2	25%	40% ^{a)}
	CEM II/A-LL et B-LL	0	0%	40% ^{a)}
	CEM III/A	0,2	25%	40% ^{a)}
	CEM III/B	0	0%	40% ^{a)}
Fumée de silice classe 1 selon NBN EN 13263-1	CEM I	2,0 ^{b)}	11%	/
Laitier moulu selon NBN EN 15167-1 et avec un ATG "LMA"	CEM I 42,5 N	0,9	45% ^{c)}	70% ^{d)}
	CEM I 42,5 R ou CEM I 52,5 N/R	1,0		

Tab 1.5.1
Prise en compte des additions de type II selon NBN EN 206 et NBN B15-001

^{a)} max. 25% pour cendres volantes de Catégorie B en classe d'environnement EE2-EE3-EE4-ES2-ES4

^{b)} k = 1,0 si E/C > 0,45 en classe d'environnement EE2-EE3-EE4-ES2-ES4

^{c)} max. 20% en classe d'environnement EE2-EE3-EE4-ES2-ES4

^{d)} par rapport à la masse ciment + LMA

Fumée de silice

En raison de son extrême finesse et de sa haute teneur en silice, la fumée de silice (parfois aussi appelée microsilice) possède un indice d'activité pouzzolanique très élevé. Son coefficient k est de 1 ou 2, selon le cas (voir NBN EN 206). La fumée de silice doit répondre aux exigences de la norme NBN EN 13263-1.

Environ 100 fois plus fine que le ciment, elle peut de ce fait occasionner des problèmes de dosage ou d'homogénéité lors de la confection du béton.

La fumée de silice est commercialisée sous deux formes principales :

- ▶ en poudre (allongement nécessaire du temps de malaxage)
- ▶ en suspension aqueuse, facile à doser (attention au gel et à la sédimentation lors du stockage).

Un dosage de 5 à 10% de fumée de silice (rapporté au poids de ciment) améliore notablement certaines propriétés du béton :

- ▶ accroissement de la cohésion et de la capacité de rétention d'eau du béton frais, d'où diminution du risque de ségrégation
- ▶ en béton projeté, importante diminution du rebond
- ▶ forte diminution de la porosité de la pâte de ciment ayant comme conséquence un accroissement important de la durabilité
- ▶ accroissement significatif de la résistance mécanique. L'ajout de fumée de silice permet d'obtenir des bétons à hautes performances.

1.5 Les additions et les ajouts

Propriétés des additions inertes

Les fillers calcaires et siliceux

Les fillers calcaires et siliceux peuvent améliorer la granulométrie du béton dans le cas d'utilisation de sables pauvres en fines lorsqu'on ne dispose pas de sable correcteur.

Ces fillers sont également utilisés pour confectionner des bétons autoplaçants (BAP). Dans ce cas, leur utilisation permet d'augmenter le volume de pâte nécessaire pour obtenir un écoulement des bétons sans vibration.

Ces fillers doivent répondre à la norme NBN EN 12620 et appartiennent aux additions de type I.

Fig 1.5.2
Pigments minéraux utilisés pour colorer le béton



Fig 1.5.3
Pavés en béton coloré

Propriétés des pigments minéraux

Les pigments minéraux (fig 1.5.2) sont utilisés pour colorer le béton et le mortier (fig 1.5.3). En pratique, seuls les pigments à base d'oxydes satisfont aux exigences requises en matière de granulométrie et de stabilité. Les exigences relatives aux pigments pour bétons sont régies par la norme NBN EN 12878.

Les pigments n'ont pas d'effet chimique sur le béton, mais leur besoin en eau relativement élevé nécessite en général une augmentation du facteur eau/ciment (E/C) ou l'emploi simultané d'un superplastifiant.

C'est généralement l'intensité de la teinte recherchée qui conduit au choix du dosage en pigment (quelques pourcent par rapport au poids de ciment), mais les dosages courants et maximums figurent dans la documentation des fournisseurs.

Avant et après la confection de bétons teintés, il faut soigneusement nettoyer le malaxeur, les véhicules de transport, les dispositifs de transbordement et les outils sous peine de colorer les gâchées suivantes. Avec le temps, une certaine atténuation de la teinte des bétons colorés est inévitable, même avec les meilleurs pigments.

La bonne exécution d'ouvrages ou de parties d'ouvrages en béton coloré nécessite une certaine expérience et une attention particulière à :

- ▶ un mélange de béton parfaitement homogène
- ▶ l'utilisation d'un sable clair
- ▶ l'utilisation de ciment clair voire blanc
- ▶ un dosage très précis du colorant

figurent au nombre des conditions de base indispensables pour obtenir des surfaces de béton apparentes claires et de teinte uniforme. En revanche, la couleur du gravier ne joue qu'un rôle mineur.

1.5 Les additions et les ajouts

Propriétés des fibres

Introduction

Il est possible d'ajouter au béton des fibres de nature et type différents. On distingue les fibres pour des usages structurels (armature), qui permettent au béton d'acquiescer une résistance post-fissuration accrue et une plus grande capacité de déformation et les fibres pour d'autres usages (p. ex. résistance au feu, limitation du retrait plastique).

Les fibres sont ajoutées idéalement à la centrale à béton pour une parfaite homogénéité de leur distribution et orientation. On trouvera au chapitre 3.3 plus de détail sur les propriétés des bétons contenant des fibres.

Les fibres métalliques

Lorsqu'elles sont bien réparties, les fibres métalliques (fig 1.5.4 a et b) améliorent certaines propriétés mécaniques du béton, notamment le comportement après première fissuration. Leur utilisation nécessite toutefois les conseils d'un spécialiste, car l'efficacité des fibres d'acier dépend de leur longueur, de leur diamètre et de leur forme qui doivent être choisis en fonction de l'application prévue. Leur dosage oscille en général entre 20 et 70 kg par m³ de béton, mais il peut aussi arriver que cette valeur monte jusqu'à 150 kg/m³. Pour les dosages élevés, l'incorporation des fibres pendant le malaxage nécessite un équipement particulier assurant une répartition homogène, sans agglomérats. L'utilisation de fibres d'acier implique en général un léger surdosage en ciment et en sable et une perte d'ouvrabilité.

Les fibres polymères

Les différents types de fibres polymères (ou synthétiques, fig 1.5.4 c et d) se distinguent par leur composition chimique et les propriétés qui en résultent.

Elles sont employées préférentiellement pour les usages suivants :

- ▶ réduction de la fissuration induite par le retrait précoce
- ▶ réduction du rebond du béton projeté
- ▶ augmentation de la résistance au feu des bétons à hautes ou ultra-hautes performances
- ▶ augmentation de la résistance au jeune âge du béton
- ▶ amélioration du pouvoir de rétention d'eau.

Les fibres polypropylènes (PP) sont employées pour prévenir les fissures dues au retrait précoce. Elles augmentent le pouvoir de rétention d'eau et sont capables d'éviter la fissuration de la pâte de ciment au jeune âge ou de réduire l'ouverture des fissures.

Leur point de fusion se situe à 165°C environ. De ce fait on les emploie aussi pour augmenter la résistance au feu des bétons à haute ou ultra-haute résistance. En cas d'incendie, la fusion des fibres crée un réseau de pores et permet de réduire la pression de la vapeur d'eau qui se crée dans le béton. Ainsi on peut éviter les éclatements du béton.

Les fibres PP sont dosées entre 0,5 et 1 kg/m³ pour la prévention des fissures et entre 2 et 4 kg/m³ pour l'amélioration de la résistance au feu.

Les fibres polyéthylènes (PE) sont employées en tant qu'armatures grâce à leurs bonnes propriétés mécaniques, mais elles sont relativement chères et donc peu utilisées.

Les fibres d'alcool polyvinylique (PVA) ont servi à l'origine pour remplacer des fibres d'amiante. Leurs bonnes propriétés mécaniques sont exploitées pour augmenter la résistance du béton à la traction par flexion.

1.5 Les additions et les ajouts

Fig 1.5.4 a
Fibres
métalliques
longues



Fig 1.5.4 b
Fibres
métalliques
courtes



Fig 1.5.4 c
Fibres
polypropylènes
courtes



Fig 1.5.4 d
Fibres
polypropylènes
longues



Fibres de carbone

Les fibres de carbone sont nettement plus performantes que les fibres en acier en ce qui concerne la résistance à la traction et le module d'élasticité. Leur production est cependant exigeante et onéreuse.

Fibres de verre

Les fibres de verre atteignent des résistances à la traction élevées (1 500 - 4 000 N/mm²) et un module d'élasticité qui dépasse celui du béton de deux à trois fois.

Le verre normal n'est pas résistant dans le milieu alcalin du béton. Par l'addition de dioxyde de zirconium et un revêtement particulier, il est possible d'augmenter la résistance aux alcalins des fibres de verre, de manière à ce qu'elles conservent leurs propriétés à plus long terme dans le béton. La sensibilité du verre vis à vis des endommagements de surface, comme il peut s'en produire lors du malaxage, réduit théoriquement leur très haute résistance initiale.

Selon l'usage prévu on incorpore au béton entre 0,5 et 15 kg/m³ de fibres de verre.

Du béton frais au béton durci

2.1

Classification des bétons

2.2

Ouvrabilité et consistance

2.3

Composition et formulation du béton

2.4

Fabrication et transport

2.5

Coffrage

2.6

Pompage du béton

2.7

Mise en place et compactage

2.8

Cure

2.9

Bétonnage par temps chaud

2.10

Bétonnage par temps froid



2.1 Classification des bétons

Introduction

La norme béton NBN EN 206 et le complément national NBN B15-001 sont la base normative pour la spécification de tous les bétons de structure.

Le béton peut être spécifié soit comme béton à propriétés spécifiées (BPS) soit comme béton à composition prescrite (BCP). En fonction de la spécification, les responsabilités des parties impliquées diffèrent.

Dans le cas du béton à propriétés spécifiées (BPS), le producteur de béton se porte garant du respect de l'ensemble des performances spécifiées. Le producteur doit mettre en place un système de gestion de la qualité qui comprend des contrôles sur les matières premières, des vérifications de paramètres de production et un auto-contrôle de conformité des produits finis. Seul le BPS peut faire l'objet de la certification BENOR.



Cette certification, validée par des contrôles réalisés par une tierce partie, démontre la capacité du producteur à satisfaire aux exigences demandées et élimine généralement la nécessité de faire des contrôles sur chantier (souvent réalisés dans des conditions non-idéales pour la confection et la conservation des éprouvettes). L'auteur de projet peut toutefois prévoir des contrôles sur la mise en œuvre, la finition et la protection du béton frais.

Dans le cas du béton à composition prescrite (BCP), il incombe au prescripteur de vérifier que la spécification répond aux exigences générales de la norme NBN EN 206 et que la composition prescrite permet d'obtenir les performances recherchées. Pour le béton à composition prescrite, la garantie de la centrale à béton porte uniquement sur le respect de la composition prescrite.

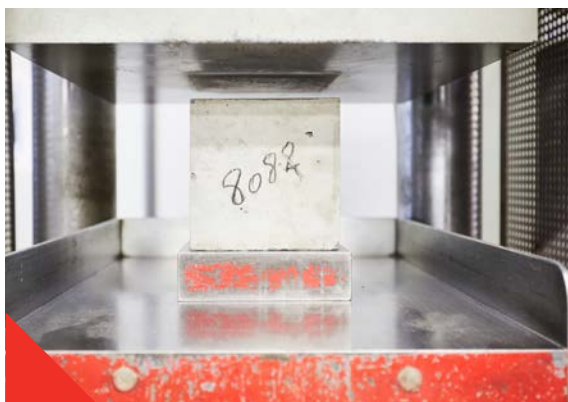


Fig 2.11
Essai de résistance à la compression sur cube

Spécification du BPS

La spécification du béton à propriétés spécifiées (BPS) se fait selon la norme NBN EN 206 et comprend 4 "données de base":

- ▶ classe de résistance à la compression
- ▶ domaine d'utilisation et classes d'exposition ou classes d'environnement
- ▶ dimension maximale des granulats
- ▶ consistance.

Celles-ci sont éventuellement complétées par une ou plusieurs "données complémentaires".

Résistance à la compression

Le béton est tout d'abord spécifié selon sa résistance à la compression, exprimée en N/mm^2 .

Les classes de résistances sont toujours désignées par la lettre "C", de l'anglais "Concrete", suivie de 2 valeurs correspondant aux résistances mesurées respectivement sur éprouvettes cylindriques et cubiques.

Exemple : **C 30/37**

C indique qu'il s'agit de béton de masse volumique normale ou de béton lourd,

30 désigne la résistance caractéristique minimale à la compression mesurée sur cylindre ($\varnothing = 150 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$),

37 désigne la résistance caractéristique minimale à la compression mesurée sur cube de 150 mm d'arête.

La norme européenne définit 16 classes de résistance entre C8/10 et C100/115 (tab 2.1.1).

Si la masse volumique du béton est inférieure à 2000 kg/m^3 , on parle de béton léger. A ce moment, cette classification commence par "LC", de l'anglais "Lightweight Concrete", avec 14 classes de résistance variant de LC8/9 à LC80/88.

2.1 Classification des bétons

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres $f_{ck, cyl}$ (N/mm ²)	Résistance caractéristique minimale sur cubes $f_{ck, cube}$ (N/mm ²)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Tab 2.1.1
Classes de résistance à la compression. En encadré, les classes de résistance les plus courantes

Domaine d'utilisation et classes d'exposition ou d'environnement

Domaine d'utilisation

Etant donné que les exigences de durabilité sont différentes en fonction du domaine d'utilisation, il faut indiquer si le béton est non-armé (BNA), armé (BA) ou précontraint (BP).

Teneur en chlorures

En fonction du domaine d'utilisation, la teneur en chlorures du béton doit être limitée afin de se prémunir du risque de corrosion induite par les chlorures. En Belgique, les limites sont les suivantes :

- ▶ 1,00% pour le BNA
- ▶ 0,40% pour le BA
- ▶ 0,20% pour le BP.

La teneur en chlorures du béton est calculée sur la base de la quantité de chlorures apportée par chacun des constituants, rapportée à la masse de liant. À cet effet, on peut partir d'une teneur maximale autorisée dans les normes produits ou d'une teneur indiquée par le producteur.

2.1 Classification des bétons

Classes d'exposition et classes d'environnement

La norme NBN EN 206 définit 6 catégories d'agressions potentielles, qui sont subdivisées en 3 ou 4 classes selon l'agressivité. Au total la norme définit ainsi 18 classes d'exposition "X". Ces classes sont détaillées et complétées d'exemples au tableau 2.1.2.

L'auteur du projet peut combiner plusieurs classes en fonction de l'exposition prévue pour l'élément en béton.

Pour chaque classe d'exposition, la norme européenne et son complément national belge spécifient des exigences de formulation du béton, afin de garantir que celui-ci résiste aux agressions associées :

- ▶ classe de résistance minimale
- ▶ dosage minimal en ciment
- ▶ rapport E/C maximal
- ▶ éventuellement teneur en air minimale.

En Belgique, la norme NBN B15-001 introduit la notion de classes d'environnement "E". Treize classes d'environnement courants y sont définies et s'appliquent généralement aux pratiques belges en matière de béton. L'auteur du projet est invité à n'en choisir qu'une seule (sauf pour les classes EA qui sont à combiner avec une classe EE ou ES).

La norme belge introduit également la notion de "Types de béton" pour représenter facilement l'ensemble des exigences minimales. Le type de béton est noté sous la forme T(x,xx) avec x,xx le rapport E/C maximal, éventuellement suivi de la lettre A (de l'anglais "Air") lorsqu'une teneur en air minimale est d'application.

Le tableau 2.1.3 reprend, pour les classes E, les classes X correspondantes et les types de béton associés, ainsi que les exigences minimales de composition. Des exemples types de classe d'environnement sont donnés à la figure 2.1.2

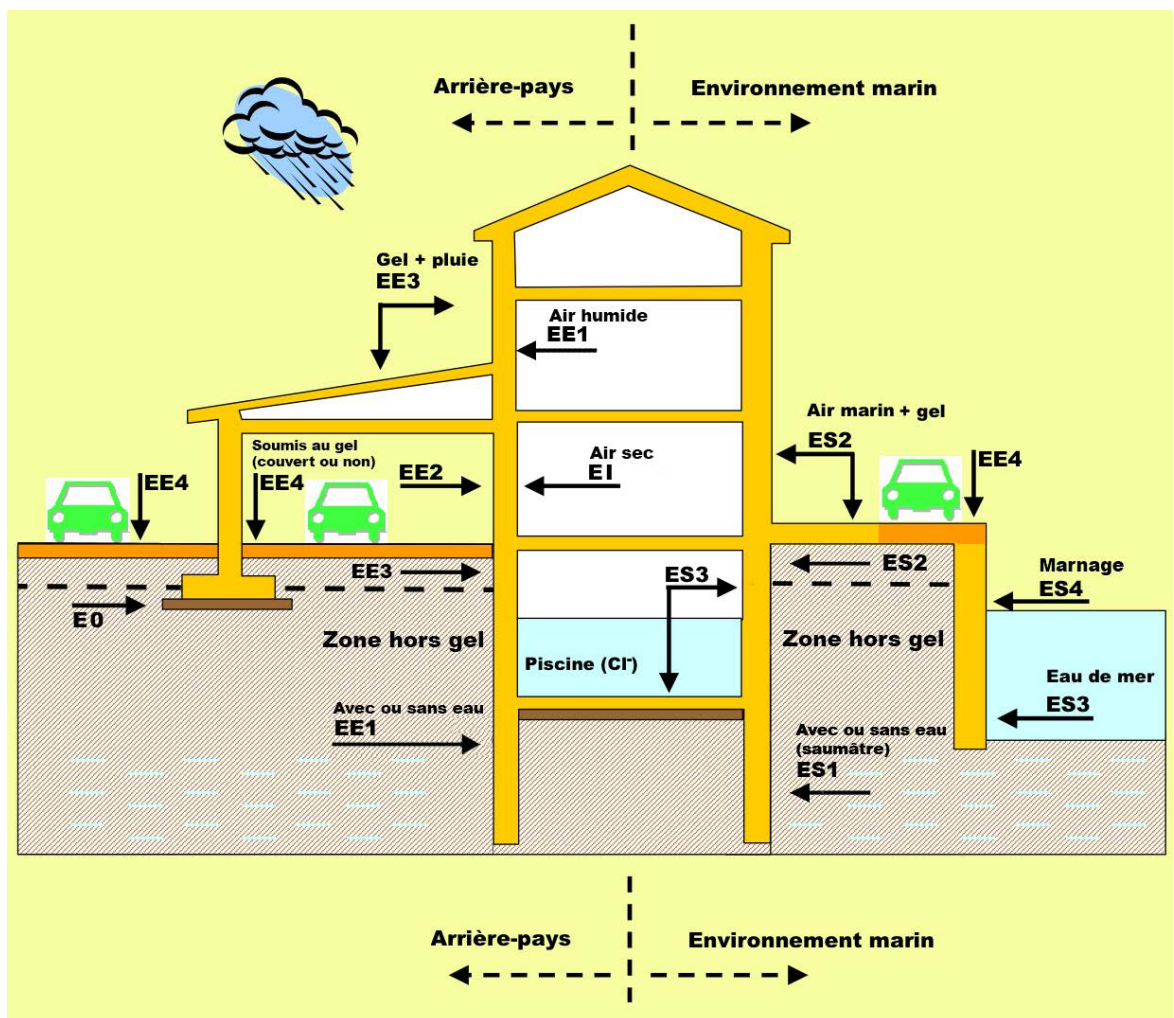


Fig 2.1.2
Exemples de classes d'environnement courantes

	Désignation de la classe	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
Aucun risque	1. Aucun risque de corrosion ni d'attaque		
	X0	Béton non armé ou sans pièces métalliques noyées : toutes les expositions sauf en cas de gel-dégel, d'abrasion ou d'attaque chimique	
		Pour le béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : très sec ^{a)}	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible
Actions à risque pour l'armature	2. Corrosion par carbonatation Lorsque le béton armé ou contenant des pièces métalliques noyées est exposé à l'air et à l'humidité, les classes d'exposition données ci-après sont d'application :		
	XC1	Sec ou humide en permanence	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible Béton immergé dans de l'eau en permanence
	XC2	Humide, rarement sec	Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau Un grand nombre de fondations
	XC3	Humidité modérée	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé Béton extérieur abrité de la pluie
	XC4	Alternance d'humidité et de séchage	Surfaces soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2
	3. Corrosion par les chlorures, ayant une origine autre que marine Lorsque le béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact d'une eau contenant des chlorures d'origine autre que marine, y compris ceux des sels de déverglaçage, les classes d'expositions données ci-après sont d'application :		
	XD1	Humidité modérée	Surfaces de bétons exposées à des chlorures transportées par voie aérienne
	XD2	Humide, rarement sec	Piscines Béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures
	XD3	Alternance d'humidité et de séchage	Eléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures Revêtements extérieurs Dalles de parc de stationnement de véhicules
	4. Corrosion par les chlorures de l'eau de mer Lorsque le béton armé ou contenant des pièces métalliques noyées est soumis au contact des chlorures de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre ^{b)} ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin, les classes d'expositions données ci-après sont d'application :		
	XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	Structures sur ou à proximité d'une côte
	XS2	Immergé en permanence dans l'eau de mer ou l'eau saumâtre ^{b)}	Eléments de structures marines
	XS3	Zones de marées, zones soumises à des projections ou à des embruns	Eléments de structures marines
Actions à risque pour le béton	5. Attaque par le gel-dégel avec ou sans agent de déverglaçage Lorsque le béton est soumis au contact à une attaque significative due à des cycles de gel-dégel alors qu'il est mouillé, les classes d'expositions données ci-après sont d'application :		
	XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	Surfaces de bétons protégées contre eau de pluie et eau projetée
	XF2	Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons des ouvrages routiers exposées au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage
	XF3	Forte saturation en eau, sans agent de déverglaçage	Surfaces de bétons exposées au gel et à l'eau de pluie et/ou eau projetée
	XF4	Forte saturation en eau, avec agent de déverglaçage ou eau de mer	Routes et tabliers de ponts exposés aux agents de déverglaçage Surfaces de bétons directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel
	6. Attaques chimiques Lorsque le béton est exposé aux attaques chimiques, se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface ou les eaux souterraines, comme indiqué au tableau 2 de la NBN EN 206:2013 + A1:2016, les classes d'expositions données ci-après sont d'application :		
	XA1	Environnement à faible agressivité chimique Béton en contact avec l'eau de mer ou l'eau saumâtre ^{b)}	
	XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée	
	XA3	Environnement à forte agressivité chimique	

^{a)} note : un environnement très sec ne se trouve pas ou très rarement, en Belgique

^{b)} eau saumâtre : eau légèrement salée peu profonde qui se rencontre principalement sur les plaines côtières, dans la zone des polders de la région de Dixsmude, dans quelques polders de Flandre Orientale et aux alentours du port d'Anvers pour lesquelles l'altitude de 6 m est définie comme la limite jusqu'à laquelle ces régions s'étendent

Tab 2.1.2
Classes d'exposition selon les normes NBN EN 206 et NBN B15-001

Classe d'environnement	Description	Exemples informatifs où la classe d'environnement peut se produire
E0	Environnement non agressif	
E1	Environnement intérieur sec	Intérieur des habitations et bureaux avec un climat intérieur normal
EE	Environnement intérieur humide ou extérieur	
EE1	Pas de gel	Fondations sous la limite du gel, bétons immergés en permanence
EE2	Gel, pas de contact avec eau de pluie et eau projetée	Vide sanitaire, passage ouvert dans le bâtiment
EE3	Gel, contact avec eau de pluie et/ou eau projetée	Mur extérieur ou surfaces extérieures horizontales en contact avec la pluie et/ou eau projetée
EE4	Gel et agents sels de déverglaçage (présence d'eau contenant des agents de déverglaçage provenant soit de sa fonte sur place, soit de projections, soit de ruissellement)	Éléments d'infrastructures routières, sol des parkings soumis au gel (couvert ou non) ou surfaces extérieures en contact avec des sels de déverglaçage
ES	Environnement marin	
Pas de contact avec de l'eau de mer mais bien avec de l'air marin (jusqu'à 3 km de la côte) et/ou avec de l'eau saumâtre		
ES1	Pas de gel	Fondations sous la limite du gel en contact avec de l'eau saumâtre
ES2	Gel	Mur extérieur ou surfaces extérieures horizontales en contact avec la pluie en zone côtière
Contact avec de l'eau de mer		
ES3	Immergé	
ES4	Zone de marées et d'éclaboussures	Murs de quai
EA	Environnement chimiquement agressif	
EA1	Environnement chimiquement peu agressif suivant le tableau 2 de la NBN EN 206 : 2013 +A1 : 2016	
EA2	Environnement chimiquement moyennement agressif suivant le tableau 2 de la NBN EN 206 : 2013 +A1 : 2016	
EA3	Environnement chimiquement très agressif suivant le tableau 2 de la NBN EN 206 : 2013 +A1 : 2016	

(1) Un type de béton T(1,50) peut être utilisé exceptionnellement dans des applications de béton non armé telles par exemple les bétons de propreté pour fondations.

(2) La résistance au gel de granulats de dimension nominale $D \leq 4$ mm est considérée comme satisfaisante ; celle de granulats de dimension nominale

$D > 4$ mm (à l'exception des granulats légers) est considérée comme satisfaisante si :

- ou bien, l'absorption d'eau suivant la norme NBN EN 1097-6:2013 est plus petite ou égale à 1,0% ;
- ou bien, le coefficient LA déterminé suivant la norme NBN EN 1097-2:2010 est plus petit ou égal à 25 ;
- ou bien, en cas d'exposition aux classes d'exposition de XF1 jusqu'à XF3 compris (classes d'environnement EE2, EE3 ou ES2):
 - soit le granulat, après un essai suivant la norme NBN EN 1367-1:2007 appartient à la classe F_4 suivant la norme NBN EN 12620 ;
 - soit le granulat, après un essai suivant la norme NBN EN 1367-2:2010 appartient à la classe MS_{35} suivant la norme NBN EN 12620 ;
- ou bien, en cas d'exposition aux classes d'exposition XF4 (classes d'environnement EE4 ou ES4):
 - soit le granulat, après un essai suivant la norme NBN EN 1367-1 appartient à la classe F_2 suivant la norme NBN EN 12620 ;
 - soit le granulat, après un essai suivant la norme NBN EN 1367-2 appartient à la classe MS_{25} suivant la norme NBN EN 12620.

Béton non armé (BNA)							Béton armé (BA) et précontraint (BP)					
Classes X correspondantes	Type de béton	Rc min	E/C max	C min	Notes	Classes X correspondantes	Type de béton	Rc min	E/C max	C min	Notes	
X0	T(1,00)	C12/15	1,00	-	(1)	Pas d'application						
X0	T(1,00)	C12/15	1,00	-		XC1	T(0,65)	C16/20	0,65	260		
X0	T(1,00)	C12/15	1,00	-		XC2	T(0,60)	C20/25	0,60	280		
XF1	T(0,55)	C25/30	0,55	300	(2)	XC3, XF1	T(0,55)	C25/30	0,55	300	(2)	
XF3	T(0,50) ou T(0,55)A	C30/37 --- C20/25	0,50 --- 0,55	320 --- 300	(2) (3)	XC4, XF3	T(0,50) ou T(0,50)A	C30/37 --- C25/30	0,50 --- 0,50	320 --- 320	(2) (3)	
XF4	T(0,45) ou T(0,50)A	C35/45 --- C25/30	0,45 --- 0,50	340 --- 320	(2) (3)	XC4, XD3, XF4	T(0,45) ou T(0,45)A	C35/45 --- C30/37	0,45 --- 0,45	340 --- 340	(2) (3)	
XA1	T(0,60)	C20/25	0,60	280		XC2, XS2, XA1	T(0,50)	C30/37	0,50	320		
XF3	T(0,50) ou T(0,55)A	C30/37 --- C20/25	0,50 --- 0,55	320 --- 300	(2) (3)	XC4, XS1, XF3	T(0,50) ou T(0,50)A	C30/37 --- C25/30	0,50 --- 0,50	320 --- 320	(2) (3)	
XA1	T(0,55)	C25/30	0,55	300		XC1, XS2, XA1	T(0,45)	C35/45	0,45	340		
XF4, XA1	T(0,45) ou T(0,50)A	C35/45 --- C25/30	0,45 --- 0,50	340 --- 320	(2) (3)	XC4, XS3, XF4, XA1	T(0,45) ou T(0,45)A	C35/45 --- C30/37	0,45 --- 0,45	340 --- 340	(2) (3)	
XA1	T(0,55)	C25/30	0,55	300		XA1	T(0,55)	C25/30	0,55	300		
XA2	T(0,50)	C30/37	0,50	320	(4)	XA2	T(0,50)	C30/37	0,50	320	(4)	
XA3	T(0,45)	C35/45	0,45	340	(4)	XA3	T(0,45)	C35/45	0,45	340	(4)	

(3) Béton sans air entraîné sauf si imposé par le prescripteur

(4) Un ciment à haute résistance aux sulfates (conforme à la norme NBN B12-108) ou une combinaison de ciment et de laitier granulé de haut-fourneau moulu conforme à l'ATG "Laitier de haut-fourneau moulu - LMA" comprenant au moins 66% m/m de LMA au regard de la quantité totale de ciment + LMA doit être utilisé si la teneur en sulfate > 600 mg/kg dans l'eau et > 3 000 mg/kg ou 2 000 mg/kg (voir note c du tableau 2 de la norme NBN EN 206:2013 + A1:2016) dans le sol. Dans le cas du LMA, la haute résistance aux sulfates doit être démontrée suivant les règles définies dans l'Agrément Technique (ATG) pour les laitiers moulus, couverte par un ATG certifié et référant à la présente norme.

Tab 2.1.3
Classes d'environnement et spécifications minimales du béton selon la NBN B15-001

2.1 Classification des bétons

Dimension maximale du granulat

Un béton peut également être classifié par la dimension supérieure du plus gros granulat (D_{max}).

Il est conseillé de ne pas sélectionner un D_{max} supérieur à :

- ▶ $1/5 a$ avec a = la distance entre les parois du coffrage ou l'épaisseur de la dalle
- ▶ $3/4 b$ avec b = l'écartement entre les barres d'armature
- ▶ $1,5 b'$ avec b' = l'écartement entre les barres d'armature à l'endroit des soudures d'armature
- ▶ c avec c = l'épaisseur d'enrobage
- ▶ $2/5 e$ avec e = l'épaisseur de la couche de compression d'un plancher composite.

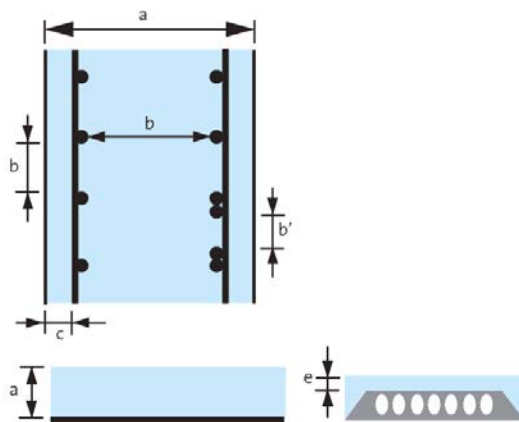


Fig 2.1.3

Dimensions à prendre en compte pour le choix du D_{max}

Données complémentaires

L'auteur de projet ou l'entreprise peuvent compléter la spécification du béton avec des données complémentaires, qui pourront faire l'objet d'échanges avec le producteur du béton, dont quelques exemples (non-exhaustifs) sont :

- ▶ Exigences liées aux constituants :
 - type de ciment (p.ex. ciment SR en cas de présence de sulfates)
 - type de granulats (calcaire, granulats recyclés, ...)
 - béton à air entraîné
 - ajout de fibres (type, quantité, ...)
 - conformité à l'annexe D de la NBN EN 206 (béton pour ouvrages géotechniques spéciaux)
- ▶ Exigences sur le béton frais :
 - durée de maintien d'ouvrabilité
 - température minimale ou maximale du béton frais
 - dégagement de chaleur maximal
- ▶ Exigences liées à la mise en œuvre :
 - longueur maximale de pompage
- ▶ Exigences sur le béton durci :
 - classe d'absorption d'eau par immersion "WAI"
 - prévention de la réaction alcali-silice (RAS).

Classe de consistance

La consistance est caractérisée par différents essais de consistance : l'affaissement (S) (fig 2.1.4), le serrage (C) ou l'étalement (F). Il n'y a pas de liens directs entre les classes définies par chaque essai.



Classe S1 - Rigide ou ferme



Classe S2 - Semi-plastique



Classe S3 - Plastique



Classe S4 - Fluide



Classe S5 - Très fluide

Fig 2.1.4

Différentes classes de consistance de béton (slump test)

2.2 Ouvrabilité et consistance

Importance de l'ouvrabilité

Une bonne ouvrabilité facilite les transbordements et la mise en œuvre du béton, c'est-à-dire sa mise en place dans les coffrages et son compactage. Elle influence aussi favorablement le coût de ces opérations. Quant au béton durci, sa résistance et surtout sa durabilité dépendent directement d'une bonne mise en place, de l'enrobage parfait des armatures et d'un compactage soigné, toutes qualités qui ne peuvent être obtenues qu'avec une bonne ouvrabilité.

Définition de l'ouvrabilité et de la consistance

Le concept d'ouvrabilité du béton ne répond pas à une définition précise. Il englobe plusieurs propriétés comme la consistance, la cohésion, la tendance à la ségrégation, la pompabilité, la viscosité et la thixotropie ainsi que leur évolution dans le temps. Considérée sur le plan scientifique comme résultant du frottement interne de l'ensemble des particules solides suspendues dans le béton, la consistance peut être évaluée dans la pratique par différentes méthodes de mesure.

Méthodes de mesure de la consistance

En Belgique, on utilise couramment deux méthodes pour évaluer la consistance du béton. Ce sont les mesures de l'affaissement ("slump") et de l'étalement ("flow"). Ces deux méthodes (fig. 2.2.1 et 2.2.2) sont limitées à certains domaines de consistance.

Classe de consistance

Le tableau 2.2.1 donne les classes d'affaissement et d'étalement définies par la norme NBN EN 206 et indique également la méthode de mesure la plus appropriée pour chaque domaine.

Des indications détaillées pour la conduite de ces essais se trouvent dans les normes NBN EN 12350-2 et NBN EN 12350-5.

Contrôle de la consistance en début de bétonnage

Des valeurs de consistance semblables pour des bétons provenant d'installations différentes ne garantissent pas une ouvrabilité rigoureusement identique. Les résultats peuvent être influencés par le choix des constituants et par le malaxeur utilisé. Il est donc indiqué de vérifier l'ouvrabilité au début du bétonnage et de corriger la consistance si nécessaire. Par la suite, lors d'un éventuel changement dans la fourniture des granulats, il faudra contrôler la valeur de la consistance prescrite pour l'ouvrage en cours.

Domaine de consistance	Affaissement (Slump) - S		Etalement (Flow) - F	
	Classe	Mesure en mm	Classe	Mesure en mm
Rigide ou ferme	S1	10 à 40	F1 ⁽¹⁾	(≤ 340)
Semi-plastique	S2	50 à 90	F2	350 à 410
Plastique	S3	100 à 150	F3	420 à 480
Fluide	S4	160 à 210	F4	490 à 550
Très fluide	S5 ⁽¹⁾	(≥ 220)	F5	560 à 620
			F6 ⁽¹⁾	(≥ 630)

(1) mesure non appropriée pour le domaine de consistance

Tab 2.2.1
Classes
de consistance

2.2 Ouvrabilité et consistance



Fig 2.2.1
Mesure du slump au cône d'Abrams



Fig 2.2.2
Mesure du flow à la table à chocs



Les superplastifiants améliorent la consistance

Grâce aux superplastifiants, il est possible de confectonner des bétons ayant un rapport E/C conforme aux exigences, tout en offrant une consistance élevée (S4 à S5), particulièrement appréciée pour une mise en place aisée. Ces bétons s'écoulent aisément dans les coffrages et entre les armatures, se compactent facilement, permettant d'obtenir des bétons durcis de qualité et durabilité élevées.

L'amélioration de la consistance ne devrait jamais être obtenue par un apport d'eau ultérieur.

Influence des autres caractéristiques du béton sur la consistance

En dehors des adjuvants, d'autres facteurs ont une influence sur la consistance. La modification de l'un ou de plusieurs d'entre eux n'agit pas uniquement sur la consistance, mais également sur la résistance (et sur bien d'autres propriétés) du béton, souvent en sens opposé. Le tableau 2.2.2 montre les effets auxquels on peut s'attendre sur la consistance et la résistance, lorsque l'on fait varier certains paramètres de base du béton.

Dès la fin du malaxage, l'ouvrabilité change

Il est inévitable qu'à partir de la fin du malaxage la consistance évolue, ce qui se traduit par une lente perte de l'ouvrabilité.

Le "délai de mise en œuvre garanti" mentionné sur le bon de livraison (généralement 100' pour du CEM I et CEM II et 120' pour du CEM III et CEM V) indique le temps pendant lequel la prise du béton ne démarre en aucun cas.

Ceci ne signifie pas que la consistance (fluidité) n'évolue pas pendant ce temps. La figure 2.2.3 montre un comportement normal de béton durant le transport et le déchargement. Le béton doit rester au moins 30 minutes après le début du déchargement dans la même classe (S4 dans ce cas). Le béton est plus sensible à une perte d'ouvrabilité par temps chaud, tout comme dans le cas d'un ciment à prise plutôt rapide.

2.2 Ouvrabilité et consistance

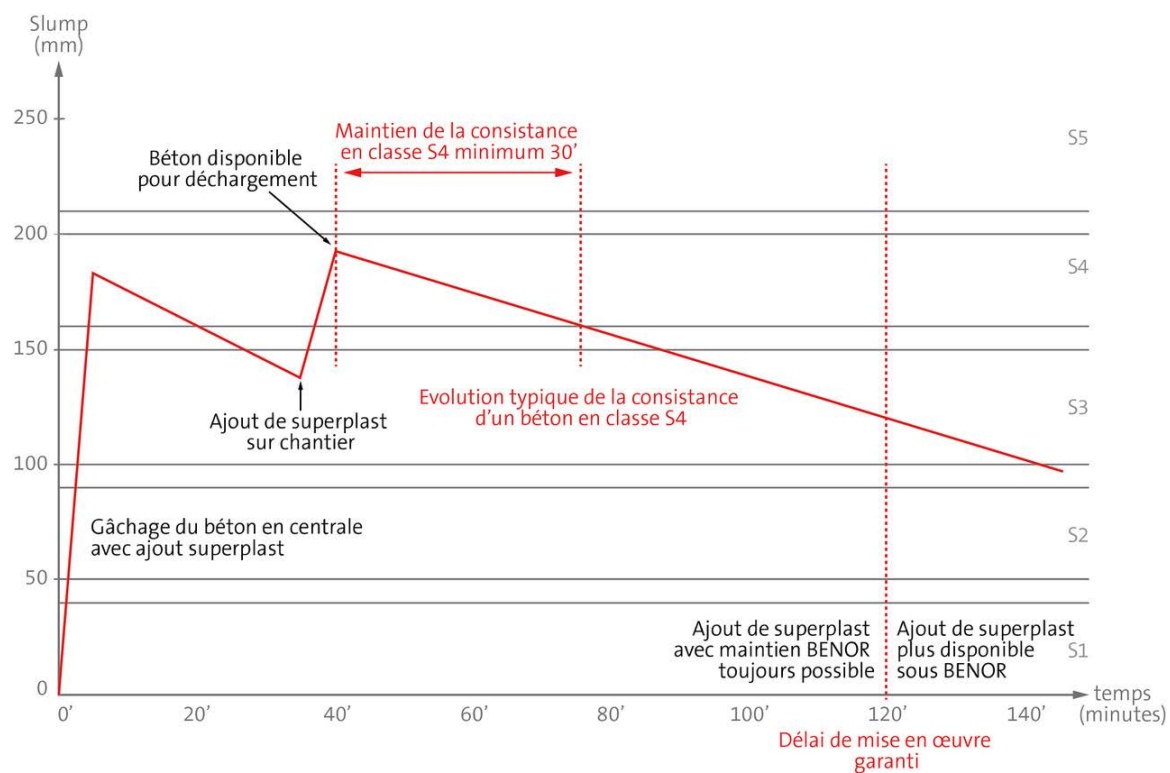


Fig 2.2.3
Exemple d'évolution de la consistance et délai de mise en œuvre garanti d'un béton

Variation	Effet sur la consistance	Effet sur la résistance à la compression
Amélioration de la continuité de la granulométrie	+	=
Augmentation de la teneur en granulats roulés	+	-
Augmentation de la teneur en granulats concassés	-	+
Augmentation de l'eau de gâchage (à C constant)	++	-
Augmentation de l'eau de gâchage (à E/C constant)	++	=
Élévation de la température du béton frais	-	-
Utilisation d'un superplastifiant	++	+
Utilisation d'un entraîneur d'air	+	-
Utilisation d'un retardateur	=	+
++ effet très favorable + effet favorable - effet défavorable = pas d'effet notable		

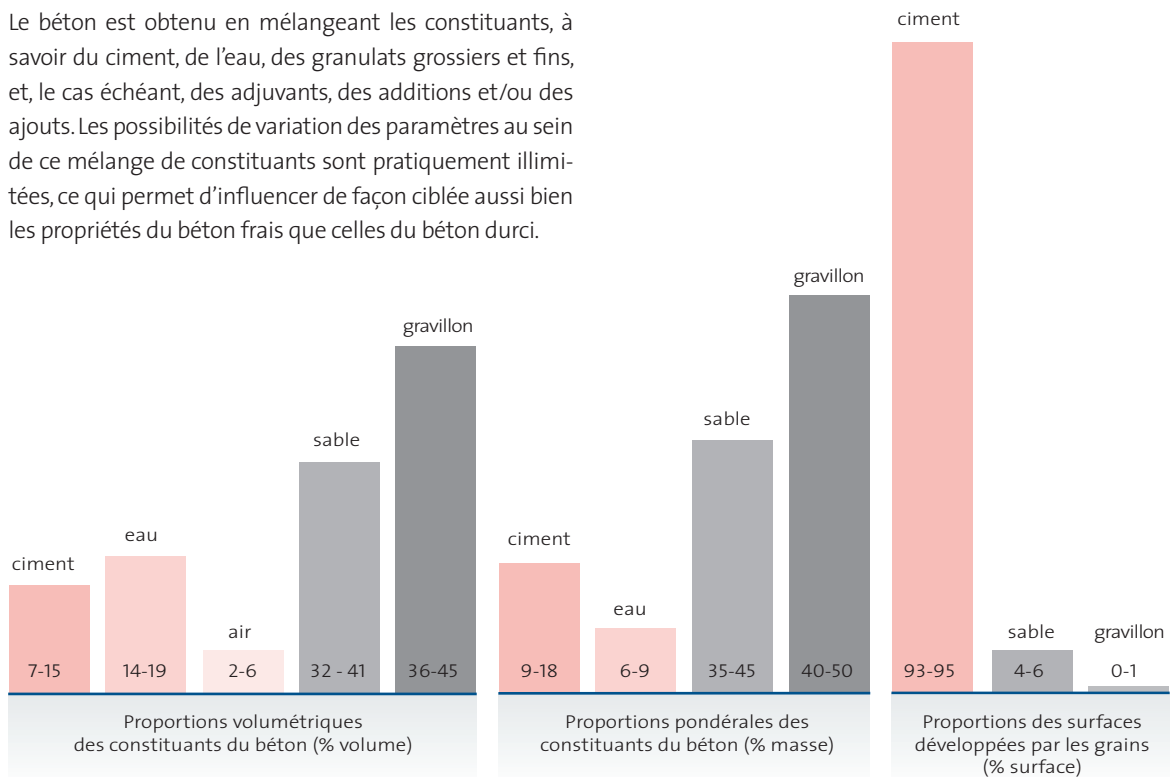
Tab 2.2.2
Influence des paramètres de formulation sur la consistance et les résistances

2.3 Composition et formulation du béton

Introduction

Le béton est obtenu en mélangeant les constituants, à savoir du ciment, de l'eau, des granulats grossiers et fins, et, le cas échéant, des adjuvants, des additions et/ou des ajouts. Les possibilités de variation des paramètres au sein de ce mélange de constituants sont pratiquement illimitées, ce qui permet d'influencer de façon ciblée aussi bien les propriétés du béton frais que celles du béton durci.

Fig 2.3.1
Importance relative des constituants du béton



Cadre normatif

En plus de la classification du béton, la norme européenne NBN EN 206 définit des exigences minimales pour la composition du béton, ceci afin de garantir que le béton résiste aux agressions environnementales.

La plupart des pays européens ont complété les prescriptions de la norme européenne par des spécifications nationales.

En Belgique, ces prescriptions sont reprises dans la norme NBN B 15-001, qui complète la NBN EN 206 par des exigences normatives établies en fonction de l'expérience belge et par des commentaires informatifs (voir chapitre 2.1).

Comme expliqué au chapitre 2.1, la norme belge a introduit des classes d'environnement qui remplacent les classes d'exposition de la norme européenne et font le lien entre les classes d'environnement du béton et les exigences au niveau de la composition. Cette composition est entre autre définie par sa quantité minimale de ciment ou de liant équivalent, par la quantité d'eau (efficace) et par la classe de résistance du béton (tab 2.1.3).

2.3 Composition et formulation du béton

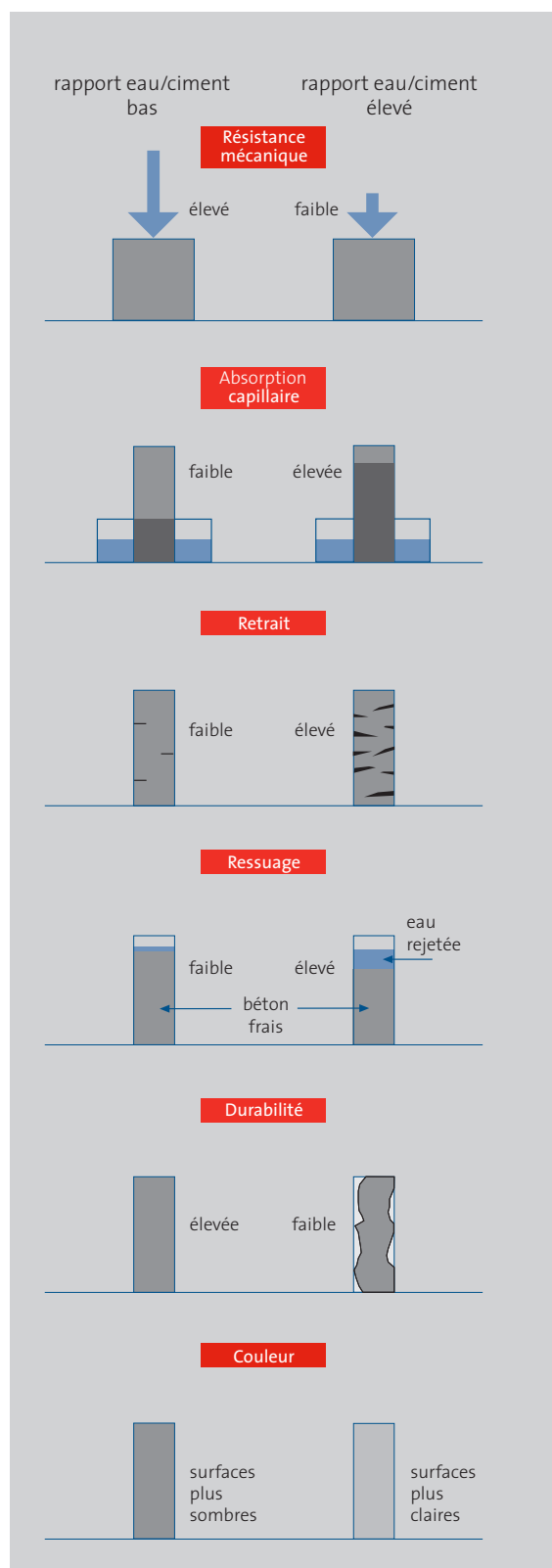


Fig 2.3.2
Influence du rapport E/C
sur les propriétés du béton

Importance du rapport E/C

Le rapport eau/ciment est l'un des facteurs clés qui influencent de manière prépondérante l'ensemble des propriétés du béton (fig 2.3.2).

Il est donc logique que, à travers le choix approprié de la classe d'environnement, le prescripteur limite le rapport E/C.

Dans la pratique, lors de la fabrication du béton, on maîtrise le E/C grâce à la connaissance de la teneur en eau totale du mélange. Celle-ci se fait principalement grâce au suivi de l'humidité des constituants - via une mesure en continu par une sonde ou via une mesure ponctuelle mais régulière par séchage (poêle, four, micro-ondes) - et à la vérification régulière de la bascule à eau.

On se base également sur la mesure de la consistance. Pour une composition donnée, celle-ci est en étroite relation avec la teneur en eau. Avec l'expérience, cette méthode donne une approximation suffisante du résultat mais ne remplace pas une mesure réelle de la teneur en eau du béton qui doit se faire régulièrement, notamment dans le cadre de la certification BENOR des bétons.

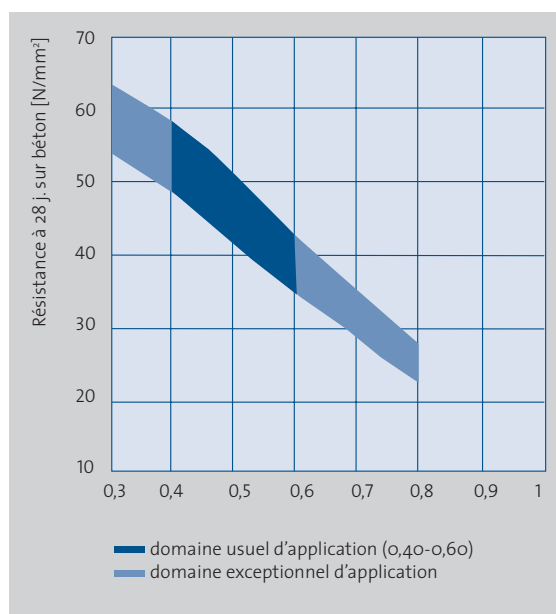


Fig 2.3.3
Exemple d'influence du rapport E/C sur la résistance à la compression

2.3 Composition et formulation du béton

Choix du rapport E/C

Le choix du rapport E/C dépend des 2 éléments principaux suivants :

- ▶ La classe d'environnement : la norme béton NBN B15-001 définit, pour chaque classe d'environnement, un E/C maximum (tab 2.1.3). Le producteur prendra encore une petite marge de l'ordre de 0,01 ou 0,02 afin de tenir compte de la variation de ce paramètre.
- ▶ Les contraintes mécaniques auxquelles sera soumis le béton durci. Comme le montre un exemple en figure 2.3.3, la résistance du béton est fortement influencée par le E/C. En connaissant la résistance moyenne visée du béton, ainsi que la résistance moyenne du ciment, on peut calculer le E/C maximal du béton à l'aide de formules empiriques, la formule de Walz par exemple :

$$f_{cm,28} = 0,46 \cdot f_{cm,28,ce} \cdot (C/E - 0,06)$$

Avec :

$f_{cm,28}$	résistance moyenne* du béton à 28j
$f_{cm,28,ce}$	résistance moyenne du ciment à 28j
C/E	inverse du rapport E/C

**Le producteur de béton visera une moyenne plus élevée que la valeur caractéristique de la classe de résistance, pour tenir compte de la dispersion des résultats.*

Le E/C maximal retenu sera la plus petite valeur entre ces deux E/C. Pour le béton prêt à l'emploi, le E/C lié à la classe d'environnement sera déterminant dans la majorité des cas.

Pour des chantiers spécifiques, le rapport E/C peut être prescrit de manière plus exigeante. Sur ces projets faisant état d'exigences particulières de cet ordre il sera également utile de prendre des précautions supplémentaires lors de la mise en œuvre.

Eau efficace :

Dans le rapport E/C on tient compte de l'eau efficace. Le concept d'eau efficace est défini comme suit :

- ▶ eau efficace = eau totale – eau absorbée par les granulats
- ▶ eau totale = eau de gâchage + eau contenue dans (eau absorbée) et à la surface (humidité de surface) des granulats + eau des adjuvants et des ajouts liquides.

Dosage en eau et en ciment

Un dosage en ciment suffisant protège efficacement les armatures contre la corrosion. Cette protection est assurée par la forte alcalinité de l'hydroxyde de calcium qui se forme pendant la prise et par une faible porosité du béton.

Pour que ces deux conditions soient toujours remplies, la norme NBN B15-001 prescrit des teneurs en ciment minimales en fonction de l'environnement spécifique. Par exemple, le béton armé mis en place dans un environnement de type EE3 (environnement extérieur, exposé à la pluie et au gel), doit contenir minimum 320 kg de ciment par m³ de béton fini.

Le producteur de béton choisira souvent une quantité de ciment ou liant équivalent (voir ci-après) plus importante. Ceci peut être le cas quand le producteur de béton veut augmenter la teneur en fines du béton. Généralement, cela est fait dans les situations où la combinaison du C_{min} et E/C_{max} mènerait à une teneur en eau inférieure à la quantité nécessaire pour assurer le "mouillage" du béton et éviter une viscosité trop importante de celui-ci. Cette quantité peut être calculée à base du "besoin en eau" des différents composants du béton ou bien estimée sur base d'expérience (dans le secteur du béton prêt à l'emploi des valeurs de 170 à 175 litres/m³ sont souvent appliquées).

Liant équivalent

Si en plus du ciment, une addition de type II est ajoutée au béton (voir chapitre 1.5), le concept du coefficient k peut être utilisé pour le calcul de la quantité de liant équivalent.

Liant équivalent = Ciment + k . Addition

Les normes NBN EN 206 et NBN B15-001 donnent les valeurs de coefficient k (tab 1.5.1).

Le liant équivalent peut entrer en ligne de compte pour l'évaluation de la quantité de ciment minimale et le rapport eau/ciment maximal.

2.3 Composition et formulation du béton

Composition granulométrique

La composition du "squelette granulaire", à partir des caractéristiques des matières premières (granulométrie et forme) disponibles, visera à minimiser le volume des vides dans le béton, afin de garantir une faible porosité, ce qui lui conférera une durabilité élevée (fig 2.3.4 et 2.3.5).

En règle générale, une courbe granulométrique continue donnera un béton présentant une meilleure compacité, une meilleure ouvrabilité, une cohésion élevée et une tendance réduite à la ségrégation.

La pratique montre que pour les bétons courants, les courbes discontinues peuvent être plus économiques, permettre de meilleurs parements et donner des résistances à la compression plus élevées. Cependant, eu égard à la plus grande sensibilité de ces formules à la variation de granulométrie des granulats et au risque de ségrégation et de ressuage, elles sont de moins en moins utilisées.

Exemple pratique de formulation d'un béton

En pratique la mise au point de la formulation du béton en masse de constituants se fera de la façon suivante :

A. Détermination des quantités d'eau et de ciment

Comme on l'a vu au paragraphe "Choix du rapport E/C", la classe d'environnement, les résistances à atteindre et/ou le cahier de charges spécifique au chantier permettent de déterminer le facteur E/C.

Comme abordé également dans le paragraphe précédent, le dosage en ciment minimal fixé par la norme peut être adapté afin d'obtenir une quantité d'eau supérieure tout en respectant le E/C choisi. L'exemple ci-dessous illustre la logique :

Données d'entrée :

Un béton armé (BA) en application extérieure, en présence d'eau et de gel → classe d'environnement EE3. La norme NBN B15-001 impose pour une classe EE3 un béton de type T(0,50) et par conséquent :

- ▶ dosage C mini de 320 kg/m³
- ▶ E/C maxi de 0,50
- ▶ classe de résistance mini C30/37.

On veut viser une résistance moyenne de 45 N/mm² (37 N/mm² plus une marge typique de 8 N/mm²) et utiliser un ciment dont la résistance moyenne à 28 jours est de 56 N/mm².

Détermination du E/C :

L'application de la formule de Walz (en utilisant une marge de 0,01 sur le E/C donc 0,49) permet de vérifier que la résistance attendue du béton sera de 51 N/mm². Le E/C_{max} de 0,49 résultant de l'environnement est donc déterminant car plus contraignant.

Détermination de la teneur en ciment :

L'application du C_{min} (320 kg/m³) avec un E/C de 0,49 mènerait à une quantité d'eau efficace de 159 litres/m³. Or, de par son expérience, le formulateur sait qu'avec les matériaux utilisés, il aura besoin de minimum 170 litres d'eau pour assurer une viscosité et une ouvrabilité correcte du béton. Il faudra dès lors augmenter le dosage ciment à 170/0,49 ≈ 345 kg/m³.

B. Prise en compte de la quantité d'air

Une teneur moyenne en air de 1,5 à 2,5% peut être prise en compte pour les bétons sans air entraîné.

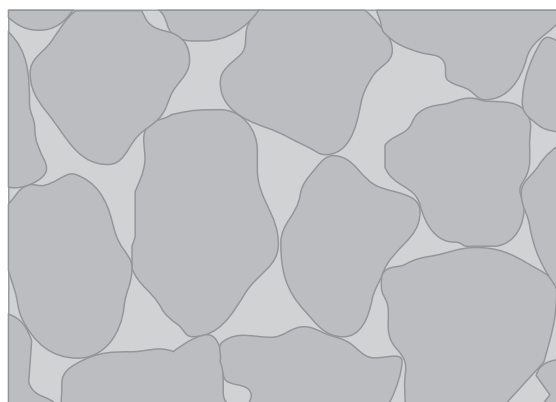


Fig 2.3.4
Un béton monogranulaire présente un faible degré de remplissage : sa porosité est élevée

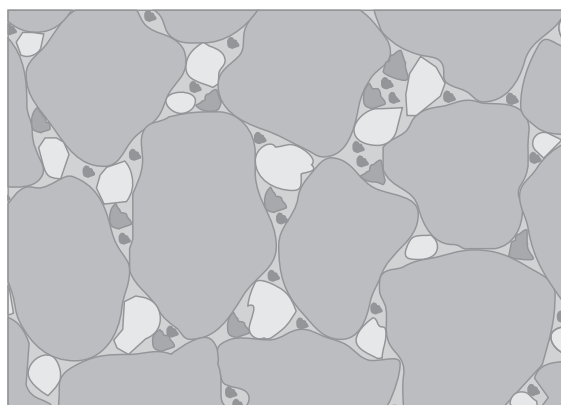


Fig 2.3.5
Un béton à granulométrie continue et optimale présente un degré de remplissage élevé : sa porosité est faible

2.3 Composition et formulation du béton

C. Détermination du volume des granulats

Le volume (rendement volumique) que doit occuper 1 m³ de béton frais est de 1000 litres. Le volume de granulats se détermine donc à partir des volumes de ciment, eau et air (tab 2.3.1).

Le volume du ciment peut être calculé à partir de la masse du ciment en utilisant la masse volumique absolue (ρ_a) du ciment (voir fiche technique du producteur).

Le volume restant (699 litres dans notre exemple) devra être rempli par l'ensemble des granulats.

D. Détermination de la proportion volumique de chaque fraction granulaire

La composition granulométrique du béton (proportion de chaque fraction) peut s'établir selon 3 approches :

- ▶ Approche graphique à partir de méthodes telles que celles de Füller, de Bolomey, de Faury ou de Dreux. Ces différentes méthodes sont basées sur la recherche d'une compacité maximale.
- ▶ Méthode des moindres carrés qui cherche à minimiser l'écart entre la courbe à définir et une courbe idéale connue.
- ▶ Méthode empirique basée sur l'expérience du producteur et utilisant en général des rapports G/S (granulats/sable) ainsi que des rapports entre types de sable (exemple 50% de sable rond et 50% de sable de concassage) et entre calibres de gravillons (exemple 15% concassé 2/6 et 85% concassé 6/20) ayant fait leurs preuves.

Ces approches donnent généralement des proportions volumétriques. La masse volumique réelle (ρ_m), déterminée par séchage à l'étuve, de chaque granulat (voir fiche technique du producteur) permet de transformer les proportions volumiques de chaque fraction granulaire en masse (kg/m³).

E. Détermination de la quantité d'adjuvant

En se basant soit sur des calculs de type "besoin en eau" soit sur base d'expérience, soit sur une étude en laboratoire, le producteur détermine la quantité du ou des adjuvants à utiliser afin d'obtenir la consistance visée.

F. Contrôles et ajustements éventuels

La formulation théorique étant établie, on vérifiera les points suivants :

- ▶ La teneur en fines est-elle suffisante (voir cadre ci-dessous et tab 1.3.4)? Si tel n'est pas le cas, envisager l'utilisation d'un sable correcteur ou d'un ajout minéral.
- ▶ La courbe granulométrique est-elle continue? Si tel n'est pas le cas, envisager l'utilisation d'un calibre intermédiaire, type 2/6 ou 4/8.
- ▶ Les bilans des chlorures et des alcalins sont-ils conformes?

Une teneur optimale en fines

- ▶ accroît la quantité de film lubrifiant sans augmentation notable de la quantité d'eau de gâchage
- ▶ garantit une meilleure ouvrabilité du béton et facilite le compactage du béton
- ▶ améliore la capacité de rétention d'eau du mélange et prévient le ressuage pendant et après la mise en place
- ▶ empêche la ségrégation lors de la mise en place
- ▶ améliore la compacité de la pâte de ciment et, par conséquent, l'étanchéité du béton.

Cette formulation sera ensuite ajustée en fonction des résultats obtenus par des essais initiaux (ITT) effectués en laboratoire et/ou en centrale.

Les vérifications principales concerneront l'ouvrabilité (consistance, résistance à la ségrégation et au ressuage), la résistance à la compression et le rendement volumique.

Tab 2.3.1
Exemple de calcul volumique d'un béton

Constituant	Masse (kg/m ³)	Masse Volumique (kg/l)	Volume (l)
Ciment	345	3,1	345 / 3,1 = 111 litres
Eau efficace	170	1	170 litres
Air			2,0% = 20 litres
Granulats			1000 - 111 - 170 - 20 = 699 litres

2.4 Fabrication et transport

Dosage des constituants

La fabrication correcte d'un béton de composition donnée dépend dans une large mesure des équipements de production à disposition. Il faut en effet respecter très précisément les proportions de la formule pour les différents constituants du béton : liant, granulats, eau de gâchage, adjuvants et additions. Pour cela, il existe deux systèmes : le pesage et le dosage volumétrique, ce dernier étant moins précis. L'ordre dans lequel les constituants sont introduits dans le malaxeur revêt une grande importance et doit faire l'objet d'essais préalables. Cet ordre influence en particulier :

- ▶ la bonne dispersion des composants
- ▶ l'efficacité du malaxage
- ▶ l'effet optimal des adjuvants
- ▶ le rendement horaire
- ▶ l'usure, le nettoyage et l'entretien du malaxeur.

Mélange des constituants

Le malaxeur doit intégrer les constituants séparés en un mélange parfaitement homogène tout en répondant aux exigences suivantes :

- ▶ intensité de malaxage élevée
- ▶ temps de malaxage court
- ▶ dispersion rapide des constituants
- ▶ enrobage optimal des granulats par la pâte de ciment
- ▶ vidange rapide
- ▶ usure minimale.

Le volume des malaxeurs des centrales à béton (généralement entre 2 et 5 m³) est inférieur à celui des camions malaxeurs qui transportent le béton (jusqu'à 12 m³). Une "charge" complète (1 camion mixer) est donc fabriquée à partir de plusieurs "gâchées".

Temps de malaxage

On définit le temps de malaxage comme la durée du malaxage à partir de la fin de l'introduction de tous les constituants, y compris l'eau.

Le temps de malaxage nécessaire varie suivant le béton à produire et le type de malaxeur. Il doit être déterminé par des essais.

S'il est nécessaire d'ajuster la consistance pendant le malaxage en rajoutant de l'eau ou de l'adjuvant, la durée de l'opération doit être allongée en conséquence.



Fig 2.4.1
Vue intérieure
d'un malaxeur
de centrale à
béton

2.4 Fabrication et transport

La pratique et de nombreux essais ont montré qu'en plus de l'homogénéité, d'autres facteurs jouent un rôle important dans la qualité du béton. Ainsi, un malaxage énergétique favorise le mouillage et la dispersion du liant, ce qui se répercute favorablement sur la montée en résistance du béton.

- ▶ Un temps de malaxage de minimum 45 à 60 secondes est recommandé.
- ▶ L'emploi d'un entraîneur d'air nécessite un allongement de cette durée.

L'emploi d'un wattmètre (mesure de la puissance absorbée par le moteur du malaxeur pendant une gâchée de béton) permet de visualiser l'obtention de l'homogénéité suffisante du béton (fig 2.4.2, palier sur la courbe à la fin de la phase 2).

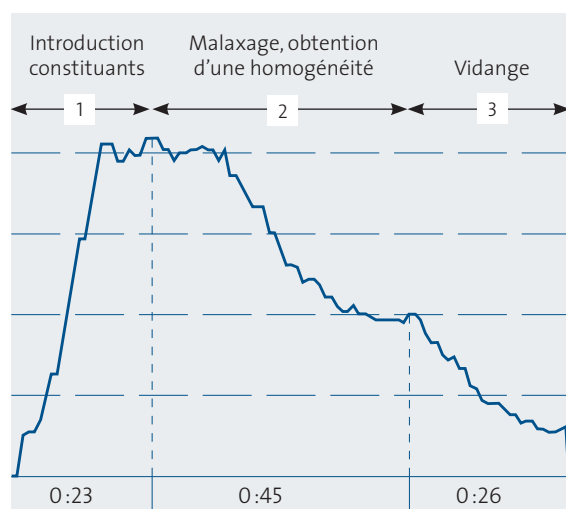


Fig 2.4.2
Exemple de courbe wattmétrique en fonction du temps (secondes)



Fig 2.4.3
Camion mixer



Fig 2.4.4
Centrale à béton

Transport et livraison du béton

Le béton prêt à l'emploi doit être acheminé le plus rapidement possible de la centrale au chantier, généralement en camion malaxeur. Il doit aussitôt (maximum 100 à 120 minutes après fabrication) être mis en place si l'on veut conserver sa qualité. Dans le cas de transport en camion-benne, le béton doit être protégé des intempéries.

À l'arrivée sur chantier, chaque bon de livraison (conformité à la commande) doit être contrôlé par le responsable des travaux. S'il s'agit de camions malaxeurs, il est indispensable de remélanger le béton à l'arrivée pendant quelques minutes avant de le décharger. En cas d'ajout d'ajuvant sur chantier, un temps de malaxage de 1 minute/m³ sera nécessaire.

L'ajout d'eau supplémentaire est à proscrire dans tous les cas, car cette eau diminue la qualité du béton. Toutefois, si le responsable des travaux juge un tel ajout indispensable, celui-ci doit être mentionné sur le bon de livraison et le béton, s'il est certifié, perd son label de conformité à la norme.

Si un véhicule ne peut pas être immédiatement déchargé à son arrivée au chantier, il doit pouvoir attendre dans un endroit abrité (à l'ombre). Si l'attente se prolonge au-delà du délai maximal de mise en œuvre garanti, le béton ne pourra plus être utilisé que pour des travaux secondaires ou provisoires (remplissages, pistes de chantier, etc.).

2.5 Coffrage

Le coffrage contribue pour une bonne part à la réussite d'une construction. Il conditionne l'aspect de la surface, sa structure et sa teinte (fig 2.5.1). Il donne au béton sa dimension architecturale. Et pourtant il arrive qu'on ne lui accorde pas toute l'attention qu'il mériterait.

Choix du coffrage

Le choix du coffrage incombe en principe à l'entreprise d'exécution, sur la base des critères suivants :

- ▶ type d'ouvrage ou d'élément
- ▶ qualité de la surface du béton
- ▶ nombre de réemplois possibles
- ▶ difficulté du montage
- ▶ capacité d'isolation thermique
- ▶ prix.

Matériaux de coffrage

- ▶ lames brutes, rabotées ou non
- ▶ panneaux de bois traités
- ▶ panneaux stratifiés (multiplex marin)
- ▶ coffrages plastifiés (polyester, polystyrène, linoléum, élastomères, etc.)
- ▶ coffrages métalliques.

Exigences générales relatives au coffrage

- ▶ dimensions précises
- ▶ étanchéité (fig 2.5.2)
- ▶ rigidité, absence de déformations (fig 2.5.3)
- ▶ propreté
- ▶ faible adhérence au béton durci
- ▶ esthétique de la structure de surface (fig.2.5.4 et 2.5.5).



Fig 2.5.1
Exemple d'essai sur différents coffrages et utilisation de différents produits de démoulage. Le même béton a été coulé pour chaque partie



Fig 2.5.2
Effet d'une étanchéité insuffisante des joints de coffrage



Fig 2.5.3
Manque de rigidité du coffrage et des réservations lors du coulage d'un béton fluide



Fig 2.5.4
Surface bien réussie d'un béton ayant été coffré avec des planches de bois

2.5 Coffrage

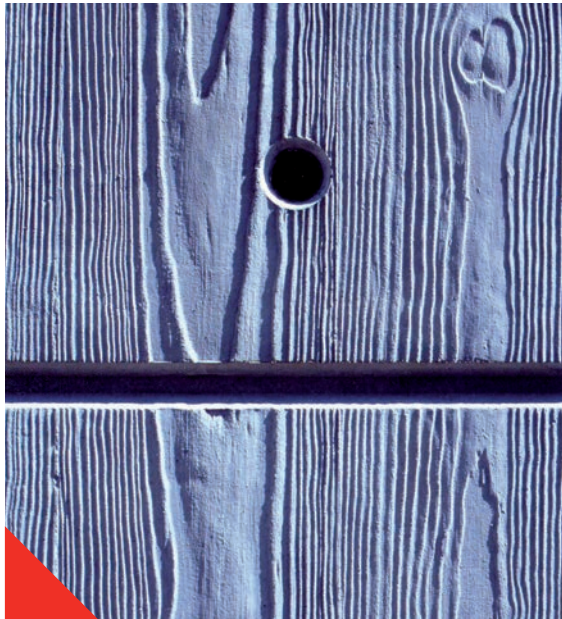


Fig 2.5.5
Exemple d'une surface de béton structurée bien réussie



Fig 2.5.6
Absence de produits de démoulage à certains endroits ayant entraîné l'arrachement du béton lors du décoffrage



Fig 2.5.7
Différences de teinte d'un parement en béton dues à une mauvaise répartition de l'agent de démoulage

Types de coffrages

D'une manière générale, plus les coffrages sont absorbants, plus ils donnent une surface fermée, du fait qu'ils absorbent, au moins partiellement, l'excédent d'eau et les bulles d'air du béton fraîchement mis en place. On ne devrait utiliser, pour une surface apparente donnée, que des panneaux de bois ayant le même nombre de réutilisations. En effet, le pouvoir absorbant du bois diminue à chaque mise en œuvre et affecte la surface du béton de nuances différentes. Les planches brutes devraient toujours être saturées de laitance de ciment avant le premier emploi. On uniformiserait ainsi plus ou moins les inégalités du bois et on éviterait que les sucres qu'il contient viennent perturber la prise et l'hydratation du ciment.

Les coffrages non absorbants, hydrofugés, favorisent localement des concentrations de fines (micro-ségrégations) et une élévation localisée du rapport E/C. Il s'ensuit des irrégularités de teinte à la surface du béton ("nuages"). Des ségrégations superficielles plus importantes peuvent se traduire par une perte de durabilité (voir chapitre 4.1).

Produits de décoffrage

Les produits (ou agents) de décoffrage sont utilisés pour décoller sans difficulté le coffrage de la surface du béton, tout en les conservant intacts l'un et l'autre (fig 2.5.6). Ils doivent être appliqués soigneusement en couche mince et régulière avant la pose des armatures. Le produit en excès doit être éliminé au moyen d'un chiffon. L'apparition de taches ou de différentes nuances de gris à la surface du béton est souvent le fait d'une application incorrecte du produit de décoffrage (fig 2.5.7).

Il existe différents types d'agents de démoulage, tels que les huiles, les cires, les laques et les émulsions.

Les agents de démoulage sont formulés avec ou sans solvant. Tandis que les agents de démoulage sans solvant sont prêts à l'emploi dès leur application, les agents de démoulage avec solvant développent leurs propriétés de séparation seulement après que les solvants se soient évaporés. Les temps de ventilation peuvent être allongés notablement en cas de basses températures, d'humidité de l'air élevée ou en cas d'application d'une couche épaisse du produit. Il faut toutefois éviter une exposition prolongée aux intempéries, sous peine d'évaporation complète du produit.

2.6 Pompage du béton

Domaine d'application

Le pompage s'est imposé comme moyen moderne et économique de mise en place du béton (fig 2.6.1). On peut pratiquement y recourir pour tous les types de travaux, mais cette technique est surtout utilisée lors de grandes étapes de bétonnage ou lorsque la zone de mise en place est difficile d'accès.

Les pompes à béton sont classées en deux grandes catégories, les pompes mobiles et les pompes stationnaires :

- ▶ Les pompes mobiles permettent de s'approcher au plus près du point de bétonnage. Ce sont généralement des pompes à piston. Des pompes à rotor peuvent également être utilisées. Elles ont des capacités de débit et de pression moins importantes, mais sont plus efficace dans certains cas, notamment pour pomper des bétons à air entraîné (diminue le risque de formation de bouchons).
- ▶ Les pompes stationnaires sont fixes et sont installées pour des chantiers de grande envergure.

Lorsque la distance de transport et/ou le volume de béton sont peu importants, on peut aussi recourir à un camion malaxeur pompe, appelé "mixopompe" (fig 2.6.2).

Conseils pour la formulation

Il convient d'observer certaines règles pour formuler un béton destiné à être pompé, afin que le béton frais présente toutes les propriétés nécessaires à sa mise en place au travers des tuyaux de pompage. La formulation d'un béton pompé devrait donc toujours être confiée à un spécialiste expérimenté en technologie du béton. Certains types de béton (très fermes, poreux, maigres, ...) ne sont pas pompables.

Lors de la composition d'un béton pompé, il faut accorder un soin particulier au choix de la granularité, du dosage en ciment, de la teneur en fines (tab 1.3.4), tout en respectant les propriétés spécifiées pour le béton durci.

La pompe transporte le béton jusqu'au lieu de mise en place en le poussant au travers d'une tuyauterie (habituellement \varnothing 100 ou 125 mm). Le risque de ségrégation est le danger majeur pour le béton au cours de cette opération.

Ciment

Tout ciment conforme aux normes devrait convenir à la production de béton pompé, mais il convient toutefois d'éviter des ciments ayant une finesse de broyage (Blaine) peu élevée. Le dosage minimum permettant un transport aisé du béton au travers des tuyaux de distribution est de l'ordre de 300 kg/m^3 .

Granulats

La granularité du sable doit être continue. Des variations trop importantes et non maîtrisées de la granularité du sable sont souvent à l'origine de difficultés de pompage.

Grâce aux progrès enregistrés dans la construction des pompes, la forme des gravillons (roulés ou concassés) ne joue plus un rôle primordial sur l'aptitude au pompage. Une granulométrie continue du squelette inerte reste toutefois préférable.



Fig 2.6.1
Mise en place
du béton par
pompage

2.6 Pompage du béton

Additions

La forme sphérique des particules de cendres volantes favorise l'aptitude au pompage du béton frais, et ce pour des dosages compris entre 20 et 70 kg/m³.

Adjuvants

Le recours aux adjuvants s'effectue selon les mêmes principes que pour le béton non pompé. En ce qui concerne l'usage des entraîneurs d'air, il faut toutefois mentionner qu'une teneur en air du béton frais supérieure à 4% peut affecter les performances de la pompe. Certains agents de cohésion favorisent le pompage.

Consistance

Pour être aisément pompable, le béton frais devrait avoir une consistance suffisamment plastique, soit un affaissement (slump) compris entre 100 et 210 mm. En cas d'emploi de bétons S5 (slump \geq 220 mm), il faut s'assurer qu'ils possèdent une quantité de fines nécessaire pour une stabilité et une cohésion suffisante et qu'ils ne montrent pas de tendance à la ségrégation. Ceci peut conduire à des bouchons dans les tuyaux de pompage.

Conseils pour la mise en œuvre

Pour qu'une étape ou une opération de pompage se déroule sans difficultés, il est indispensable d'organiser suffisamment tôt un contact préparatoire entre l'entreprise de construction, l'entreprise de pompage et la centrale à béton.

- ▶ L'entreprise de pompage est responsable de l'installation et de l'exploitation de la pompe, alors que l'entreprise de construction est responsable de la mise en place, du compactage et de la cure du béton.
- ▶ La fréquence des livraisons de béton et les performances de la pompe doivent être adaptées au rythme de l'équipe de bétonnage.
- ▶ Le pompage est généralement amorcé par une "gâchée de lubrification", appelée également "barbotine", constituée de 0,5 à 2 m³ de mortier ou de coulis riche en ciment. Cette gâchée ne doit en aucun cas être utilisée pour du béton de structure.



Fig 2.6.2
L'utilisation du mixopompe permet de réduire l'encombrement en ville

2.7 Mise en place et compactage

Moyens de mise en place	Consistance du béton				
	S1	S2	S3	S4	S5
Cufa (fig 2.7.1)					
Pompe					
Goulotte (jusqu'à 3m)					

Tab 2.7.1
Moyens de mise en place utilisables en fonction de la consistance

Mise en place

Le tableau 2.7.1 indique les principaux moyens de déchargement et mise en place du béton qui peuvent être utilisés, en fonction de la consistance et des particularités du chantier.

Le volume de la livraison et les moyens de mise en œuvre doivent être adaptés l'un à l'autre. La mise en place du béton doit s'opérer à un rythme constant, en couches horizontales d'épaisseur réduite (idéalement 30 à 50 cm) et aussi régulière que possible. Pour éviter la ségrégation, la hauteur de chute doit être au maximum de 50 à 70 cm (fig 2.7.2). Si cette hauteur dépasse 1 m, le béton doit être mis en place à l'aide d'un tube ou d'un flexible.

On veillera également à ne pas déverser le béton sur les parois verticales du coffrage, afin d'éviter un risque de ségrégation (fig 2.7.2).

Compactage

Un compactage soigneux est essentiel pour la durabilité du béton. Les avantages d'un béton bien compacté sont les suivants :

- ▶ étanchéité plus élevée
- ▶ meilleure durabilité
- ▶ résistance élevée à la compression
- ▶ meilleure adhérence du béton aux armatures.

Méthodes de compactage

Le choix de la méthode de compactage dépend de la consistance du béton. La méthode la plus utilisée et la plus efficace est la vibration au moyen d'aiguilles vibrantes (fig 2.7.3), de vibrateurs de coffrage ou de règles vibrantes. On recourt fréquemment à une combinaison de ces méthodes. La vibration réduit fortement le frottement interne entre les granulats. Les grains se rapprochent, l'air remonte à la surface et les vides sont remplis par la pâte de ciment. Il reste cependant toujours dans la masse une quantité d'air résiduel que l'on appelle "air occlus" et qui se situe généralement autour de 1,5% du volume de béton. Les Bétons Auto Placants (voir chapitre 3.2) ne nécessitent pas de compactage. Leur compaction se fait par seul effet gravitaire.



Fig 2.7.1
Mise en œuvre d'un béton au cufa

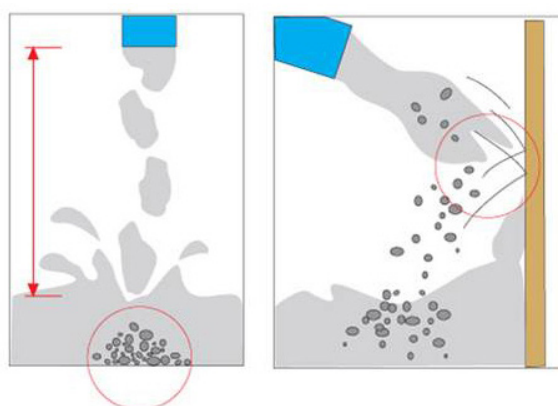


Fig 2.7.2
Risque de ségrégation

2.7 Mise en place et compactage

Domaine d'application des vibrateurs à aiguille à haute fréquence :

L'expérience a montré que la fréquence de 12 000 t/min (200 Hz) est la plus favorable pour l'ensemble des bétons courants. Pour les bétons à granulométrie fine, cette fréquence doit être augmentée (jusqu'à 18 000 t/min, soit 300 Hz).

Les règles d'un bon compactage

- ▶ Vibrer le béton par couches d'épaisseur de 30 à 50 cm.
- ▶ L'aiguille vibrante doit être introduite dans le béton rapidement et à intervalles réguliers. Elle doit être maintenue brièvement au point le plus bas, remontée lentement, et enfin retirée de manière que la surface se referme d'elle-même. Si la surface ne se referme pas, cela peut signifier que la consistance du béton est trop raide, que la prise a déjà commencé, ou encore que la durée de vibration est insuffisante.
- ▶ Le béton ne doit pas être réparti au moyen de l'aiguille vibrante.
- ▶ Choisir l'espacement des points de compactage de telle manière que les zones d'action du vibreur se recouvrent légèrement (tab 2.7.2).
- ▶ Arrêter la vibration dès qu'une fine couche de laitance apparaît en surface et que les grosses bulles d'air ne remontent plus que sporadiquement.
- ▶ Lorsque le béton est mis en place par couches successives, l'aiguille vibrante doit pénétrer d'environ 10 à 15 cm dans la couche sous-jacente pour assurer la bonne liaison des deux couches (fig. 2.7.4).
- ▶ Eviter de toucher les armatures et les coffrages.

Règle pratique

Espacement des points de compactage = 8 à 10 fois le diamètre de l'aiguille

Tab 2.7.2

Valeurs pratiques de la zone d'efficacité et de l'espacement des points de compactage

Diamètre de l'aiguille (mm)	Diamètre de la zone d'efficacité (cm)	Espacement des points de compactage (cm)
< 40	30	25
40 à 60	50	40
> 60	80	70

Post-compactage (revibration)

En réintroduisant le vibreur dans la masse déjà compactée du béton, mais avant la prise, la compacité peut encore être améliorée. Cette technique convient surtout pour les bétons dont le facteur E/C est élevé et qui ont tendance au tassement plastique, ou dont la mise en place a été difficile. Les vides créés par le tassement du béton frais sous les armatures horizontales peuvent ainsi être comblés. Une condition indispensable à la réussite du post-compactage est de le pratiquer au bon moment, alors que le béton est encore ouvrable. C'est la difficulté majeure de cette opération qui doit être exécutée par du personnel expérimenté.



Fig 2.7.3

Compactage du béton à l'aiguille vibrante

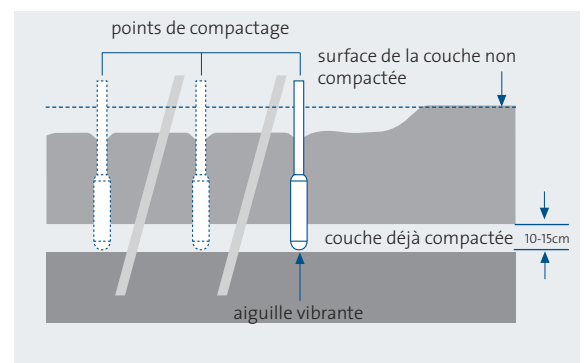


Fig 2.7.4

Mise en place par couches et espacement des points de compactage

Buts de la cure du béton

On entend par "cure" l'ensemble des mesures qu'il faut prendre pour protéger le béton depuis sa mise en place jusqu'au développement d'une résistance suffisante, dans le but d'en garantir la qualité.

La cure doit protéger le béton contre :

- ▶ la dessiccation du béton frais et jeune ("dessiccation précoce") provoquée par le vent, le soleil ou le froid sec
- ▶ les intempéries.

La cure doit permettre au béton mis en place de développer ses caractéristiques intrinsèques par une hydratation optimale du ciment, aussi bien en surface (béton d'enrobage) qu'à cœur. Le béton au jeune âge est très sensible à la dessiccation précoce, surtout en surface. Or, c'est surtout là que la pâte de ciment doit présenter une densité élevée et une porosité minimale afin d'opposer une bonne résistance aux agressions extérieures.

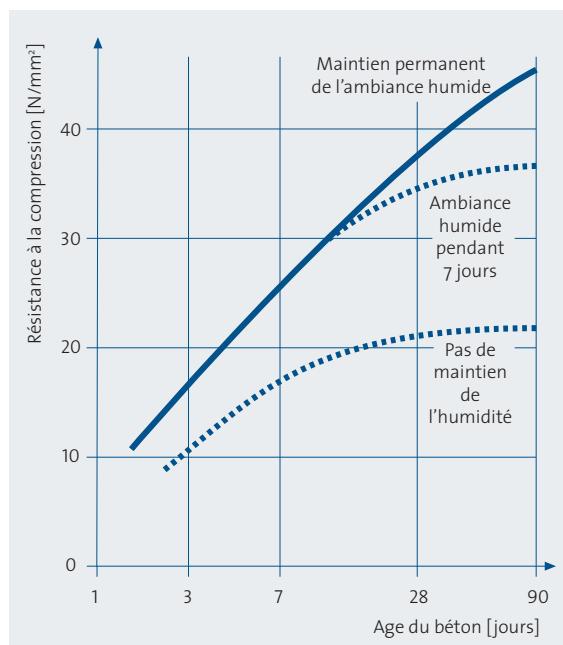


Fig 2.8.1

Effet du maintien d'une ambiance humide sur la montée en résistance du béton au voisinage de la surface

Dessiccation précoce

Il est important que les mesures prises contre la dessiccation précoce soient appliquées dès la mise en place du béton, car les effets d'une perte d'eau prématurée à la surface du béton sont hautement préjudiciables :

- ▶ apparition rapide de fissures de retrait importantes dues au "retrait plastique" (fig 4.2.6)
- ▶ tendance au farinage de surface
- ▶ diminution de la résistance à l'abrasion.

En plus de ces effets "rapides" et "visibles", la perte d'eau durant les premiers jours/semaines aura des effets sur les caractéristiques du béton à plus long terme :

- ▶ réduction de l'étanchéité et de la durabilité
- ▶ perte de résistance (fig 2.8.1)
- ▶ risque accru d'apparition de fissures dues au "retrait de dessiccation".

Afin d'éviter ces phénomènes, il est important d'appliquer une cure rapidement. Les figures 2.8.2 et 2.8.3 illustrent que, sauf situations très favorables pour le béton (faible température du béton et de l'air ambiant, humidité relative élevée, vitesse du vent limitée), la vitesse d'évaporation dépasse généralement la limite de $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ au-delà de laquelle il y a un risque d'apparition de fissures.

Le cas des dallages en béton est particulièrement sensible : en général le béton n'est pas protégé entre la fin de la mise en place et le début du talochage. En cas de conditions défavorables il faut prévoir l'application d'une cure "intermédiaire".

2.8 Cure

Fig 2.8.2
Nomogramme permettant d'estimer la dessiccation d'une surface de béton horizontale non couverte
Exemple: T° de l'air 28°C, HR de l'air 50%, T° du béton 28°C, vit vent 5 m/s.
Résultat: taux de dessiccation = 0,8 kg/m².h

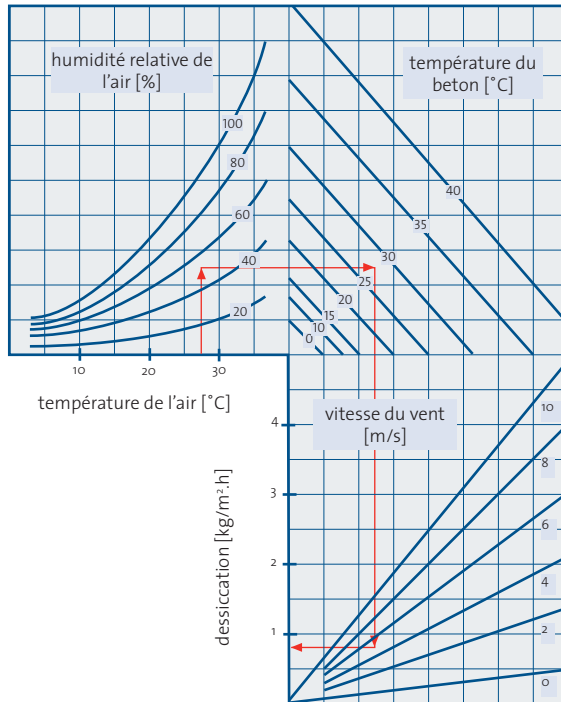


Fig 2.8.5
Un produit de cure coloré permet de mieux contrôler l'application



Fig 2.8.6
Cure par couverture plastique

Fig 2.8.3
Conséquence de conditions météorologiques défavorables sur le retrait au jeune âge, en présence et en l'absence de cure

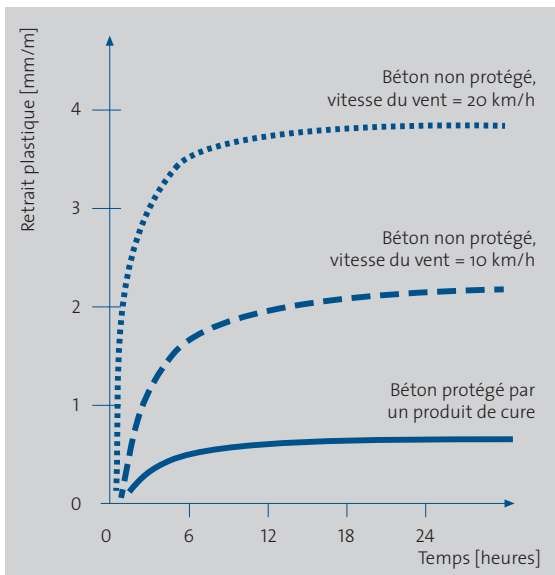


Fig 2.8.4
Vaporisation d'un produit de cure



Intempéries

Suivant leur intensité, les précipitations et autres intempéries peuvent altérer – souvent définitivement – les propriétés du béton frais et du béton jeune: lessivage, porosité élevée, durabilité réduite, ...

Méthodes de cure

La méthode appliquée et la durée de la cure dépendent essentiellement de l'environnement immédiat et du type de béton.

Plusieurs méthodes existent pour protéger le béton fraîchement mis en place :

- ▶ maintenir les coffrages en place
- ▶ vaporiser un produit de cure (fig 2.8.4 et 2.8.5)
- ▶ couvrir avec des feuilles plastiques (fig 2.8.6)
- ▶ arroser la surface du béton (en continu lors des grandes chaleurs)
- ▶ conserver les éléments sous l'eau
- ▶ couvrir avec des bâches thermiques
- ▶ poser des protections qui maintiennent l'humidité (jute, nattes géotextiles)
- ▶ combiner plusieurs de ces mesures.

2.8 Cure

Durée de la cure

Il est important de maintenir la cure pendant un temps suffisamment long. La norme NBN B15-400 (exécution des structures en béton) spécifie des durées minimales de cure, allant de 1 à 15 jours, en fonction des conditions ambiantes et de la vitesse de montée en résistance du

béton (tab 2.8.1). En cas d'utilisation d'un produit de cure, son efficacité dans le temps permet généralement de respecter ces délais. Pour les autres méthodes de cure, le respect de ce délai doit faire l'objet d'une attention particulière.

Durée minimale de la cure					
Conditions ambiantes	T° 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 ≥ 80%	≥ 10°C	1 jour	2 jours	3 jours	4 jours
	< 10°C	2 jours	4 jours	5 jours	6 jours
NORMALES Ensoleillement moyen et/ou humidité relative ≥ 50%	≥ 10°C	2 jours	3 jours	4 jours	6 jours
	< 10°C	4 jours	6 jours	8 jours	12 jours
MAUVAISES Fort ensoleillement et/ou vent fort et/ou humidité relative < 50%	≥ 10°C	3 jours	4 jours	7 jours	10 jours
	< 10°C	5 jours	8 jours	10 jours	15 jours

Tab 2.8.1
Durée minimale de cure, selon la NBN B15-400

La détermination de l'évolution de la résistance du béton peut se faire sur base du type de ciment (disponible sur le bon de livraison):

- ▶ CEM I 52,5 N ou CEM I 52,5 R (combiné ou non avec le CEM III/A): **Rapide**
- ▶ CEM III/A 42,5 N LA (combiné ou non avec le CEM III/A 32,5 N LA): **Moyenne**
- ▶ CEM III/A 32,5 N LA ou CEM III/B 42,5 N-LH SR LA: **Lente**
- ▶ Si le béton contient des cendres volantes (sur le BL): prendre une classe en-dessous (ex. moyenne au lieu de rapide).

En raison de leurs mécanismes d'hydratation spécifiques, les ciments à forte proportion de laitier (type CEM III) sont particulièrement sensibles à la dessiccation précoce.

Conseil pratique

Pour éviter que la vaporisation d'un produit de cure ne nuise à l'accrochage de la couche qui sera appliquée par-dessus, la surface du béton devra être traitée après la fin de la cure (sablage ou ponçage, par exemple) si besoin.

2.9 Bétonnage par temps chaud

Pendant les mois d'été on constate souvent une baisse de l'ordre de quelques N/mm² sur la moyenne des résistances à 28 jours.

Il s'agit d'un phénomène connu, propre à toutes les régions où l'on observe des différences importantes entre les températures saisonnières. Les causes principales sont une modification de la taille des hydrates formés à température élevée et les rajouts d'eau dans le béton.

Température plus élevée du béton

D'une manière générale, plus la température du béton est élevée, plus le processus d'hydratation est accéléré car le développement des hydrates est plus rapide. Il s'ensuit tout naturellement un accroissement des résistances initiales. Sur le long terme cependant les résistances sont plus faibles (fig 2.9.1). Ceci est dû à un développement microstructural plus grossier, les hydrates étant plus denses (donc plus grossiers) à haute température et distribués de manière plus hétérogène. Le réseau poreux est donc plus large ce qui est à l'origine de la perte de résistance.

Ajout d'eau

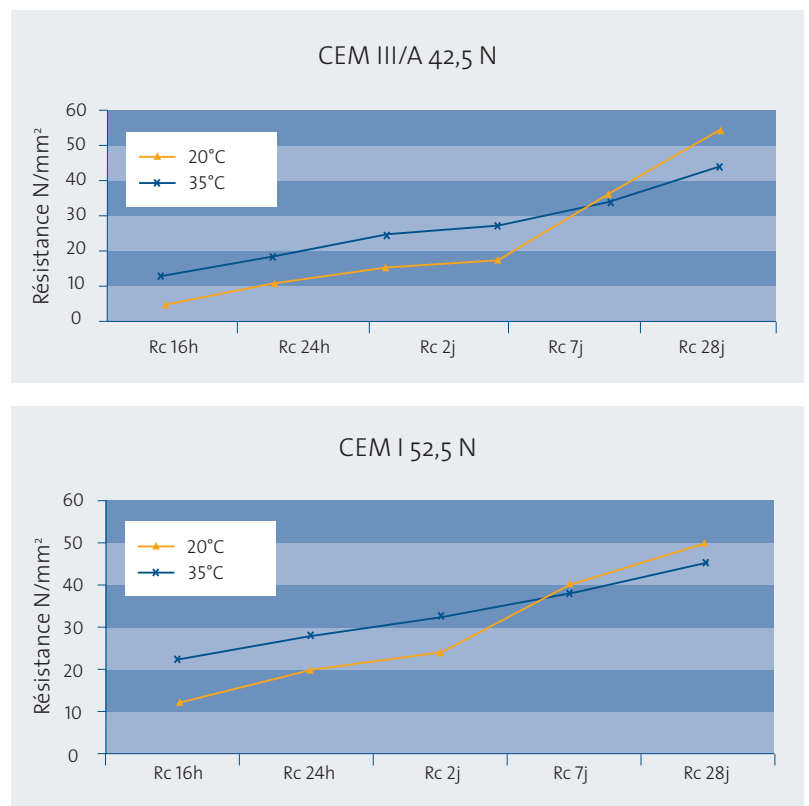
Lors de températures élevées, on constate généralement une diminution plus rapide de l'ouvrabilité du béton, voire même un raidissement précoce, qui rendrait plus difficile sa mise en place. Il n'est pas toujours possible de compenser complètement ce phénomène par une augmentation du dosage en (super)plastifiant.

Bien qu'il soit recommandé de ne pas rajouter d'eau au béton sur le chantier, la tentation est donc grande de rendre le béton plus ouvrable en y ajoutant de l'eau. Or comme tout apport d'eau (si petit soit-il) augmente le facteur E/C, il en résulte inévitablement une perte de résistance et plus encore de durabilité du béton.

Règle pratique

L'ajout de 10 litres d'eau par m³ de béton entraîne une perte de résistance à 28 jours pouvant atteindre jusqu'à 10%.

Fig 2.9.1
Influence de température élevée sur la résistance à la compression. Le béton confectionné à 35°C a été maintenu 48h à cette température, puis conservé à 20°C



2.9 Bétonnage par temps chaud

Afin de maintenir dans des limites acceptables les pertes de résistance par temps chaud, le béton frais ne devrait pas dépasser une température maximale de 30°C. Pour un béton à performances particulières, cette température ne devrait pas dépasser 25°C.

En plus de la perte de résistance à long terme (fig 2.9.1) et de durabilité, une température élevée du béton peut encore être la cause d'autres effets indésirables :

- ▶ L'hydratation plus rapide du ciment se traduit par une perte d'ouvrabilité prématurée qui peut aller jusqu'au raidissement du béton, et parfois même rendre la mise en place quasi impossible.
- ▶ D'autre part, le béton subit une dessiccation plus rapide en surface. Le phénomène est encore aggravé en présence de vent (même faible), d'ensoleillement direct et par faible humidité ambiante. La cure du béton (voir chapitre 2.8) pourra limiter la perte d'humidité. Toutefois, si l'on procède par arrosage, il faudra que ce soit en continu pour éviter les chocs thermiques en surface. A défaut de ces mesures, l'hydratation du ciment demeurera incomplète. La résistance finale et la durabilité des parties d'ouvrage (surtout les surfaces) qui auront séchées trop vite seront diminuées. Ces éléments auront une tendance marquée au retrait plastique et à la fissuration qui en découle (voir chapitre 4.2). Les bétons apparents pourront présenter des différences de gris inesthétiques.

Calcul de la température du béton frais

La température "T_b" du béton frais peut être évaluée au moyen de la formule simplifiée ci-dessous :

$$T_b = \frac{(C_c \cdot C \cdot T_c) + (C_e \cdot E \cdot T_e) + (C_g \cdot G \cdot T_g)}{C_c \cdot C + C_e \cdot E + C_g \cdot G}$$

T_b Température du béton frais (°C)

C_c, C_e, C_g Capacités thermiques spécifiques
Valeurs de calcul : 0,84 kJ/(kg . K) pour le ciment et les granulats et 4,19 kJ/(kg . K) pour l'eau

C, E, G Teneurs en ciment, en eau et en granulats (kg/m³)

T_e, T_c, T_g Températures de l'eau, du ciment et des granulats (°C)

Prenons une formule de béton, dont la composition est la suivante :

- Ciment : 350 kg
- Eau : 175 litres
- Granulats : 1 800 kg

Le tableau suivant donne les températures de béton (en rouge) obtenues à partir de températures de ciment (en abscisse en bleu) et de granulats (en ordonnées en vert) variables. On suppose que la température de l'eau reste constante à 20°C, mais on pourra vérifier avec la formule l'influence de la température de l'eau sur celle du mélange final.

		T° du ciment					
		20	30	40	50	60	70
T° des granulats	20	20	21	22	23	25	25
	30	26	27	28	29	31	32
	40	32	33	34	35	37	38
	50	38	39	40	41	42	44
	60	44	45	46	47	48	50
	70	50	51	52	53	54	56

T° du béton en fonction de la température du ciment et des granulats

Le calcul montre que la température du granulat a le plus grand impact sur la température du béton, tandis que la température du ciment et de l'eau n'ont qu'une influence relativement faible.

Un changement de 1°C de la température du béton frais de ce béton est obtenue en variant :

- la température du granulat d'environ 1,6°C ou
- la température de l'eau de 4°C ou
- la température du ciment de 10°C.

2.9 Bétonnage par temps chaud

Mesures à prendre

Préparation du chantier

Le bétonnage par temps chaud exige une bonne planification :

- ▶ Coordonner méticuleusement la livraison et la mise en œuvre du béton frais afin d'éviter toute attente.
- ▶ Prévoir suffisamment d'engins et de personnel pour le bétonnage, afin d'exécuter la mise en place et le compactage du béton sans interruption.
- ▶ Si les conditions requises pour un bétonnage correct par temps chaud ne peuvent être remplies, quelles qu'en soient les raisons, il faut reporter l'opération à un moment où la température sera moins élevée.

Composition et fabrication du béton

La plupart des mesures visent à réduire la température du béton frais :

- ▶ Refroidir les gravillons par arrosage (le dosage en eau doit être réduit d'autant). Il est vivement déconseillé d'utiliser des granulats chauds, exposés au soleil par exemple, pour confectionner des bétons durant l'été. La température des granulats peut monter jusqu'à 50°C, voire plus à la surface des stocks. Il est recommandé d'utiliser les granulats de préférence le matin après refroidissement nocturne ou de les refroidir au préalable.
- ▶ Equiper les silos à granulats d'une isolation thermique.
- ▶ Réfrigérer l'eau de gâchage.
- ▶ Dans certains cas particuliers, et sous le contrôle de spécialistes, on peut aussi rafraîchir le béton avec de l'azote liquide.
- ▶ Dans une certaine mesure, l'emploi de retardateurs de prise permet de pallier aux inconvénients d'une hydratation trop rapide du ciment. Ils exigent cependant une cure prolongée. Des essais préliminaires s'imposent afin de déterminer le dosage approprié.

Mise en place et compactage

Au moment de la mise en œuvre, les mesures à prendre sont :

- ▶ Arroser le coffrage avant la mise en place du béton (les fonds et le coffrage ne doivent pas absorber l'eau du béton frais). Eviter toutefois un arrosage exagéré laissant des flaques d'eau résiduelle.
- ▶ Mettre en place le béton rapidement et sans interruption
- ▶ Si l'on ne peut éviter des attentes imprévues, le béton qui se trouve dans les camions ou dans la trémie doit être protégé du vent et du soleil. Les camions malaxeurs peuvent être arrosés extérieurement afin de rafraîchir le béton se trouvant à l'intérieur de la cuve.
- ▶ Interdire strictement tout ajout d'eau sur chantier.

Cure

Au niveau de la cure, les mesures à prendre sont :

- ▶ appliquer la cure immédiatement après la mise en place du béton
- ▶ maintenir cette protection (fig 2.9.2) le temps nécessaire (tab 2.8.1).



Fig 2.9.2

Protection du béton contre la dessiccation

2.10 Bétonnage par temps froid

Risques inhérents aux basses températures

La figure 2.10.1 met en évidence l'effet ralentisseur des basses températures sur la montée en résistance du béton. Très net au jeune âge, ce ralentissement diminue par la suite. Par temps froid, certaines précautions s'avèrent donc indispensables pour la confection et la mise en œuvre du béton.

La norme NBN EN 206 précise que la température du béton frais ne doit pas être inférieure à 5°C au moment de la livraison.

Lorsque la température du béton descend en-dessous de 5°C, le développement des résistances est pratiquement stoppé. Si l'eau intérieure gèle dans un béton au jeune âge, elle peut en faire éclater la texture ou même le disloquer par expansion de la glace. Un béton ayant subi un tel dommage doit être éliminé.

Pour les travaux de bétonnage dans des périodes avec risque de gel (nocturne), il faut veiller à ce que la température du béton frais soit d'au moins + 5°C à la mise en place. Ensuite, il faut garder le béton frais/jeune hors gel jusqu'au moment où il peut résister à l'action du gel. En règle générale, on considère que le béton peut supporter le gel dès que sa résistance à la compression dépasse 5 N/mm².

En pratique, la règle d'or pour éviter les dégâts du gel est la suivante: "La température de la surface la plus exposée du béton doit être d'au moins + 5°C pendant les 72 heures qui suivent la mise en place".

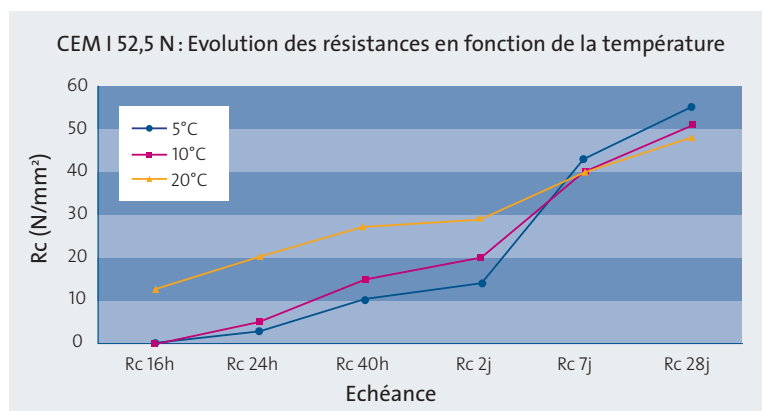
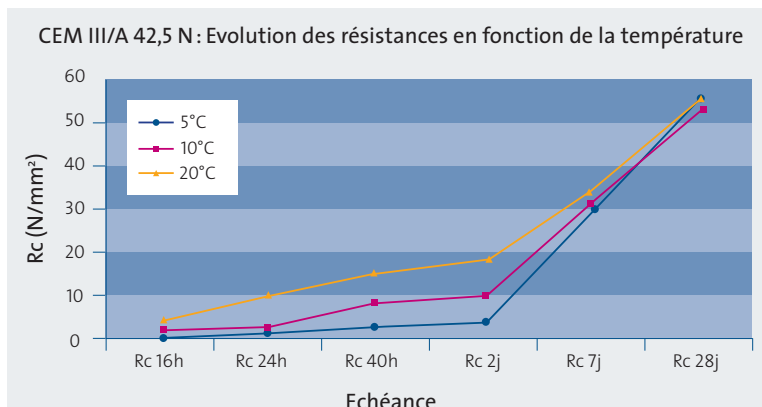


Fig 2.10.1

Influence des températures basses sur les résistances à la compression. Exemple sur un béton à 300 kg de ciment. Les bétons sont conservés 48 h à la température de confection, puis à 20°C

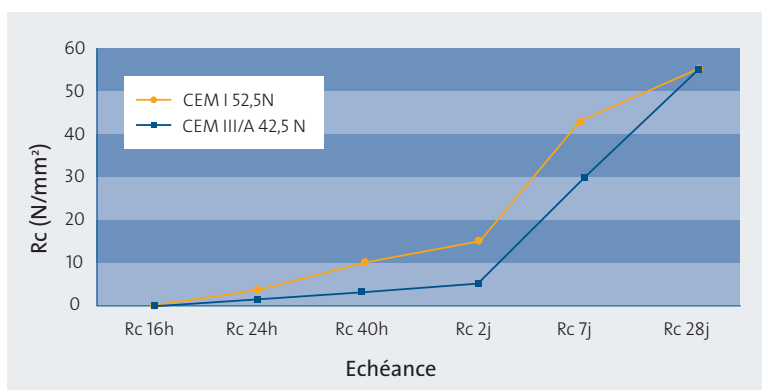


Fig 2.10.2

Comparatif de la réactivité d'un CEM I 52,5 N et d'un CEM III/A 42,5 N à 5°C

2.10 Bétonnage par temps froid

Mesures permettant d'augmenter la température du béton frais

Afin que la température du béton frais ne soit pas trop basse lors du bétonnage, on peut réchauffer les constituants, ou tout au moins maintenir le ciment et les granulats à une température supérieure à la température extérieure.

En appliquant la formule de la page 63, on peut établir le tableau suivant donnant les températures de béton frais (en rouge) obtenues à partir des températures de l'eau de gâchage (en abscisse en bleu) et des granulats (en ordonnées en vert) variables. On suppose que la température du ciment reste constante à 20°C, mais on pourra vérifier avec la formule l'influence de la température du ciment sur celle du mélange final.

		Température de l'eau					
		10	20	30	40	50	60
T° des granulats	0	5	8	11	14	17	20
	10	11	14	17	20	23	26
	20	17	23	26	29	32	34

T° du béton en fonction de la température de l'eau et des granulats

On constate que si l'on parvient à garder la température des granulats à 10°C minimum, il est aisé d'avoir une température béton frais supérieure à 10°C.



Fig 2.10.3
Mesure de la température du béton frais

Mesures à prendre pour la fabrication du béton par temps froid

Par temps froid, les mesures suivantes, prises au stade de la fabrication, peuvent améliorer le développement des résistances et l'évolution de la température du béton :

- ▶ Elever la température du béton frais en préchauffant l'eau de gâchage et/ou les granulats.
- ▶ Augmenter le dosage en ciment et/ou choisir un ciment plus réactif sans modifier les autres composants du mélange, ce qui favorisera la montée en résistance au jeune âge (fig 2.10.2).
- ▶ Abaisser le rapport E/C par l'emploi d'un superplastifiant, car moins un béton contient d'eau, moins il est sensible au gel et plus vite il monte en résistance.
- ▶ Accélérer le développement des résistances par l'introduction d'un accélérateur (non chloré) de prise et de durcissement.

Mesures à prendre sur chantier par temps froid

Les bétonnages par basses températures extérieures imposent au chantier certaines mesures de précaution :

- ▶ Ne jamais bétonner sur un sol gelé ni contre du béton gelé.
- ▶ Le béton préchauffé doit être mis en place rapidement dans un coffrage exempt de glace et de neige. Il doit être immédiatement compacté.
- ▶ Immédiatement après sa mise en place, le béton doit être protégé contre toute déperdition de chaleur. On récupère ainsi la chaleur produite par l'hydratation du ciment. Une protection au moyen de nattes isolantes ou de bâches thermiques est recommandée.
- ▶ Si ces nattes ne peuvent être appliquées directement sur la surface du béton, il faut prévoir en plus une protection contre les courants d'air.
- ▶ Mesurer l'évolution de la température interne du béton.
- ▶ Pendant toute la période du durcissement, le béton ne doit pas seulement être à l'abri des déperditions de chaleur, mais également à l'abri de la dessiccation. En effet, par temps froid, l'humidité relative de l'air est généralement très basse et favorise l'évaporation de l'eau contenue dans le béton.
- ▶ Si, pendant le durcissement, la température du béton s'abaisse en-dessous du point de congélation, il faut prolonger le délai de décoffrage et de cure au minimum du nombre de jours pendant lesquels il a gelé.

2.10 Bétonnage par temps froid

Les recommandations pour le bétonnage par temps froid du CSTC (Digest n°12) sont reprises au tableau 2.10.1. Celles-ci sont exprimées en fonction du "Type de temps" qui dépend des températures minimales et maximales enregistrées durant chaque cycle journalier de 24h (fig 2.10.4).

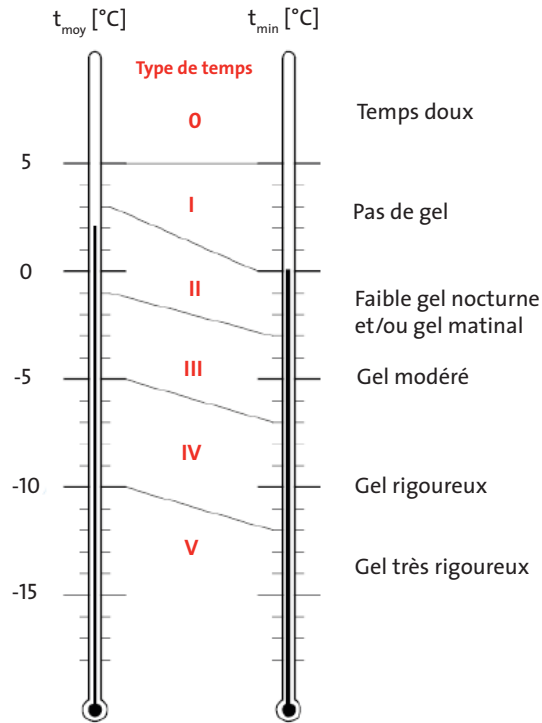


Fig 2.10.4
Type de temps
(source CSTC)

Mesures de protection	Type de temps				
	I	II	III	IV	V
Chauffer l'eau à 70°C maximum (la température du béton ne peut pas dépasser 40°C)	—	(X)	X	X	X
Utiliser de préférence des coffrages en bois assez isolants thermiquement (non perméables et assez épais)	X	X	X	X	X
Isoler thermiquement les coffrages métalliques	(X)	(X)	X	X	X
Prévoir une protection thermique moyennement isolante (panneau en bois ou bâche avec lame d'air de 2 à 5 cm)	X	X	—	—	—
Prévoir une protection thermique très isolante (matelas de laine minérale d'au moins 4 cm d'épaisseur dans une housse en feuille plastique,...)	—	—	X	X	X
Poser une enceinte chauffée	—	—	—	(X)	(X)
— aucune mesure	X mesure nécessaire	(X) mesure souhaitée			

Tab 2.10.1
Mesures de protection des surfaces exposées du béton en fonction du type de temps (source CSTC)

Les bétons spéciaux

3.1

Béton de dallage

3.2

Béton autoplaçant

3.3

Béton fibré

3.4

Béton apparent

3.5

Béton de route

3.6

Béton à hautes performances

3.7

Béton pour fondations profondes

B

3.1 Béton de dallage

Introduction

Le béton de dallage est employé pour la réalisation, à l'extérieur comme à l'intérieur, de dalles en béton horizontales en une seule couche et avec une surface finie prête à l'emploi. Les champs d'application sont non seulement des surfaces de roulement, mais aussi des dalles en béton dans le bâtiment, notamment pour les logements, les constructions industrielles et les surfaces commerciales. La surface du béton est, après la mise en place, le compactage et l'arasage, traitée en plus à la main ou à la machine.

Pour les dallages intérieurs, le lissage à la machine est exécuté à l'aide de lisseuses mécaniques spéciales à hélices (fig 3.1.1 et 3.1.2) quelques heures seulement après la mise en place, lorsque la surface du béton est suffisamment ferme, mais encore humide et mate. La zone superficielle lissée d'une épaisseur d'environ 3 mm devient plane et lisse, mais aussi très dure et résistante. Elle peut dès lors résister par elle-même, sans couche de protection complémentaire, à toutes sortes de sollicitations.

Pour les dallages extérieurs, la mise en œuvre et la finition se rapprochent des techniques utilisées pour les bétons routiers et sont reprises au chapitre 3.5.

Un revêtement extérieur est soumis à d'autres contraintes qu'un sol intérieur, et plus particulièrement aux conditions climatiques. Les principaux facteurs sont les conditions de durcissement du béton frais, les différences de retrait et de dilatation suite aux variations de températures quotidiennes et saisonnières ainsi que l'influence du gel et de l'utilisation de sels de déverglaçage. Cela implique des différences essentielles au niveau de la conception, de la composition du béton et de l'exécution. Un même concept ne peut donc pas être appliqué à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment.

Exigences normatives

Le béton sera spécifié en tenant compte de sa destination et des charges à supporter, de la portance du sol et des exigences supplémentaires éventuelles. Les conditions de mise en œuvre et de finition de la surface seront également prise en compte. Le béton pourra être spécifié selon la norme NBN EN 206.

La NIT 204 du CSTC rassemble les bonnes pratiques pour l'exécution d'un sol intérieur en béton. L'auteur du projet peut s'en inspirer pour la spécification du béton (exigences complémentaires).

Le code de bonne pratique du CRR, référence R82/11, donne des recommandations pour l'exécution des revêtements industriels extérieurs en béton.

La classe de résistance du béton sera de :

- ▶ **C25/30** : pour les bâtiments résidentiels, sociaux, commerciaux et administratifs et les sols intérieurs légèrement à modérément sollicités dans des aires de stockage et des locaux industriels
- ▶ **C30/37** : pour les sols lourdement sollicités dans des aires de stockage et des locaux industriels, pour les sols extérieurs non soumis aux sels de déverglaçage
- ▶ **C35/45** : pour les situations particulières nécessitant de meilleures performances en raison de charges spécifiques élevées, pour les sols extérieurs soumis aux sels de déverglaçage.

La classe d'environnement EE3 ou EE4 sera choisie pour le dallage extérieur. A l'intérieur, la classe EI s'applique uniquement si l'environnement est très sec. En cas d'humidité, il faudra choisir entre EE1 (pas de gel possible) ou EE3 (gel possible).



Fig 3.1.1
Finition à l'hélicoptère

3.1 Béton de dallage

Formulation du béton

Ciment

Les types de ciment les plus utilisés pour les bétons destinés aux dallages sont les ciments CEM III/A, classe de résistance 42,5 N. Un ciment CEM I 52,5 (N ou R) peut aussi être utilisé, par exemple lorsqu'un durcissement rapide à basse température est nécessaire. L'utilisation de ciments de la classe de résistance 32,5 doit être évitée. Ils présentent l'inconvénient d'avoir un temps de durcissement beaucoup plus long, ce qui rend le béton beaucoup plus sensible au retrait plastique. Ces ciments peuvent néanmoins être utilisés lorsque les températures extérieures sont élevées.

En utilisant un ciment LA selon la NBN B12-109, ayant une teneur limitée en alcali (Na_2O et K_2O), le risque de dégradations suite à une réaction alcali-silice est limité en cas de dallages soumis à des conditions humides. Alternativement, un bilan des alcalis devra être effectué afin de limiter les risques de ce type de réaction (voir chapitre 4.9).

Dans le cas d'agressions chimiques liées à la présence de sulfates, un ciment SR selon la NBN EN 197-1 ou HSR selon la NBN B12-108 seront utilisés.

La teneur minimale en ciment sera de 320 kg/m^3 .

Granulats et teneur en particules fines

Pour les dallages intérieurs, afin d'éviter tout problème de ségrégation, de ressuage et de retrait, il convient d'utiliser un mélange de béton stable dont le squelette inerte présente une granulométrie continue.

Il est conseillé d'avoir une teneur totale en particules fines ($\leq 0,250 \text{ mm}$) suffisamment élevée (tab 1.3.4) pour garantir la stabilité et la pompabilité du béton.

Parallèlement, la teneur totale en particules fines ne peut toutefois pas être beaucoup plus élevée, car elle entraînerait :

- ▶ un besoin accru en eau du béton
- ▶ un retrait plus important
- ▶ un dosage plus élevé en superplastifiant et un aspect visqueux ou collant accru du béton
- ▶ un risque augmenté de délamination de la couche superficielle
- ▶ un manque d'eau de ressuage favorable à un début de cure et/ou nécessaire au durcissement du mélange du ciment et des fines de la couche d'usure éventuellement appliqué par après.

Pour les dallages extérieurs soumis à des lourdes charges ou à circulation, on portera une attention particulière à la qualité intrinsèque des granulats. Des gravillons présentant une bonne résistance à la fragmentation, à l'abrasion et au polissage seront choisis.

Ces bétons étant de consistance ferme (S_1), on privilégiera un sable (ou mélange de sables) ayant une granulométrie étendue et on veillera à limiter la teneur en particules $\leq 0,063 \text{ mm}$ du squelette inerte à 3%, ceci afin d'éviter une demande en eau trop importante.

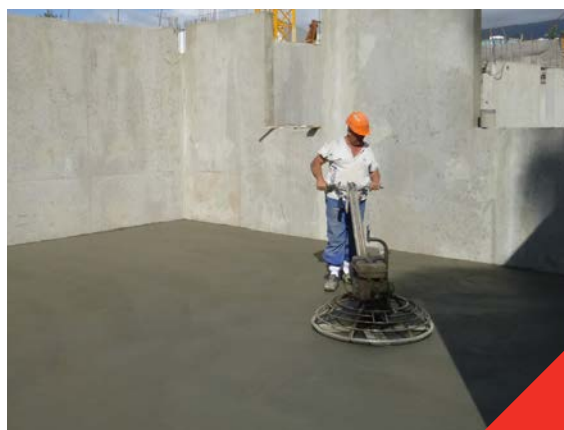


Fig 3.1.2
Finition à l'hélicoptère

3.1 Béton de dallage

Eau et adjuvants

Une teneur minimale en eau efficace de 180 l/m³ et une teneur minimale en ciment de 320 kg/m³, généralement supérieure pour respecter les exigences de E/C, permettent d'avoir une fraction de mortier suffisante pour obtenir une finition correcte de la surface de la dalle en béton et éviter des hauts dosages en superplastifiants. Un dosage élevé de certains superplastifiants peut en effet avoir des effets secondaires néfastes : entraînement d'air, retard dans le raidissement du béton, viscosité élevée favorisant l'apparition d'une croûte sur la surface fraîche du béton faisant croire à son durcissement tandis que le béton au cœur de la dalle est encore mou (appelé "effet matelas" ou "peau d'éléphant").

Pour les dallages intérieurs lissés, la teneur en air maximale du béton sera de 3% et l'utilisation d'agents entraîneurs d'air sera proscrite. En effet, si après le lissage final du béton des bulles d'air venaient à remonter à la surface, elles seraient bloquées par la couche d'usure. La formation de "loupes" d'air pourrait alors être à l'origine de décollements ultérieurs de la couche d'usure.

A contrario, dans le cas des dallages extérieurs soumis au gel et aux sels de déverglaçage, une quantité minimale d'air peut être spécifiée. L'utilisation d'un agent entraîneur d'air sera alors prévue.

Consistance

La consistance choisie pour le béton dépendra de l'application. Pour les dallages intérieurs lissés à l'hélicoptère, on optera habituellement pour un béton de consistance fluide (S4). Plus la consistance est raide, plus tôt le lissage peut être commencé. Pour les bétonnages en pente, une classe de consistance S3 est généralement spécifiée.

Pour les dalles extérieures, mises en œuvre selon les techniques routières, la consistance du béton sera plutôt ferme, type S1 (éventuellement S2 ou S3 pour des zones mises en œuvre manuellement).

Recommandations pour l'exécution des dallages en béton

Conditions météorologiques

Le temps nécessaire au raidissement du béton avant la finition de surface dépend, outre de la composition du béton, de la température extérieure. La température idéale de mise en œuvre du béton de dallage se situe entre 10°C et 25°C.

En deçà d'une température de 10°C, le niveau de raidissement du béton est atteint plus tard qu'à 20°C. La quantité d'eau ressuée est presque doublée alors que l'eau évaporée diminue de moitié. A l'inverse, à une température de 30°C, la résistance au passage d'une personne est atteinte plus tôt, la quantité d'eau ressuée est diminuée de moitié et l'évaporation est presque doublée. Une exposition variable au soleil et à l'ombre de la surface du béton peut conduire à un comportement irrégulier du béton lors du lissage.

Cadence de mise en œuvre

La planification d'une cadence non réaliste de mise en œuvre provoque des temps d'attente des véhicules de livraison ou des délais trop longs entre l'arrivée sur chantier des différents camions et peut avoir des effets négatifs sur la qualité du béton. Les équipes et le matériel de mise en œuvre pour la pose et le lissage du béton seront adaptés à la cadence souhaitée mais également au béton commandé (délai de maintien d'ouvrabilité).

Afin de garantir une vitesse de raidissement uniforme de la dalle, une attention particulière est nécessaire dans le cas de livraison depuis plusieurs centrales.

Lissage - Finition de surface

Cas des dallages intérieurs

La finition de surface consiste à donner au béton une surface dure et lisse.

Pour le traitement mécanique on utilise une polisseuse mécanique appelée également "hélicoptère" (fig 3.1.1 et 3.1.2).

3.1 Béton de dallage

Terminologie

On appelle "béton lissé", un béton dont la finition est réalisée par passage d'une lisseuse manuelle (talochage) ou mécanique (hélicoptère) à la surface du béton frais commençant sa prise. Le nombre de passages et l'incorporation éventuelle d'un mélange spécifique pour couche d'usure détermineront le niveau de brillance et de dureté.

Ce béton est parfois désigné dans le langage courant comme "béton poli", terme qui dans la littérature technique est réservé au béton obtenu par fraisage éventuel puis par passages successifs de meules abrasives (ponçage puis polissage) à la surface du béton durci (voir chapitre 3.4).

Le lissage à la machine doit se faire pendant un intervalle de temps bien défini. Au moment du lissage, une hydratation avancée accompagnée de la formation d'une structure solide ne doit pas encore s'être développée dans le béton. Le lissage doit avoir lieu juste avant le début de prise et se terminer avant la fin de la prise. Cet intervalle de temps est déterminé par le temps nécessaire au raidissement du béton en surface.

Le bon moment du début de lissage est atteint lorsque la surface est suffisamment ferme pour qu'on puisse marcher dessus et est caractérisé par son état d'humidité. L'empreinte d'une chaussure doit être visible et s'enfoncer de quelques millimètres, tandis que la surface du béton doit être humide et mate (fig 3.1.4).

Lorsque la température extérieure est proche de 20°C, le lissage peut commencer environ 3 heures après la mise en place, le compactage et l'arasage. Ce délai est variable en fonction de la température et du type de béton.

En cas de lissage prématuré, la lisseuse s'enfonce dans le béton et affecte la planéité, tandis qu'un lissage trop tardif perturbe l'adhérence de la zone de surface avec le béton sous-jacent.

Cette période de temps d'attente est donc critique pour le béton. Pendant l'intervalle de temps entre l'arasage de la surface de béton et le lissage, la surface du béton ne doit pas se dessécher. Dans le cas de bâtiment déjà fermé, on veillera à fermer toutes les ouvertures pour éviter les courants d'air qui pourraient accentuer l'évaporation d'eau. S'il y a un risque de dessèchement (bâtiment non fermé, vent fort ou soleil), une cure intermédiaire s'avère nécessaire. Les mesures adéquates de cures intermédiaires consistent à vaporiser de l'eau ou un produit de cure adapté.

Il est possible d'améliorer les propriétés de la couche d'usure du béton par l'application de mélanges spécifiques de granulés durs, tels que p. ex. le quartz, le corindon, le carbure de silicium, généralement mélangés avec du ciment, à des dosages de 2 à 5 kg/m². Les granulés durs doivent être dispersés dès que la surface est praticable à pied, soit avec un équipement de saupoudrage piloté mécaniquement pour les grandes surfaces, soit à la main avec un chariot de saupoudrage. Le mélange sera incorporé dans la couche de surface lors de la phase de lissage final, à l'hélicoptère ou manuel.

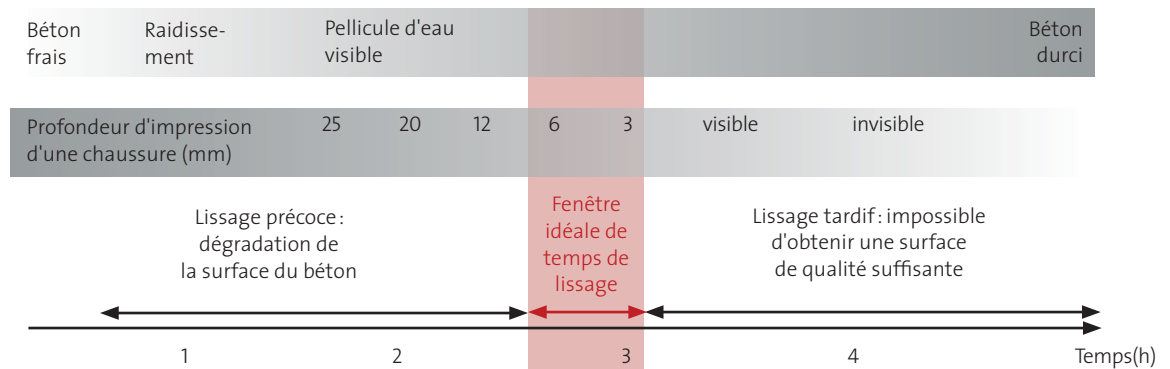
Cas des dallages extérieurs

Pour les sols extérieurs, soumis aux intempéries, on souhaitera généralement une surface rugueuse, afin d'éviter qu'elle soit glissante. Un brossage ou striage de surface permettront de rendre les surfaces adhérentes. En plus, ce type de finition offre une meilleure résistance au gel et sels de déverglaçage que la finition à l'hélicoptère (même brute) que l'on rencontre encore régulièrement dans la pratique. Un talochage poussé (aspect brillant) n'est pas autorisé pour des dallages extérieurs.



Fig 3.1.3
Dallage en cours de réalisation

3.1 Béton de dallage



Cure

Dès la fin des opérations de finition de surface, le béton sera protégé contre la dessiccation. Les différentes techniques de cure sont décrites au chapitre 2.8 consacré à la cure du béton. Une cure performante et soutenue aidera également à minimiser le risque de "cintrage", dû au retrait différentiel (retrait plus important en surface qu'en partie basse).

Joints

Par un choix et un placement correct des joints (fig 4.2.1), les contraintes dans le dallage en béton peuvent être limitées et on peut maîtriser la déformation et la fissuration du béton. Le schéma des joints doit être établi par le bureau d'études chargé de la conception de la dalle en béton avant de commencer l'exécution des travaux.



Fig 3.1.5
Sciage des joints de retrait

On distingue trois catégories de joints qui peuvent être appliqués lors de l'exécution de dalles en béton :

- ▶ les joints de retrait (voir chapitre 4.2), sciés dès que possible mais sans arrachement des bords (fig 3.1.5)
- ▶ les joints de désolidarisation
- ▶ les joints de structure et de dilatation.

En outre des joints de reprises peuvent être exécutés pour obtenir des raccords nets et propres entre des différentes phases d'exécution de la dalle.

Les joints provoquent des discontinuités dans le dallage. Le passage de roues peut donner lieu à des chocs (surtout dans le cas de roues dures de petit diamètre), ce qui peut occasionner des dégâts au matériel roulant et au joint proprement dit (en particulier en cas de trafic intensif). Des charges concentrées exercées à proximité des joints peuvent par ailleurs entraîner des affaissements qui accentueront encore ce phénomène. Les joints constituent donc des points faibles, qui se révèlent parfois plus néfastes que des fissures. Il est dès lors conseillé de ne pas prévoir plus de joints que ceux nécessaires.

3.2 Béton autoplaçant

Propriétés

Le béton autoplaçant (BAP), appelé aussi béton auto-compactant, se distingue des bétons ordinaires par :

- ▶ une fluidité importante permettant une mobilité sans ségrégation ni ressuage
- ▶ le dégazage du béton pendant l'écoulement
- ▶ un remplissage complet du coffrage, y compris toutes les réservations, les espaces entre les barres d'armatures avec un béton homogène
- ▶ l'absence de tout travail de compactage.

Le recours à un béton autoplaçant permet ainsi de simplifier le déroulement du chantier et comporte des avantages technologiques, comme le fait de pouvoir fabriquer des parties d'ouvrage complexes en une seule étape ou d'obtenir des bétons apparents d'un très bel aspect. Cette technologie permet de réduire le coût global des travaux et d'améliorer les conditions de travail (réduction de la pénibilité et des nuisances sonores).

Particularités techniques

Les formules BAP étant en général plus pointues que celles des bétons ordinaires, la formulation d'une composition adaptée à l'usage prévu nécessite des connaissances approfondies en technologie du béton.

Constituants du béton

Pâte

La quantité de pâte (eau + fines $\leq 0,125$ mm + adjuvants + air) nécessaire dans un béton autoplaçant est plus élevée que dans les bétons vibrés. Le rôle de la pâte est d'écarter les granulats et de diminuer les frottements entre eux, ce qui favorise l'étalement et l'aptitude au remplissage du béton.

D'une manière générale, la quantité de fines dans un BAP est de minimum 500 kg/m^3 . Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats.

La quantité d'eau efficace habituelle pour la fabrication du BAP est de l'ordre de 190 l/m^3 . L'obtention de la fluidité souhaitée des BAP se fait en utilisant des dosages importants de superplastifiant. Toutefois un dosage trop élevé peut augmenter la sensibilité du béton vis-à-vis de la ségrégation et du ressuage en cas de variations de teneur en eau.

Granulats

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP.

Etant donné que les gravillons risquent de provoquer le blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de pâte nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. Ces considérations conduisent à adopter un rapport G/S (rapport massique Gravillon/Sable) proche de 1 dans les BAP.

En général le diamètre maximal D_{max} des gravillons dans un BAP est inférieur ou égal à 16 mm.

Etant donné la proportion élevée de sable, il est particulièrement important de mesurer le taux d'humidité de cette classe granulaire et d'en tenir compte, sans quoi il est impossible de garantir la régularité des propriétés attendues du béton frais.

Propriétés du béton frais

En raison des particularités à l'état frais du béton autoplaçant, sa consistance ne peut être mesurée à l'aide des méthodes d'essai usuelles.

Des essais spécifiques, repris au tableau 3.2.1, ont été développés pour caractériser les propriétés du BAP. Des classes de propriétés spécifiques pour les BAP sont définies dans la NBN EN 206.

3.2 Béton autoplaçant

Caractéristique mesurée	Méthode d'essai	Description de l'essai
Consistance	Slumpflow selon NBN EN 12350-8	L'essai consiste à mesurer l'étalement du béton, sur une plaque, sans obstacle (fig 3.2.1). Il permet d'apprécier l'aptitude du béton à l'étalement et au remplissage en milieu non confiné.
Aptitude à l'écoulement	Boîte en L selon NBN EN 12350-10	L'essai consiste à observer et à mesurer la capacité à l'écoulement et au remplissage du béton au travers d'obstacles constitués de barres d'armatures (fig 3.2.2).
Viscosité	V-funnel selon NBN EN 12350-9	L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du béton au travers d'un orifice étroit (fig 3.2.3). Il permet d'apprécier l'aptitude à l'écoulement du béton.
Résistance à la ségrégation		Réitéré après 15 min de repos dans le moule, cet essai permet d'apprécier la sensibilité à la ségrégation du béton.
Résistance à la ségrégation	Essai au tamis selon NBN EN 12350-11	L'essai consiste à mesurer la capacité du béton, versé sur un tamis, à maintenir sa cohésion (fig 3.2.4).

Tab 3.2.1
Essais de caractérisation des BAP



Fig 3.2.1
Mesure du slumpflow



Fig 3.2.2
Essai de la boîte en L

Fig 3.2.4
Essai au tamis



Fig 3.2.3
Essai V Funnel



3.2 Béton autoplaçant

Fabrication, transport et mise en place

Pour le BPE (béton prêt à l'emploi), la fabrication, le transport et la mise en place du BAP se font avec le matériel habituellement utilisé pour les bétons ordinaires. On veillera toutefois à la parfaite étanchéité des malaxeurs, des cuvas et des coffrages utilisés.

Dans l'industrie de la préfabrication, il peut être nécessaire d'adapter le matériel de transport et de mise en place de ce béton très fluide et riche en pâte.

L'équipement des centrales à béton devra idéalement comprendre des stockages des granulats à l'abri de la pluie et un système fiable d'évaluation de l'humidité de chacune des fractions granulaires.

Il est recommandé de malaxer ces bétons le temps nécessaire à l'obtention d'une stabilisation complète du wattmètre. Le béton autoplaçant peut être transporté comme n'importe quel béton. On portera une attention particulière à l'absence d'eau dans le camion avant chargement, la propreté de l'intérieur de la cuve du mixer, le maintien en rotation lente pour éviter la ségrégation du béton.

A l'arrivée sur le site un remalaxage à grande vitesse pendant au minimum 1 minute/m³ est effectué juste avant déchargement.

Lors de la mise en place des BAP, on veillera particulièrement à l'étanchéité des coffrages.

La vitesse de mise en place du béton influence considérablement la qualité des parements. A cet égard, il convient notamment de faire en sorte que la vitesse de coulage soit adaptée à la consistance et à la viscosité du béton. Il est important que le béton s'écoule et se mette en place lentement dans le coffrage, afin qu'il ait suffisamment de temps pour éliminer de lui-même l'air excédentaire. Sinon, cet air risque de s'accumuler entre le béton et la peau du coffrage pour former des bulles d'air sur le parement.



Fig 3.2.5
Le BAP a permis la réalisation sans difficultés de formes concaves sans reprises de bétonnage sur la hauteur et avec une belle finition

3.2 Béton autoplaçant



Fig 3.2.6
Pompaggio
del cemento
autoplaçante
per il basso del
formo



Fig 3.2.7
Impiego del cemento
autoplaçante
(chape auto-
riparante) su
una superficie
orizzontale



Fig 3.2.8
Finitura della
barra di
debole



Fig 3.2.9
Vaporizzazione
di un prodotto
di cura

Le BAP peut être mis en place avec la plupart des méthodes conventionnelles, p. ex. à la grue, par pompage (par le haut fig 3.2.5 ou par le bas fig 3.2.6) ou encore directement par la goulotte du camion malaxeur. Pour éviter les ségrégations, le béton ne doit pas tomber en chute libre dans le coffrage, bien que le BAP ait moins tendance à ségréger en tombant qu'un béton vibré. La limitation de la hauteur de déversement, en plongeant la manchette de distribution dans le béton frais, permet aussi de prévenir l'occlusion d'air à l'intérieur du béton et le gros bullage de surface.

Pour les applications horizontales, les BAP peuvent être mis en œuvre par déversement direct depuis la goulotte du camion mixer, au cufa ou par pompage (fig 3.2.7). La finition de la surface est effectuée de préférence au moyen d'une barre de débullage (fig 3.2.8).

Des études ont montré que la pression exercée par les BAP sur les coffrages est égale à la pression hydrostatique lorsque la vitesse de montée du béton dans l'ouvrage est supérieure ou égale à 12 m/h.

Il est donc fortement recommandé de dimensionner les coffrages pour résister à la pression hydrostatique sauf si une étude particulière a été menée sur ce sujet ou si l'on effectue un monitoring de la pression exercée sur les coffrages à l'aide de capteurs.

La cure du béton autoplaçant doit intervenir dès la fin de la mise en œuvre (fig 3.2.9), en raison notamment de la quantité élevée de pâte, de l'absence de ressuage et du long maintien d'ouvrabilité qui peuvent accroître et accélérer les effets du retrait.

Enfin comme pour les autres bétons, le sciage des joints (si nécessaire) doit être effectué dès que possible.

3.2 Béton autoplaçant

Exemples d'utilisation

Les domaines d'utilisation du BAP sont très variés, depuis la construction de villas, de bâtiments, ainsi que d'ouvrages de génie civil à la préfabrication où les multiples avantages des BAP (absence de vibration, vitesse de mise en œuvre, réduction des nuisances sonores, qualité de surface, ...) sont fortement appréciés.

Sa bonne fluidité et sa capacité à expulser de lui-même

l'air excédentaire permettent notamment de résoudre les problèmes liés au bétonnage d'éléments à très forte densité d'armatures ou de forme compliquée (fig 3.2.10). En outre, la qualité des surfaces brutes de décoffrage rend superflu les coûteux travaux de ragréage et de retouche, qui sont généralement nécessaires dans le cas de murs et piliers coulés avec du béton conventionnel vibré.



Fig 3.2.10
Le BAP a permis la réalisation sans difficultés des formes complexes en réduisant les étapes de bétonnage

3.3 Béton fibré

Généralités

Le béton renforcé de fibres est un béton auquel on ajoute des fibres métalliques (fig 3.3.1) ou synthétiques, appelées également fibres polymères, au moment de la fabrication, afin d'améliorer le comportement du béton.

Il existe également d'autres types de fibres (voir chapitre 1.5). Elles sont moins couramment utilisées et ne seront pas abordées dans ce chapitre.



Fig 3.3.1
Béton
avec fibres
métalliques

Les principales caractéristiques des fibres sont reprises dans le tableau 3.3.1 :

	Béton	Fibres métalliques	Fibres synthétiques
Module d'élasticité	$\pm 30\,000\text{ N/mm}^2$	$\pm 210\,000\text{ N/mm}^2$	3 000 à 10 000 N/mm ²
Résistance à la traction	3 à 6 N/mm ²	500 à 2 000 N/mm ²	200 à 600 N/mm ²
Point de fusion		$\pm 1\,500^\circ\text{C}$	$\pm 165^\circ\text{C}$
Masse volumique absolue	$\pm 2\,400\text{ kg/m}^3$	$\pm 7\,850\text{ kg/m}^3$	$\pm 910\text{ kg/m}^3$
Longueur usuelle		30 à 60 mm	Micro: 6 à 20 mm Macro: 30 à 65 mm
Diamètre usuel		0,5 à 1,0 mm	Micro: 0,015 à 0,030 mm Macro: 0,5 à 1,0 mm
Norme produit		NBN EN 14889-1	NBN EN 14889-2

Tab 3.3.1
Principales
caractéristiques
des fibres
métalliques et
synthétiques

Les fibres métalliques et synthétiques n'ont pas le même usage. De nombreux paramètres doivent être pris en compte pour le bon choix des fibres : besoin structurel, risque de corrosion des fibres, esthétisme, usage final du béton, mise en œuvre, ...

3.3 Béton fibré

Les principaux champs d'applications des différents types de fibres sont repris dans le tableau 3.3.2 :

Application	Fibres métalliques	Micro-fibres synthétiques	Macro-fibres synthétiques
Renforcement structurel	✓		
Amélioration de la ductilité et de la résistance aux chocs	✓		✓
Limitation des fissures de retrait plastique		✓	
Limitation des fissures de retrait de dessiccation	✓		✓
Amélioration de la résistance à l'abrasion	✓		
Amélioration de la résistance au feu des BHP		✓	
Aptitude au bétonnage en pente	✓	✓	
Ouvrages temporaires	✓		✓
Réduction du ressuage		✓	

Tab 3-3.2
Usages des fibres

Influence des fibres sur la formulation du béton

Les bétons renforcés de fibres métalliques ont un besoin en pâte de ciment et de sable plus élevé pour un enrobage suffisant des fibres et pour une bonne finition de surface. En règle générale, on choisit une classe de consistance élevée (S4) pour la mise en oeuvre aisée.

L'incorporation de fibres dans le béton doit s'accompagner d'une adaptation du dosage en eau ou en adjuvant.

Les bétons renforcés de fibres métalliques pour des dalles industriels armés possèdent des teneurs en fibres atteignant jusqu'à 35 kg/m³. Les dosages plus élevés, de 35 à 80 kg/m³, ne sont employés dans la pratique que dans des cas particuliers, p. ex. lorsqu'une grande partie de l'armature passive est remplacée par des fibres métalliques.

Les dosages habituels des micro-fibres synthétiques varient entre 0,5 et 1 kg/m³ pour restreindre les effets du retrait plastique et entre 2 et 4 kg/m³ pour améliorer la résistance au feu. Les macro-fibres synthétiques sont dosées à raison de 3 à 10 kg/m³ pour augmenter la capacité porteuse.

Granulats

La longueur des fibres doit être adaptée au diamètre maximal du granulats. Le diamètre maximal du granulats peut influencer la répartition et l'orientation des fibres. Si la longueur des fibres est trop courte par rapport au diamètre maximal du granulats, les fibres seront écartées par le granulats et leur longueur sera insuffisante pour ponter de manière efficace les fissures entre les plus grands grains (fig 3.3.2). En général, la longueur de la fibre sera au moins 2 fois plus grande que le diamètre maximal du granulats.

Un granulats concassé ou à granularité discontinue combiné à un fort dosage en fibres peut influencer négativement l'ouvrabilité du béton.

3.3 Béton fibré

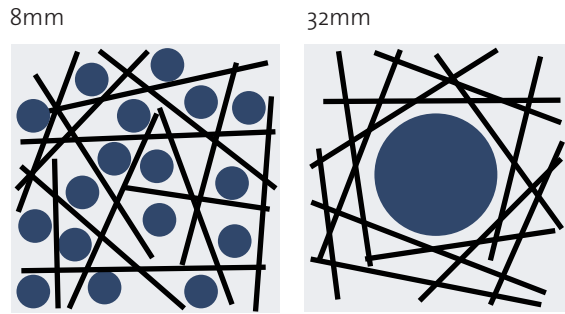


Fig 3-3.2

Influence du diamètre maximal du granulats sur la répartition des fibres : à gauche distribution homogène des fibres et du granulats, à droite écartement des fibres par un granulats à diamètre maximal trop grand

Influence des fibres sur la fabrication et la mise en place du béton

Malaxage

Idéalement, les fibres sont ajoutées au béton frais pendant le malaxage. Il faut veiller à une bonne séparation des fibres et à leur distribution homogène dans le béton frais. Il est préférable de mélanger d'abord le béton et introduire les fibres par la suite. La durée de malaxage humide n'augmente pas en cas de fibres métalliques. L'addition des fibres dans le malaxeur de la centrale à béton assure une répartition optimale des fibres. L'inconvénient peut être la présence de fibres résiduelles dans le malaxeur après vidange. Les fibres peuvent aussi être ajoutées dans le camion malaxeur, uniquement dans le cas des bétons fluides. Dans ce cas, il faut malaxer le béton à haute vitesse pendant minimum 5 minutes après rajout des fibres.

Les fibres pour des usages structurels ne doivent pas s'endommager, se plier ou se tordre pendant le malaxage. Si l'élanement des fibres (rapport entre la longueur et l'épaisseur) augmente, l'ouvrabilité diminue et la tendance à former des "pelotes" (appelées également "hérissons") de fibres se renforce. Dans la pratique, on choisit un élanement des fibres l/d (longueur/diamètre) de 50 à 80.

Les fibres synthétiques sont généralement incorporées dans le béton frais en sachets prédosés, solubles dans l'eau. Les fibres métalliques longues sont souvent livrées collées, en faisceaux (fig 1.5.4 a) qui se décomposent lors du malaxage. Le dosage de grandes quantités de fibres est optimisé avec des équipements automatisés qui facilitent le travail et permettent d'épargner du temps.

Mise en place et compactage

La mise en place du béton renforcé de fibres est en principe identique à celui du béton courant. En cas de pompage du béton renforcé de fibres métalliques, le diamètre maximal du granulats sera limité en général à 16 mm. Il faut veiller à utiliser un diamètre du tuyau de pompage suffisamment grand (120 mm) et une tuyauterie la plus directe possible afin de limiter les risques de bourrage.

Les bétons avec fibres métalliques nécessitent plus d'énergie de compactage que les bétons sans fibres. L'énergie de compactage nécessaire augmente avec la teneur en fibres. Les équipements habituels de compactage (aiguille vibrante, ...) ou de finition (hélicoptère, brossage, ...) peuvent être employés.

3.3 Béton fibré

Influence des fibres sur le comportement du béton

Propriétés mécaniques et structurales

L'addition de fibres métalliques et de macro-fibres synthétiques n'influence que légèrement la résistance à la compression et le module d'élasticité. Par contre, l'amélioration du comportement en traction et en flexion confère au béton fibré des caractéristiques structurales intéressantes.

Le béton sans fibres se caractérise, lors d'un essai de traction ou de flexion, par une rupture quasi immédiate lorsque la résistance maximale à la traction est atteinte (fig 3.3.3, courbe bleue). Le béton sans fibres se comporte de façon "fragile".

Au contraire, pour le béton avec fibres, la résistance ne retombe pas à zéro en cas d'effort de traction ou de flexion, mais reste à un niveau de résistance dit résiduelle (fig 3.3.3, courbe rouge). Le niveau de la résistance résiduelle dépend logiquement du type et de la quantité de fibres, qui influencent l'adhérence des fibres à la pâte de ciment et l'énergie nécessaire pour les arracher du béton. Le béton fibré se comporte de façon "ductile".

A noter que l'addition de fibres ne change pas la résistance initiale à la traction ou à la flexion ; les fibres ne vont pas éliminer le risque d'apparition de fissures.

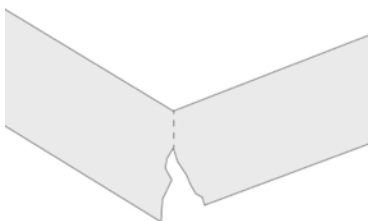
Ces principes permettent de comprendre le comportement d'un élément structural en béton fibré : à l'endroit de la première fissuration, l'arrachement partiel des fibres reliant les deux faces de la fissure permettra de mobiliser la résistance résiduelle et éviter que cette fissure ne se propage davantage. En revanche, vu le niveau élevé de résistance au niveau de la première fissure, d'autres fissures apparaîtront non loin de la première fissure. L'addition de fibres réduit en d'autres mots l'ouverture des fissures par la formation d'une multitude de très petites fissures qui sont en général sans conséquences (fig 3.3.4).

Les macro-fibres synthétiques se caractérisent par une facilité d'utilisation et un faible coût par rapport à celui des fibres métalliques. Cependant, en raison de leur dégradation potentielle lors d'une exposition prolongée aux UV, elle seront de préférence utilisées dans les constructions temporaires.

Résistance au feu

L'addition de fibres synthétiques peut augmenter la résistance au feu des bétons à haute ou ultra-haute résistance. En cas d'incendie, la fusion des fibres (point de fusion 165°C environ) crée un réseau de pores et permet de réduire la pression de la vapeur d'eau qui se crée dans le béton. Ainsi on peut éviter les éclatements du béton.

Sans fibres



Avec fibres



Fig 3.3.4

Effet inhibiteur et dispersif des fibres. Comparaison d'un béton avec et sans fibres

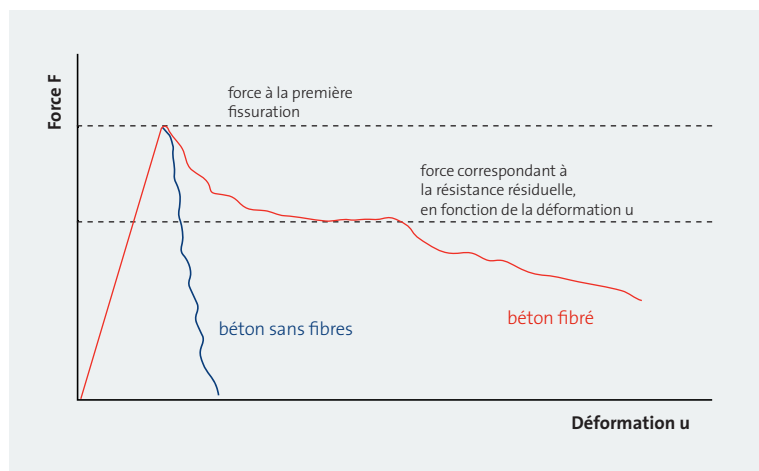


Fig 3.3.3

Diagramme contrainte-déformation pour des bétons avec et sans fibres

3.4 Béton apparent



Fig 3.4.1
Béton coloré
coulé dans
un coffrage
matrice

Généralités

On désigne par béton apparent toute surface de béton horizontale ou verticale qui reste visible et doit donc satisfaire à des critères esthétiques plus stricts.

On distingue fondamentalement deux modes de réalisation de surfaces en béton apparent. Dans un cas, on utilise le coffrage comme élément de structuration de la surface. Dans l'autre, la surface est retravaillée après le décoffrage. Dans les deux cas, la pigmentation du béton peut être une caractéristique esthétique supplémentaire.



Fig 3.4.2
Façade
en béton
apparent brut

Pour obtenir des surfaces apparentes d'aspect régulier, l'état des coffrages, la composition et la fabrication du béton ainsi que sa mise en place doivent satisfaire à des critères extrêmement exigeants :

- ▶ type et matériau pour la peau du coffrage
- ▶ nombre d'utilisations et état de propreté du coffrage
- ▶ joints de travail (arrêts et reprises de bétonnage)
- ▶ rigidité du système de coffrage
- ▶ quantité et type d'huile de décoffrage
- ▶ composition et fabrication du béton
- ▶ mise en place et compactage du béton
- ▶ conditions météorologiques lors de la réalisation et de la cure.

La norme NBN B15-007 traite de l'aspect esthétique du béton apparent et comprend des exigences pour les caractéristiques visuelles, telles la texture, le nombre et la dimension des bulles d'air et l'homogénéité de la teinte. Elle offre la possibilité de spécifier et évaluer objectivement des exigences d'un point de vue esthétique.

Malgré tout le soin apporté au choix des constituants, à la composition et à la fabrication des bétons, il faut toujours garder à l'esprit l'origine naturelle des matières et leurs imperfections potentielles.

Constituants

Ciment

Tous les ciments conformes à la norme NBN EN 197-1 conviennent en principe à la fabrication de béton apparent. Comme la couleur du béton à la surface est influencée par celle du ciment, ainsi que par celle de la classe granulaire fine, il ne faudrait changer ni de type de ciment ni de centrale de béton prêt à l'emploi pendant l'exécution d'un ouvrage.

- ▶ Le ciment Portland (CEM I) produit des surfaces de béton d'un gris caractéristique.
- ▶ Le ciment blanc est un ciment ayant fait ses preuves dans la fabrication d'éléments en béton remplissant une fonction esthétique. Sa couleur blanche en fait également une excellente base pour la fabrication de bétons teintés.
- ▶ Le ciment de haut fourneau (CEM III) confère aux surfaces de béton une teinte nettement plus claire, après séchage, que le ciment Portland traditionnel grâce au laitier de haut fourneau qu'il contient. Les nuances typiques de couleur bleue-verte que l'on observe après le décoffrage disparaissent d'elles-mêmes après séchage.

3.4 Béton apparent



Fig 3.4.3
Structure
matricée du
voile obtenue
par un
coffrage
en planches
de bois

Eau

L'eau du réseau ou l'eau de puits peuvent être utilisées pour la fabrication du béton apparent. En revanche, les eaux de lavage recyclées doivent être évitées en raison de leur influence possible sur la coloration et sur les autres propriétés du béton.

Granulats

Le béton apparent situé à l'extérieur doit résister au gel et aux intempéries, ce qui implique la sélection de granulats non gélifs. La couleur du béton apparent est influencée non seulement par le ciment mais aussi par la couleur des classes granulaires fines. Lorsque la surface apparente est travaillée après décoffrage, la couleur des classes granulaires supérieures a aussi son importance. Par conséquent, il faut veiller à ne pas faire varier l'origine des granulats pendant la réalisation d'un ouvrage en béton apparent.

Adjuvants

Les plastifiants et superplastifiants permettent d'obtenir une consistance plus fluide, et par là une meilleure ouvrabilité du béton, sans modifier le dosage en eau. Les adjuvants n'ont aucun effet direct significatif sur la couleur du béton apparent. Les adjuvants peuvent également être utilisés pour réduire le rapport E/C tout en maintenant une consistance donnée, ce qui permet d'améliorer maintes propriétés du béton durci, mais modifie aussi légèrement la teinte des surfaces du béton. En effet, un béton contenant moins d'eau aura une teinte plus foncée après durcissement.

Ajouts et additions

Les principaux ajouts et additions utilisés dans la formulation des bétons apparents sont le filler minéral et les pigments, qui servent à teinter le béton (voir chapitre 1.5).

3.4 Béton apparent



Fig 3.4.4
Immeuble
d'habitation



Fig 3.4.5
Béton
désactivé



Fig 3.4.6
Escalier en
béton imprimé

Composition du béton

L'expérience a montré qu'il s'avère judicieux de ne pas abaisser le dosage en ciment des bétons apparents en-dessous de 350 kg/m^3 .

Le rapport E/C devrait être choisi le plus bas possible afin de limiter les remontées d'eau.

La teneur en fines (comprenant le ciment, les additions et les éléments fins des granulats) doit au moins atteindre les valeurs indiquées au tableau 1.3.4. La granularité doit être continue.

Consistance

Une consistance adéquate constitue une condition indispensable à la mise en oeuvre du béton apparent. Les classes de consistance S3 et S4 sont appropriées afin d'assurer l'enrobage complet des armatures.

Fabrication et mise en œuvre du béton

Le premier point à relever est que le rapport E/C doit être le même pour chacune des gâchées, quel que soit le taux d'humidité des granulats car une variation de $\pm 0,02$ de ce rapport entraîne déjà des différences de teinte visibles à l'oeil nu sur des surfaces lisses. En outre, la durée de malaxage du béton apparent devrait si possible être toujours identique (au moins 50 secondes). Idéalement, la température du béton frais, qui influence la réactivité du ciment, devrait également être la même, car une différence de vitesse d'hydratation peut entraîner des différences de couleur.

3.4 Béton apparent

Le compactage doit être réalisé de manière régulière, pas trop intensive et par petites couches. On veillera particulièrement à ne pas faire vibrer les armatures de façon à éviter les différences de teintes locales.

D'une manière générale, les conditions météorologiques au moment de la mise en place du béton jouent un rôle plus important pour le béton apparent que pour les autres bétons. L'hydratation du ciment est une réaction chimique qui est plus rapide lorsque les températures sont élevées et qui ralentit lorsqu'elles sont basses. Le degré d'hydratation est en outre aussi fonction de l'humidité ambiante. Ainsi, le béton n'aura pas la même couleur s'il s'hydrate pendant une période froide et sèche ou, au contraire, chaude et humide. Les variations d'humidité de l'air influencent également l'humidité de la peau du coffrage, ce qui se traduit par des variations de couleur de la surface du béton.

Toutes ces raisons font que la météo n'est pas sans importance pour la réalisation d'un ouvrage en béton apparent.

Décoffrage

Au moment du décoffrage du béton apparent, il faut s'assurer que tous les éléments sont restés coffrés pendant une même durée (voir chapitre 2.8). En outre, chaque partie d'ouvrage coulée d'un seul tenant devrait être décoffrée en une fois.

Les surfaces décoffrées doivent rester libres (pas d'appui d'éléments de coffrage), afin d'éviter l'apparition de taches.

Les voiles en béton apparent ne devraient pas être décoffrés avant ou pendant de fortes précipitations, et ils ne doivent en aucun cas être aspergés d'eau juste après avoir été décoffrés. Le rythme du décoffrage doit également être choisi en sorte que tous les éléments restent coffrés pendant une même durée. A cet égard, il faut également prendre en compte les congés de fin de semaine et les jours fériés.

Protection du béton

La protection du béton de parement poursuit principalement les deux objectifs suivants :

- ▶ garantir une hydratation homogène de la zone de surface du béton pour une bonne régularité de la teinte
- ▶ protéger la surface de béton de parement et l'armature de raccordement des précipitations.

Pour le béton de parement, les mesures de protection suivantes sont recommandées :

- ▶ recouvrement des surfaces de béton décoffrées avec des films plastiques en tant que protection contre l'évaporation (éviter le contact direct du film avec le béton, prévenir l'effet de cheminée, pas de bandes collantes pour fixer les films)
- ▶ maintien de l'humidité mais sans condensation de l'eau, pour éviter des efflorescences (par exemple libérer les coffrages mais sans les retirer)
- ▶ protection des arêtes et angles contre des dégâts mécaniques
- ▶ ne pas exposer les surfaces de béton de parement directement aux fortes pluies ou ne pas les asperger avec de l'eau
- ▶ étude soignée de l'évacuation d'eau des surfaces de façade dans les zones exposées aux intempéries et les acrotères
- ▶ emballage des armatures en saillie (armature de raccordement) avec une feuille de plastique afin d'éviter les coulures de rouille.



Fig 3.4.7
Sol en
béton
décoratif

3.4 Béton apparent



Fig 3.4.8
Béton
imprimé

Conception des surfaces

Les surfaces peuvent être conçues non seulement par le choix de la peau de coffrage et la disposition des joints et points d'ancrages, mais aussi par d'autres moyens, par exemple :

- ▶ les empreintes
- ▶ le traitement de surface
- ▶ le béton coloré.

Empreintes

Un effet particulier architectural est obtenu à l'aide des empreintes individuellement structurées (fig 3.4.6 et 3.4.8), insérées dans le coffrage ou posées sur le béton frais. Les possibilités de création vont d'une surface avec imitation de pierres naturelles jusqu'aux images produites sur la surface par des effets d'ombres et de lumières.

Traitement de surface

Il existe plusieurs techniques de traitement de surface des bétons, dont les principales sont reprises dans le tableau 3.4.1.

Une bonne maîtrise de ces techniques est requise afin d'assurer une uniformité du résultat.

Procédé	Description
Désactivation (fig 3.4.5)	Un retardateur de prise recouvre les parois du coffrage ou est pulvérisé à la surface du béton dès la fin de la mise en œuvre. La surface du béton ne durcit donc pas. Une pellicule de béton non durci est ensuite éliminée par jet d'eau. L'effet varie selon la profondeur d'action et le délai avant lavage. Il est également influencé par la pâte de ciment ainsi que la forme et la couleur du granulats.
Sablage ou grenailage	La surface à traiter est sablée sous haute pression à l'aide de grenailles d'acier. Un sablage léger rend visible le grain du sable ; un sablage intense met les gravillons en évidence. Plus le sablage est intense, plus la surface devient mate.
Ponçage et polissage (fig 3.4.9)	La surface du béton est poncée puis éventuellement polie. La profondeur de ponçage et la finesse de polissage influencent le rendu final de la surface : la teinte de la pâte de ciment est dominante pour un léger ponçage, tandis que la couleur du gravillon domine lorsque le ponçage est plus profond. La finesse de grain utilisée pour le polissage renforce l'éclat du béton poli.
Bouchardage (fig 3.4.10)	Le bouchardage confère un aspect rugueux de pierre naturelle. Il consiste à marteler la surface du béton durci avec des burins à pointes. Les effets de surfaces sont différents suivant la profondeur de frappe (de 1 à 8 mm) et les outils utilisés.

Tab 3.4.1
Traitements
de surface du
béton
apparent

3.4 Béton apparent

Lors du traitement des surfaces il faut veiller à conserver l'enrobage minimal d'armatures exigé et à choisir des écarteurs appropriés afin qu'ils n'apparaissent pas à la surface du béton.

Béton coloré

Normalement, le béton coloré est confectionné avec du ciment blanc, coloré à l'aide de pigments. La coloration peut être soutenue par l'emploi d'un granulats colorés, mis à jour par un traitement ultérieur de la surface du béton. Les bétons fabriqués avec des ciments gris peuvent également être colorés, mais l'effet sera moins pur et lumineux. L'intensité de la coloration dépend du dosage et de la qualité des pigments. Pour obtenir la coloration la plus intense possible, il faut doser les pigments jusqu'à saturation (teneur en pigments de l'ordre de 3 à 6% en masse de la teneur en ciment).

Les pigments sont ajoutés sous forme de granulés, de poudre ou de liquide. Un traitement hydrofuge des surfaces de béton coloré est recommandé.



Fig 3.4.9
Béton poli

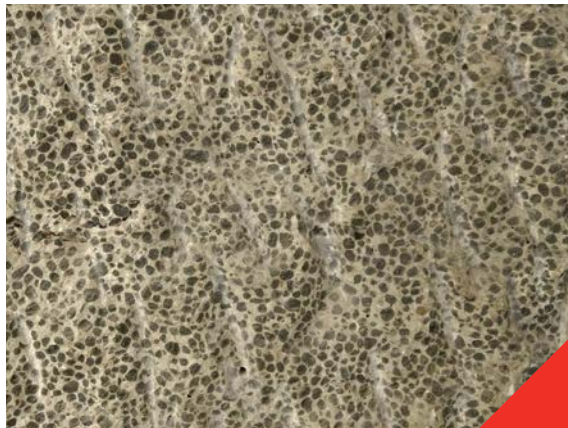


Fig 3.4.10
Béton
bouchardé



Fig 3.4.11
Bâtiment en
béton coloré

3.5 Béton de route

Généralités

Les revêtements routiers sont des éléments de construction fortement sollicités par les charges du trafic, l'abrasion, les cycles thermiques journaliers et les effets du gel en présence de sels de déverglaçage. Les couches de surface doivent présenter une haute durabilité, notamment sous un trafic intense avec d'importantes charges par essieu. Les ornières connues avec les revêtements bitumineux n'apparaissent pas dans des revêtements en béton grâce à leur meilleure répartition des charges, leur plus grande rigidité et stabilité dimensionnelle, même sous des températures élevées. Il en résulte une longue durée de service et de faibles coûts d'entretien.

La sécurité du trafic est influencée positivement par la bonne qualité antidérapante, et la teinte claire de la surface des revêtements en béton.

Les revêtements en béton sont utilisés avantageusement pour les surfaces de roulement fortement sollicitées comme les autoroutes, les giratoires, les arrêts de bus, les pistes d'aéroports et des terminaux routiers ou encore pour des chemins agricoles. Une prise en compte précise de tous les détails constructifs et une exécution soignée sont importantes pour remplir les hautes exigences posées à la qualité et la mise en œuvre du béton.

Contexte réglementaire

Les spécifications relatives aux constituants, à la composition et à la mise en œuvre des bétons routiers sont reprises dans les cahiers des charges types (CCT) des différentes régions, à savoir CCT Qualiroutes en Wallonie, CCT relatif aux voiries de la Région de Bruxelles Capitale ou le SB (Standaardbestek) 250 en Flandre.

Formulation du béton

Une haute résistance à la compression et à la flexion ainsi qu'au gel en présence de sels de déverglaçage et à l'abrasion sont indispensables pour une durabilité suffisante. De manière générale, la résistance à l'abrasion est obtenue au travers des résistances mécaniques et d'une cure soignée de la surface du béton, mais aussi par une qualité élevée du granulat.

Ciment

Les cahiers des charges régionaux spécifient des ciment de type CEM I LA ou CEM III/A LA de classe de résistance 42,5.

Granulats

En général, les couches de surface en béton sont confectionnées avec un granulat concassé d'un diamètre maximal de 20 mm. Pour des revêtements bicouches, la couche inférieure (15 à 20 cm d'épaisseur) peut contenir des granulats plus gros (jusqu'à 31,5 mm), alors que les granulats plus petits (calibre 4/6,3) sont utilisés dans la couche supérieure du revêtement. Ceci permet d'obtenir des surfaces à plus faibles émissions sonores.

Une résistance au polissage (PSV) minimale de 50 est exigée pour l'emploi dans des couches de surface en béton. Une bonne résistance à l'usure (MDE) et résistance à la fragmentation (LA) sont également nécessaires. L'utilisation de gravillons roulés n'est pas autorisée.

Adjuvants

Outre les plastifiants habituellement utilisés, des entraîneurs d'air sont employés pour les couches de surface en béton afin de rendre le béton résistant au gel. L'efficacité de l'entraîneur d'air utilisé sera validée en mesurant la teneur en air du béton.

Consistance

Les engins de mise en place (machines à coffrage glissant, appelées également paver (fig 3.5.1)) habituellement utilisés demandent des bétons de consistance ferme (classe de consistance S₁), pour que les faces latérales de la couche de béton frais ne se tassent pas. Il ne doit pas se former en surface du béton de pellicule de mortier fin, ceci indépendamment du mode de mise en place.

3.5 Béton de route

Mise en œuvre du béton

Mise en place et compactage

Le béton peut être mis en place en une ou deux couches. Une mise en place monocouche exige que toute l'épaisseur de béton ait la qualité d'une couche supérieure et nécessite par conséquent des grandes quantités de gravillons de haute qualité. Avec la mise en place en deux couches, seul le béton supérieur exige des granulats d'excellente qualité, tandis que le béton inférieur peut être confectionné avec un granulats recyclés ou local. Cependant, le système monocouche permet des économies sur le coût des machines et du personnel.

La mise en place manuelle de petites surfaces (p. ex. giratoires ou arrêt de bus) ou la mise en place dans des conditions d'espace restreint se font à l'aide d'un coffrage fixe, qui doit être bien ancré et fermement appuyé sur le sol, puisqu'il sert de référence de nivellement.

Le béton doit être réparti régulièrement sur toute la largeur. Les ségrégations ou pré-compactages incontrôlés sont à éviter. Dans le cas d'un système bicouche, le béton inférieur et supérieur peuvent être mis en place à l'aide d'une finisseuse glissante travaillant en deux couches ou par deux finisseuses l'une à la suite de l'autre. Il faut alors veiller à respecter le nivellement correct du béton inférieur pour assurer l'épaisseur minimale de 4 à 5 cm du béton supérieur. Le béton inférieur ne peut précéder le béton supérieur qu'à la mesure que le béton inférieur ne montre pas de signes visuels de dessiccation ni semble prendre prise avant le compactage. Le béton supérieur est posé "frais sur frais" pour l'obtention d'une adhérence durable entre les deux couches. Le revêtement en béton se comporte donc de façon monolithique et est capable de supporter des contraintes externes et internes sans dégâts.

Le béton doit être compacté régulièrement et complètement sur toute la section. Les machines à coffrage glissant compactent le béton sur toute la largeur de mise en place à l'aide d'aiguilles vibrantes qui sont maintenues en hauteur et en direction. Leur écartement est déterminé en fonction de leur rayon d'action.

Il faut éviter l'apparition de "chemins de vibration" (enrichissement en mortier fin). D'autre part, l'avancement régulier de la machine prévient des inégalités dues à un compactage irrégulier.

Lorsque la mise en place est manuelle, il faut, après le premier compactage au moyen d'aiguilles vibrantes, compléter l'opération avec d'autres engins (poutres vibrantes), agissant sur toute la largeur de mise en place.

Afin de préparer la route pour le surfacage final (voir ci-après), le lissage des revêtements posés au paver est effectué par un dispositif automatique ("supersmoother") qui permet d'obtenir la planéité requise (fig 3.5.2). Dans le cas d'une mise en place manuelle, le lissage est exécuté au moyen d'une règle ou d'une poutre vibrante. Le lissage poussé à l'hélicoptère est fortement déconseillé. Ce type de finition entraîne la formation d'une fine couche de mortier, riche en éléments fins à la surface, qu'il faut limiter au maximum car néfaste à l'adhérence des véhicules d'une part et peu résistante au gel d'autre part.



Fig 3.5.1
Machine à coffrage glissant



Fig 3.5.2
Lissage automatique du béton

3.5 Béton de route

Surfaçage

Le surfaçage final, après le compactage et le lissage de la couche de béton, confère au revêtement la qualité anti-dérapante requise pour l'usage prévu.

Brossage

Sur la plupart des chantiers, après le lissage, la surface peut être structurée à l'aide d'une brosse. Cette opération s'effectue depuis une plateforme de travail (fig 3.5.3 et 3.5.4) ou depuis le côté du revêtement venant d'être coulé, en tirant la brosse en sens transversal par rapport à la route.



Fig 3.5.3
Brossage du
béton en
surface



Fig 3.5.4
Surface
finie du béton,
obtenue par
brossage



Fig 3.5.5
Surface
finie du béton,
obtenue par
désactivation

Désactivation de surface

L'exécution de bétons lavés (désactivés) composés de granulats fins (de granulométrie 4/6 ou 4/8) en surface constitue le standard pour la construction des autoroutes en béton en Belgique (fig 3.5.5). Ce procédé requiert la pulvérisation d'un retardateur empêchant la surface de durcir directement après le lissage du béton. Ce produit sert également de cure. Le surfaçage final a lieu après sciage éventuel des joints transversaux et consiste à traiter la surface du béton au moyen d'un engin muni de brosses rotatives qui enlève toutes les particules non durcies de la surface du béton.

Cure

Il est très important de pulvériser, immédiatement après la pose et la finition du béton, un produit de cure à la surface du revêtement. Il est sans influence sur la texture de surface du revêtement.

La quantité à pulvériser doit être choisie en fonction du produit de cure et de la rugosité de la surface, de manière à obtenir une fine pellicule continue. La quantité varie généralement en fonction de la structure de la surface entre 150 et 200 g/m². Un excès de produit de cure peut retarder son élimination naturelle ou réduire la qualité antidérapante initiale du revêtement.

Les surfaces traitées avec des produits de cure doivent rester fermées à la circulation tant que l'on ne peut pas exclure des dommages à la pellicule de protection et la dessiccation précoce du béton qui en résulte (généralement 7 jours).

Les produits de cure sont généralement de couleur blanche ou métallisée afin de réfléchir les rayons du soleil et de limiter l'échauffement du béton.

Le recouvrement des revêtements en béton au moyen de feuilles plastiques est une mesure très efficace contre la pluie battante et comme traitement de cure, pour autant qu'il reste en place durant le nombre de jours requis (voir chapitre 2.8).

3.5 Béton de route

Armatures et joints

Divers types de construction de routes ou de dalles industrielles en béton sont possible.

Dalles courtes en béton non armé

Ces revêtements sont constitués d'une succession de dalles dont la longueur est limitée à environ 25 fois l'épaisseur. Les pratiques actuelles recommandent toutefois de ne plus dépasser une longueur de 5 m (4 m pour les pistes cyclables), que les joints soient ou non munis d'un dispositif de transfert des charges (goujons). Les mouvements dus aux variations de température et d'humidité sont concentrés dans les joints. Ces derniers sont normalement scellés pour éviter les entrées d'eau dans la chaussée. La largeur des dalles est limitée à maximum 4,5 m.

Béton armé continu

Les revêtements en béton armé continu se caractérisent par l'absence de joints transversaux. Ils sont pourvus d'une armature longitudinale en acier (fig 3.5.6) dont la section est calculée pour maîtriser la fissuration et la répartir de façon homogène avec une entre-distance moyenne comprise entre 1 et 3 m. L'ouverture des fissures doit rester faible, et en tout cas inférieure à 0,3 mm. L'application d'une amorce de fissure à des intervalles de 1,2 à 1,5 m peut également aider à la bonne répartition des fissures.

Dalles armées

Les dalles armées sont peu utilisées, sauf dans les sols industriels intérieurs ou extérieurs lorsque les sollicitations sont importantes et que l'on souhaite minimiser le nombre de joints de retrait.

Béton armé de fibres d'acier

Ce type de béton est également principalement réservé aux sols industriels (stockage portuaire, parking poids lourds, terrains logistiques, ...) où les cas d'applications sont nombreux. Pour les revêtements routiers, ces bétons ne sont préconisés qu'en cas de dalles minces ou très minces et pour des applications particulières.



Fig 3.5.6
Béton armé continu en cours de coulage

3.6 Béton à hautes performances

Propriétés

Les BHP (Bétons à Hautes Performances) se distinguent des bétons ordinaires par leurs très hautes résistances à la compression. En général, on associe les BHP à des classes de résistance caractéristique supérieures à C50/60.

Les propriétés principales de ces bétons sont :

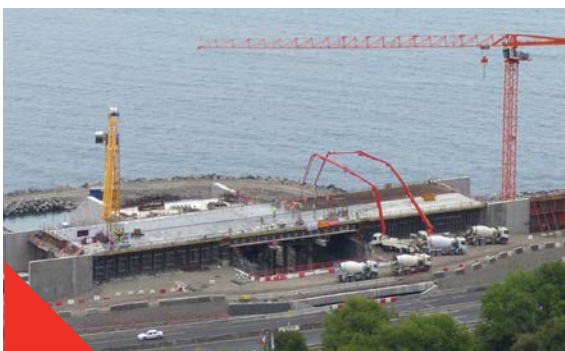
- ▶ une augmentation des caractéristiques mécaniques tant à jeune âge qu'à long terme (compression, traction, module d'élasticité)
- ▶ une porosité très faible, conduisant à une meilleure résistance aux agents agressifs, aux cycles de gel dégel et à l'abrasion.

En outre ces bétons se caractérisent généralement par une fluidité importante. L'utilisation de ces bétons permet, selon les caractéristiques recherchées, de réduire les sections des pièces en béton, d'augmenter les portées des éléments en béton (fig 3.6.1), ou de garantir une durabilité accrue d'un ouvrage (fig 3.6.2).

Fig 3.6.1
Poutres
longues
portées en
BHP



Fig 3.6.2
Ouvrage côtier
en béton,
résistance
moyenne 65
N/mm² à 28j
et 80 N/mm²
à 90 jours
(cylindres).
Engagement
sur une
durabilité
centennale



La course aux performances

L'obtention de résistances à la compression de plus en plus élevées s'est faite en passant par les étapes suivantes :

- ▶ augmentation du dosage en ciment
- ▶ réduction du E/C
- ▶ extension du squelette granulaire.

L'augmentation des dosages en ciment permet d'obtenir des résistances allant jusque 40 à 50 N/mm². La réduction du E/C en deçà de 0,40 permet d'atteindre des bétons de résistance supérieure à 80 N/mm².

L'ajout de particules ultrafines, qui comblent les micro-vides intergranulaires, permet de diminuer la compacité du béton. Ces ultrafines, combinées à l'utilisation de superplastifiants performants, permettent également d'améliorer l'ouvrabilité du béton et ouvrent la voie à une nouvelle diminution du rapport E/C. Cette extension du squelette granulaire et des rapports E/C allant jusque 0,35 permettent d'obtenir des résistances de 100 N/mm² et plus.

Constituants du béton

Ciment

Tous les types de ciments peuvent être utilisés. Ils seront toutefois généralement de type CEM I et de classe 52,5. Les dosages peuvent dépasser les 400 kg/m³.

Additions

En cas d'utilisation d'additions, la fumée de silice est la plus utilisée pour la formulation des BHP. Leur ajout permet une réduction importante de la porosité du béton. Les fumées de silice ont une finesse extrêmement élevée (environ 100 fois plus fin que le ciment) et possèdent des propriétés pouzzolaniques.

Lors de l'hydratation d'un béton normal, des pores subsistent toujours dans la pâte et aux interfaces entre les granulats et les grains de ciments hydratés. La fumée de silice vient remplir ces espaces. Les micro-sphères de fumée de silice réagissent, grâce à leur caractère pouzzolanique, avec la portlandite dégagée par l'hydratation du clinker pour former des hydrates qui comblent ces pores, ce qui conduit à une très faible porosité résiduelle du béton.

La quantité de fumée de silice optimale est généralement de l'ordre 6 à 10% de la teneur en ciment.

3.6 Béton à hautes performances

Granulats

Habituellement, le béton de résistance normale montre en compression une rupture sous l'effet de la traction transversale le long de la zone de contact entre le granulats et la pâte de ciment ou au sein de la pâte de ciment (fig 3.6.3 haut).

Dans le cas du BHP, grâce au faible rapport E/C et la faible porosité capillaire, cette zone de contact est plus dense et donc renforcée. La rupture ne suit dès lors pas la zone de contact, mais fracture le granulats (fig 3.6.3 bas). L'emploi de granulats de roche dure (par exemple porphyre) est donc recommandé pour la formulation des BHP.

Pour assurer le dosage en eau restreint du béton à haute résistance, on veillera particulièrement à la propreté du sable. De même, le sable présentera de préférence une granularité continue et de haute régularité ainsi qu'une faible teneur en fines.

Le diamètre maximal du granulats est, en règle générale, réduit à 16 mm. En effet, le module d'élasticité des gravillons est supérieur à celui de la pâte de ciment durcie. Il peut donc y avoir une différence importante de module à l'interface entre le gravillon et la pâte, ce qui se traduirait par une concentration de contraintes localisées.

Le choix d'un grain de plus petite dimension permet de mieux distribuer ces concentrations de contraintes dans le béton. Le diamètre maximal ne peut pas se réduire trop fortement car, à défaut, la quantité d'eau nécessaire au mouillage des granulats augmentera trop fortement.

Superplastifiants

Les dosages en superplastifiants sont généralement élevés. Ceci permet de réduire fortement la quantité d'eau et d'atteindre des E/C inférieurs à 0,40 et allant même jusque 0,25 - tout en gardant une ouvrabilité importante. Ce haut dosage en superplastifiant s'accompagne généralement d'une viscosité élevée et d'un comportement thixotrope du béton.



Fig 3.6.3
Surface de rupture du béton à résistance normale (en haut) et de BHP (en bas)

3.6 Béton à hautes performances

Propriétés du béton frais

Ouvrabilité

La quantité importante de pâte et un dosage important de superplastifiant permettent d'obtenir des bétons ayant une consistance importante. Des affaissements de 180 à 200 mm sont courants pour ce type de béton.

Dégagement de chaleur

En raison de la teneur élevée en ciment, le dégagement de chaleur inhérent au processus de l'hydratation est plus important dans le béton à hautes performances par rapport au béton ordinaire. Cette élévation importante de température doit être prise en compte dès la conception du projet. Les risques liés au retrait et à la fissuration thermique doivent être évalués. Des mesures visant à éviter le retrait thermique empêché ainsi que des différentiels de température trop importants au sein du béton doivent être prises (voir chapitre 4.2). Les risques liés au développement de réaction sulfatique interne doivent être maîtrisés (voir chapitre 4.7).

Afin de limiter la température maximale atteinte dans le béton, les mesures suivantes peuvent notamment être envisagées :

- ▶ Limiter autant que possible l'épaisseur des pièces massives lors du dimensionnement, prévoir des réservations pour permettre le dégagement de chaleur.
- ▶ Remplacer partiellement du CEM I par un ciment à base laitier.
- ▶ Éviter de bétonner aux heures les plus chaudes de la journée, et éviter les attentes prolongées avant bétonnage en zone ensoleillée.

Propriétés du béton durci

Résistance à la compression

Au jeune âge, les résistances mécaniques des BHP sont généralement plus hautes car leur cinétique de durcissement est plus rapide en raison des dosages élevés en ciment et des faibles rapport E/C.

A long terme, lorsqu'un béton normal est comprimé, des fissures d'adhérence apparaissent à l'interface entre la matrice mortier et le granulat puis se propagent à toute la matrice de mortier. Le béton cède sous l'effet d'un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subissent aucun dommage.

Le béton à hautes performances se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice. L'apparition et le développement de fissures d'adhérence sont donc retardés. En outre, la résistance de la matrice et des granulats est proche. La rupture se fait donc par une fissuration traversant la matrice et les granulats. Mais dès l'atteinte de la résistance de rupture, la portance tendra très rapidement vers une valeur nulle. C'est ce qu'on appelle un comportement de rupture fragile.

Résistance à la traction

Généralement, la résistance à la traction est liée à la résistance en compression. Cependant, le gain de résistance à la traction est moindre dans le cas d'un BHP. Un C30/37 aura par exemple un rapport de 1/10 entre la résistance à la compression et la traction alors qu'un béton C 80/95 aura un rapport de 1/15.

L'ajout de fibres dans le béton permet d'augmenter le niveau de résistance résiduelle à la traction (voir chapitre 3.3).

Module d'élasticité

Etant donné la grande compacité des BHP et la très faible proportion de vides, le module d'élasticité de ces bétons est nettement plus élevé que pour des bétons traditionnels.

Il sera de l'ordre de 37 000 à 45 000 N/mm² contre environ 32 000 à 33 000 N/mm² pour un béton à résistance normale.

3.6 Béton à hautes performances

Retrait et fluage

L'évolution du comportement à la déformation au cours du temps du béton à haute résistance est influencée par sa porosité réduite, son module d'élasticité et sa densité plus élevés. Les changements majeurs observés en comparaison avec le béton à résistance normale sont :

- ▶ le retrait endogène est nettement plus élevé
- ▶ le retrait de dessiccation diminue clairement lorsque la résistance augmente
- ▶ la déformation due au fluage diminue lorsque la résistance augmente et atteint sa valeur finale plus rapidement.

Le retrait endogène du béton à hautes performances est plus important que celui du béton à résistance normale. En revanche son retrait de dessiccation est plus faible. Il en résulte finalement une valeur ultime de retrait plus petite que celui du béton à résistance normale (voir la définition des différents retraits au chapitre 4.2).

La montée en résistance nettement plus rapide du béton à haute résistance conduit également à un développement rapide de la chaleur d'hydratation. Les éléments de construction entravés dans leur déformation subissent alors au jeune âge des contraintes imposées dues à la chaleur d'hydratation surmontées par le retrait endogène. Le risque de fissuration est donc plus élevé au jeune âge pour le béton à haute résistance que pour le béton à résistance normale.

Résistance au feu

En raison de la structure très dense des pores, la pression de vapeur qui apparaît à l'intérieur du béton à des températures excédant 100°C peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur. Par rapport au béton conventionnel, la résistance du béton à haute résistance diminuera dès lors plus rapidement si la température est supérieure à 100°C.

De plus, en raison des pressions de vapeur accumulées, il existe un risque d'éclatement des surface superficielles des bétons de classe de résistance très élevées (\geq C80/95).

Pour palier à ces risques, l'incorporation de micro-fibres polypropylènes a un effet bénéfique (fig 3.6.4). En effet, en cas de températures élevées, ces fibres fondront, ce qui laissera de petits canaux ouverts via lesquels les pressions de vapeur pourront être dissipées plus rapidement.

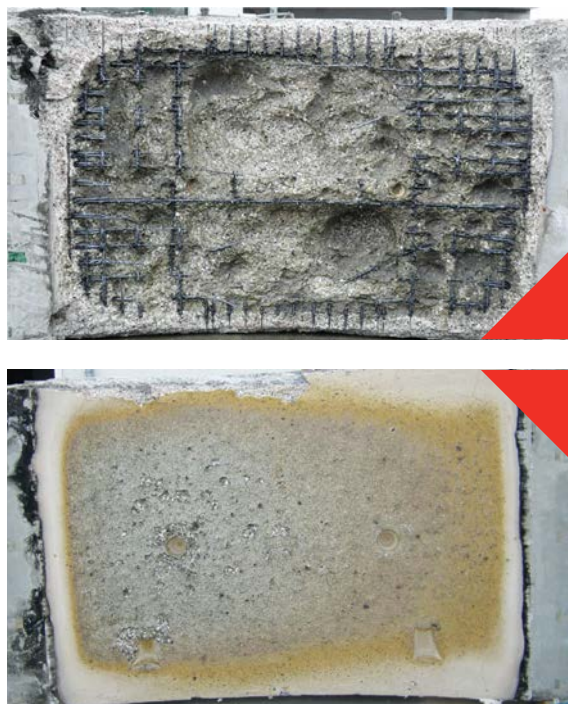


Fig 3.6.4
Élément en BHP sans fibres polypropylènes (en haut) et avec (en bas) après essai de résistance au feu. (Source : GMBP, Leipzig GmbH)

Durabilité

La très faible porosité des BHP permet d'obtenir un meilleur comportement face aux agressions extérieures. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par l'entrée d'eau ou de substances agressives, tels les chlorures, les sulfates, les acides, le dioxyde de carbone, ... Etant donnée la très faible porosité du BHP, la pénétration de l'eau ou de ces substances dans le béton est ralentie voire empêchée et le développement des processus de dégradation est fortement retardé. La résistance au gel et à l'abrasion de ces bétons est également fortement améliorée.

3.6 Béton à hautes performances

Fabrication, transport et mise en place

La fabrication, le transport et la mise en place du BHP se font avec le matériel habituellement utilisé pour les bétons ordinaires.

Le malaxeur de la centrale à béton devra avoir un fort taux de cisaillement. Compte tenu de la grande quantité de fines et surtout dans le cas d'utilisation de fumées de silice, le temps de malaxage sera allongé par rapport à un béton normal. Il est recommandé de malaxer ces bétons le temps nécessaire à l'obtention d'une stabilisation complète du wattmètre.

Le transport se fera dans des camions malaxeurs. Ces derniers seront contrôlés avant leur chargement afin d'éviter un mélange avec des restes d'eau de lavage. Le béton sera malaxé encore une fois avant son déchargement sur le chantier.

Le béton à hautes performances présente généralement, à consistance égale, un comportement nettement plus thixotrope que le béton à résistance normale. Il nécessite ainsi de plus grands efforts pour la mise en place. S'il faut pomper le béton à haute résistance, notamment un béton riche en granulats concassés, la vitesse de pompage peut s'en trouver diminuée.

D'habitude, le béton à hautes performances pour la préfabrication est confectionné en tant que béton autoplçant, afin de minimiser les efforts de mise en place et de compactage. La mise en place des BHP peut se faire par les méthodes usuelles.



Fig 3.6.5
Ouvrage
en BFUP

Bétons à Ultra-Hautes Performances (BUHP)

Il existe également des bétons dont les caractéristiques sont très supérieures à celles des BHP. Les valeurs de résistance à la compression se situent entre 150 et 200 N/mm². La composition de ces bétons, appelés BUHP (Bétons à Ultra-Hautes Performances) diffère de celle des bétons classiques et des BHP avec notamment :

- ▶ un squelette granulaire très fin (0/2 ou 0/4 maximum)
- ▶ l'utilisation d'importantes quantités d'additions minérales
- ▶ un E/C extrêmement faible ($\approx 0,25$).

L'incorporation d'une forte proportion de fibres métalliques courtes rend la matrice - extrêmement fragile - en un matériau composite avec une ductilité exceptionnelle appelé BFUP (Bétons Fibrés à Ultra-haute Performance). Ces bétons rendent possible la réalisation, avec une grande liberté architecturale, d'éléments très fins (fig 3.6.5) qui sans cette possibilité de diminution de section auraient été réalisés en acier.

Applications

Les applications du BHP sont nombreuses. À côté des ouvrages de prestige, de nombreux viaducs ou passages supérieurs d'autoroute exploitent leurs propriétés soit pour les portées supérieures permises, soit pour la nette amélioration apportée par ces bétons en terme de durabilité et donc de coûts d'entretien.

Dans les bâtiments, la réduction des sections des éléments ou l'augmentation des portées permettent des gains de place appréciables.

En préfabrication, des tuyaux hautes performances sont par exemple réalisés en BHP afin d'obtenir une meilleure durabilité aux eaux agressives et chargées.

3.7 Béton pour fondations profondes

Introduction

Les pieux forés et parois moulées appartiennent aux éléments de construction les plus importants dans les fondations et ouvrages géotechniques. Les pieux permettent le transfert des charges des structures vers des horizons porteurs plus profonds du terrain. Les pieux forés et parois moulées servent aussi au soutènement de grandes fouilles. Ils peuvent être préfabriqués ou réalisés en béton coulé en place. Les pieux préfabriqués sont mis en oeuvre comme pieux foncés par battage dans le sol.

Pieux forés

Pour la réalisation des pieux forés en béton coulé en place (fig 3.7.1), un forage est réalisé dans le sol jusque dans les couches de terrain suffisamment porteuses. En règle générale, les parois du forage sont blindées par un tube, afin d'éviter que les couches environnantes se relâchent et s'effondrent. La cage d'armature est placée dans le forage qui sera rempli avec le béton et dont le tubage sera le cas échéant enlevé à la fin (fig 3.7.2).

Alternativement, l'armature peut être introduite dans le béton frais immédiatement après le bétonnage.



Fig 3.7.1
Paroi réalisée avec des pieux forés sécants

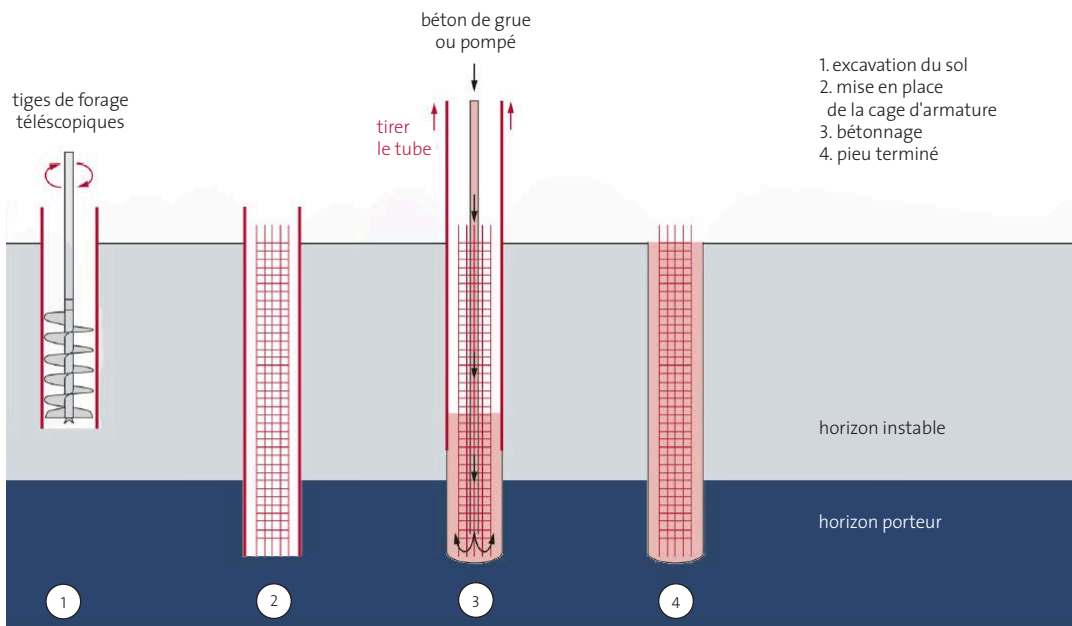


Fig 3.7.2
Réalisation d'un pieu foré avec un tube provisoire

3.7 Béton pour fondations profondes

Parois moulées

Les parois moulées en béton sont réalisées en deux phases (fig 3.7.3).

Dans une première étape, la tranchée est excavée et soutenue par un fluide d'excavation (p. ex. suspension

de bentonite). La deuxième étape consiste à la mise en place de la cage d'armature et au coulage du béton. Le béton refoule le fluide d'excavation qui est récupéré pour être traité et réutilisé.

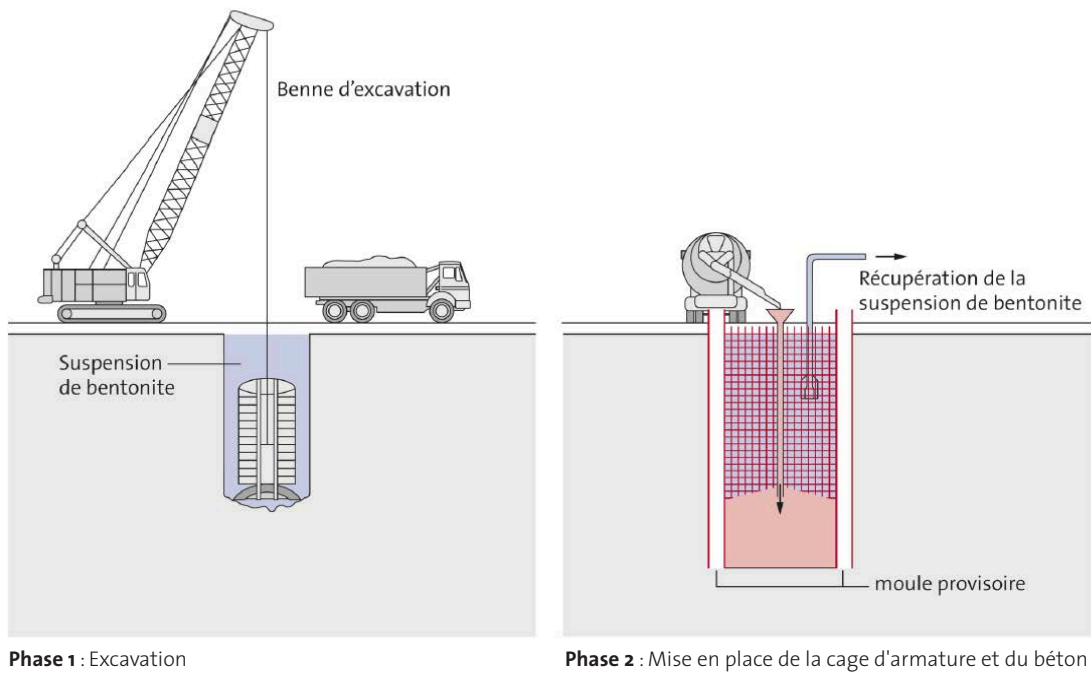


Fig 3.7.3
Réalisation
d'une paroi
moulée en
deux phases



Fig 3.7.4
Coulage d'un
panneau de
paroi moulée

3.7 Béton pour fondations profondes

Exigences normatives

Les exigences relatives aux bétons pour pieux forés et parois moulées sont définies dans l'annexe D de la norme NBN EN 206, afin de tenir compte du fait que le béton doit :

- ▶ présenter une grande résistance à la ségrégation
- ▶ posséder une bonne aptitude à l'écoulement pour s'écouler facilement sous l'effet de la gravité
- ▶ être apte à se serrer de manière adéquate sans vibration
- ▶ être suffisamment maniable pendant toute la durée de bétonnage pour la mise en place et le cas échéant l'enlèvement des colonnes de bétonnage.

Les règles relatives à la teneur en ciment, à la teneur minimale en fines, à la consistance et au maintien de celle-ci dans le temps sont plus contraignantes dans cette annexe D que les dispositions classiques et relatives à d'autres ouvrages. Elles permettent d'assurer l'enrobage de l'armature et la formation d'une structure dense de béton même en absence de compactage.

Les normes NBN EN 1536 "Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Pieux forés" et NBN EN 1538 "Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Parois moulées" s'appliquent également.

Les bétons pour pieux forés et parois moulées sont confectionnés habituellement dans la classe de résistance C25/30. Les exigences de durabilité, p. ex. la résistance à la réaction alcali-silice (RAS) ou aux agents agressifs, doivent être spécifiées en fonction des particularités du projet.

Formulation du béton

Ciment

Pour les bétons pour pieux forés et parois moulées tous les ciments courants sont admis. Les ciments au laitier CEM III/A et CEM III/B sont particulièrement bien adaptés aux longs bétonnages, leur début de prise lent se prêtant bien aux travaux, parfois imprévisibles, de mise en place lente. Ils permettent en outre une bonne résistance à la réaction alcali-silice et aux agents agressifs éventuellement présents dans l'eau ou les sols environnants.

Granulat

Les exigences de la norme NBN EN 12620 s'appliquent aux granulats. Pour obtenir la teneur élevée en fines nécessaire, une courbe granulométrique riche en sable, comparable à celle recommandée pour le béton pompé est à avantager. La teneur en sable ($d \leq 4$ mm) devrait dépasser une proportion de 40% de la masse totale des granulats. Une granularité discontinue n'est pas admissible. Le diamètre maximal du granulat ne peut être supérieur à 32 mm, et doit respecter des conditions en fonction de l'espacement des barres longitudinales et du diamètre du tube plongeur ou tube d'alimentation du béton le cas échéant.

Adjuvants

Les bétons pour pieux forés et parois moulées sont habituellement produits avec des superplastifiants afin de conférer au béton frais la cohésion et la fluidité désirées. Il faut veiller à ce que le superplastifiant employé soit non seulement suffisamment efficace, mais qu'il offre également un temps d'ouvrabilité aussi long que possible. On peut avoir recours à des retardateurs de prise pour garantir le temps d'ouvrabilité souhaité et comme mesure de précaution en cas d'interruption du bétonnage.

Consistance

Le béton pour pieux forés et parois moulées doit, en règle générale, être mis en place gravitairement au travers d'une colonne de bétonnage. Leur consistance sera donc fluide à très fluide, dans la majorité des cas, l'étalement sera compris entre 570 et 630 mm correspondant à un affaissement entre 180 et 230 mm.

La durée de maintien d'ouvrabilité du béton est généralement de plusieurs heures (typiquement 3 heures).

Ressuage

Les bétons étant coulés sur de grandes hauteurs, une attention particulière sera apportée à la stabilité du béton et à l'absence de ressuage. Ceci sera mesuré à l'aide de tests spécifiques : détermination de la quantité d'eau de ressuage du béton selon NBN EN 480-4 ou détermination du ressuage statique selon ASTM C232 voire également selon l'essai "Bauer" de filtration sous pression.

Causes et prévention des altérations du béton

4.1

Ségrégation

4.2

Retrait et fissuration

4.3

Corrosion des armatures

4.4

Efflorescences

4.5

Action du gel et des sels de déverglaçage

4.6

Attaque sulfatique externe

4.7

Réaction sulfatique interne

4.8

Action des produits chimiques

4.9

Réaction alcali-silice

4.10

Résistance au feu

4.11

Approches de la durabilité du béton



4.1 Ségrégation

Les diverses formes de ségrégation

La ségrégation est une séparation des constituants du béton frais qui peut se produire chaque fois que celui-ci est transporté ou mis en mouvement (déchargement, pompage, mise en place, compactage) ou simplement sous l'effet gravitaire quand le béton est en repos.

La ségrégation a toujours des conséquences importantes sur l'aspect du béton et le plus souvent aussi sur sa résistance et sa durabilité. Elle peut résulter d'une séparation entre :

- ▶ les différentes fractions granulaires
- ▶ les granulats et la pâte de ciment
- ▶ les fines et l'eau de gâchage.

Parmi les formes les plus courantes de ségrégation, il faut mentionner :

- ▶ les "nids de gravier" : concentrations locales de gros granulats (fig 4.1.1)
- ▶ les "remontées d'eau", appelées aussi "veines de sable" : eau séparée ou excédentaire remontant le long des faces verticales lors du compactage (fig 4.1.2)
- ▶ le "ressuage" : accumulation d'un excédent d'eau sur les surfaces horizontales du béton, il en résulte des surfaces irrégulières, farineuses ou poreuses (fig 4.1.3)
- ▶ les "micro-ségrégations" (ciment/fines) sont souvent plus gênantes pour l'œil que pour la qualité (fig 4.1.4).

Causes

Les causes principales des divers types de ségrégation sont les suivantes :

- ▶ consistance trop fluide du béton frais
- ▶ dosage excessif du plastifiant ou du superplastifiant
- ▶ mise en place incorrecte du béton (vibration exagérée, absence de tube pour des hauteurs de chute élevées, déversement du béton contre un coffrage vertical (fig 2.7.2))
- ▶ formulation inadéquate du béton (mauvaise re-composition des fractions granulaires, dosage en fines insuffisant, dosage en eau excessif)
- ▶ Dimension des granulats trop importante par rapport aux dimensions de l'élément à bétonner et à l'épaisseur d'enrobage des armatures (fig 2.1.3)
- ▶ temps de malaxage trop court
- ▶ mauvaise étanchéité des joints de coffrage, pertes de laitance (effet de filtre)
- ▶ armature trop dense (effet de tamis).



Fig 4.1.1
Nid de gravier



Fig 4.1.3
Ressuage
dalle béton



Fig 4.1.2
Veines de
sable



Fig 4.1.4
Micro-
ségrégation

4.2 Fissuration et retrait

Généralités

Le béton est un matériau pour lequel il est très difficile d'éviter l'apparition de fissures. Sa résistance à la traction est en effet très faible en comparaison de celle à la compression. Par prudence, les normes imposent dans la plupart des cas aux ingénieurs de ne pas en tenir compte pour le dimensionnement des ouvrages en béton. L'apparition de fissures est ainsi inéluctable dès que les sollicitations de traction dans le béton atteignent ou dépassent la valeur de sa résistance à la traction, qui est de l'ordre de 2 à 3 N/mm² pour les bétons courants.

Ces sollicitations et le risque de fissuration qui en découle peuvent avoir pour origine l'un ou plusieurs des facteurs suivants :

- ▶ le retrait du béton
- ▶ le tassement des fondations
- ▶ les variations de température
- ▶ les charges (poids propre, trafic, etc.)
- ▶ le gel
- ▶ des réactions chimiques (corrosion de l'armature, réaction alcali-silice, attaque sulfatique,...).

La fissuration est rarement préjudiciable pour la stabilité d'un ouvrage, lorsqu'elle est maintenue à un niveau acceptable grâce à des mesures appropriées.

Néanmoins, outre l'atteinte portée à l'aspect de parements en béton, l'apparition de fissures peut cependant s'avérer préjudiciable pour la durabilité de l'ouvrage dans la mesure où elles constituent des canaux privilégiés pour la pénétration de substances agressives susceptibles de détériorer le béton et les armatures.

Grâce à certaines mesures, il est possible de réduire fortement – voire même dans certains cas d'empêcher – le risque et l'ampleur de la fissuration. Pour y parvenir, les séries de mesures suivantes sont plus ou moins efficaces, en fonction de l'origine des fissures :

- ▶ la conception, le dimensionnement et les dispositions constructives de l'ouvrage
- ▶ le choix des étapes de construction et de bétonnage
- ▶ la composition et la cure du béton.

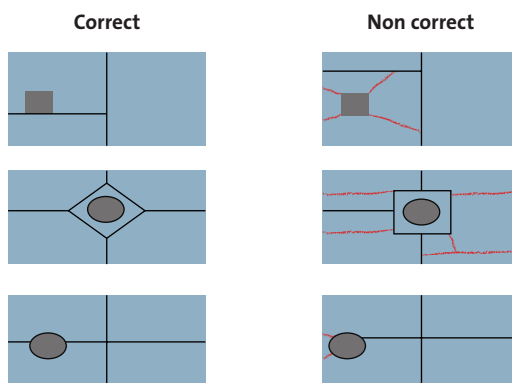


Fig 4.2.1
Le mauvais positionnement du joint a provoqué la fissure

Conception, dimensionnement et dispositions constructives de l'ouvrage

Le choix du système statique, du nombre et de l'emplacement des joints influence fortement le niveau des contraintes de traction générées dans le béton par le retrait, le fluage ou les déformations consécutives au chargement des éléments.

La mise en œuvre d'une précontrainte peut empêcher la fissuration, en raison des contraintes de compression qu'elle génère dans le béton et qui s'opposent aux sollicitations de traction et à la fissuration.

La présence d'une armature passive (armature minimale selon les normes) n'empêche en aucun cas l'apparition des fissures, elle permet uniquement de limiter leur ouverture à une valeur acceptable et modulable en fonction de la quantité d'armature mise en place. Les normes de calcul de structures en béton (Eurocode 2) permettent de dimensionner l'armature passive en fonction des ouvertures de fissures autorisées (généralement 0,3 mm).

L'apparition de fissures dans un ouvrage en béton résulte aussi parfois de certains choix peu judicieux, voire erronés, concernant la conception, le dimensionnement ou les dispositions constructives, par exemple :

- ▶ capacité portante insuffisante
- ▶ répartition inadéquate des armatures
- ▶ mauvaise disposition ou absence de joints (fig 4.2.1)
- ▶ apparition de sollicitations imprévues ou excessives dues au choix des appuis du système porteur, au tassement différentiel des fondations ou à des mouvements du sol.

4.2 Fissuration et retrait



Fig 4.2.2

Fissures dans une construction supposée étanche

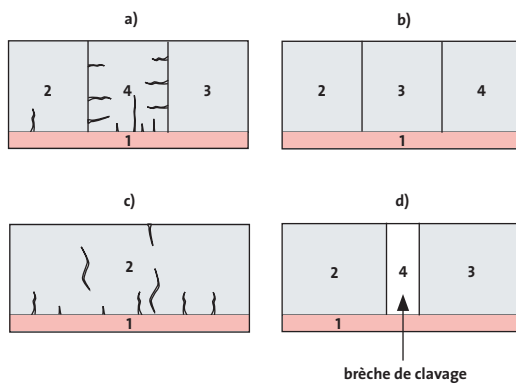


Fig 4.2.3

Etapes de bétonnage d'un mur de soutènement
a) et c) solutions défavorables
b) et d) solutions favorables

Etapes de construction et de bétonnage

Pour des constructions qui ne peuvent pas être fractionnées par des joints, le choix des étapes de construction et de bétonnage joue également un certain rôle en ce qui concerne le risque de fissuration.

Le retrait du béton au cours de son durcissement ne se fait pas de façon linéaire. Important à jeune âge, il diminue au cours du temps. Il est donc préférable que les différentes étapes de bétonnage d'une structure en béton se fassent avec un minimum de décalage. Ceci vaut typiquement pour le coulage de voiles sur une dalle de fondation coulée au préalable, où le retrait différentiel (plus grand pour le voile que pour la dalle qui a déjà subi une partie de son retrait) et empêché par la dalle, peut provoquer des fissures (fig 4.2.2).

Il est en plus recommandé de soigner les étapes de bétonnage des voiles d'une certaine longueur (fig 4.2.3 haut).

Dans les grands ouvrages, 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 (fig 4.2.3 bas et 4.2.4).



Fig 4.2.4

Brèches de clavages coulées ultérieurement lors de la réalisation d'une dalle

4.2 Fissuration et retrait

Composition et cure du béton

Les choix relatifs à la composition du béton et aux mesures de cure sont déterminants pour l'intensité des déformations de retrait et le risque de fissuration qui en découle. Les différents types de retrait et les mesures préventives correspondantes sont traités ci-après.

Il est important de faire la distinction entre les différents types de retrait et leurs conséquences (types de fissures et délai d'apparition), afin de pouvoir prendre les mesures préventives les plus appropriées dans chaque cas (tab 4.2.1).

Types de retrait

On entend en général par retrait, la diminution du volume du béton causée par le tassement du béton frais (retrait de tassement), le départ d'eau (retrait plastique, retrait de dessiccation) ainsi que par l'hydratation du ciment (retrait endogène) ou encore par des phénomènes thermiques (retrait thermique).

Type de retrait	Ordre de grandeur	Risque de fissuration		Utilité / Efficacité des mesures		
	(mm/m)	Délai d'apparition	Type de fissures	Composition du béton	Cure	Armature
Retrait de tassement	jusque 1% d'épaisseur	Avant la prise	Superficielles	Très élevée	Nulle	Nulle
Retrait plastique ¹⁾	jusque 4	Avant ou pendant la prise	Superficielles	Faible	Très élevée	Nulle
Retrait de dessiccation ²⁾	0,3 à 0,8	Quelques jours à une année après bétonnage	Superficielles à traversantes	Moyenne	Très élevée	Très élevée
Retrait endogène ²⁾	0,04 à 0,1 (E/C ≥ 0,45) jusqu'à 1 (BUHP)	Quelques semaines à une année après bétonnage	Internes	Moyenne	Nulle	Elevée
Retrait thermique	0,01 . ΔT°	10h à une semaine après bétonnage	Superficielles, traversantes ou internes	Très élevée	Nulle ³⁾	Moyenne

¹⁾ évaporation de l'eau du béton frais (synonymes : retrait précoce ou retrait capillaire)

²⁾ départ de l'eau du béton durci (par évaporation et/ou par "consommation" endogène)

³⁾ la présence d'isolation thermique peut jouer un rôle favorable

Tab 4.2.1

Risque de fissuration en fonction du type de retrait

4.2 Fissuration et retrait

Retrait de tassement

Le tassement du béton frais (tassement plastique) est provoqué par la sédimentation des particules solides et la remontée simultanée de l'eau à la surface sous l'effet des différences de masse volumique (ségrégation, voir chapitre 4.1). Il se produit avant la prise du béton, c.-à-d. juste après la mise en place et le compactage.

Dans des cas défavorables, le tassement peut atteindre 1 % de l'épaisseur de l'élément de construction. Puisque le béton au jeune âge ne possède qu'une faible rigidité, il peut se fissurer au niveau des différences d'épaisseur ou de géométrie de la structure ou au-dessus des barres d'armature, surtout si l'épaisseur d'enrobage est faible (fig. 4.2.5).

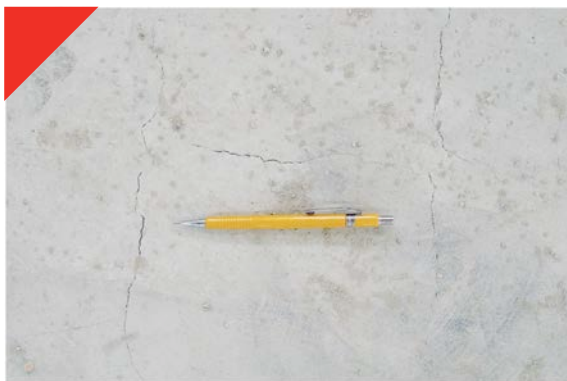


Fig 4.2.5
Réseau
orthogonal
de fissures
de tassement
(vue globale et
détail)

Mesures préventives

La fissuration induite par le tassement du béton frais peut être évitée ou limitée par les mesures suivantes :

- ▶ choix d'une consistance du béton frais plus ferme
- ▶ diminution de la quantité d'eau de gâchage
- ▶ augmentation de la teneur en fines et utilisation d'un ciment plus fin, afin d'élever le pouvoir de rétention d'eau et de réduire le ressuage
- ▶ utilisation de gravillons (semi-)concassés
- ▶ bétonnage des éléments de construction massifs en plusieurs couches frais sur frais ou bétonnage plus lent.

Les fissures formées dans le béton frais peuvent être refermées par un compactage et un traitement ultérieur. Cette mesure n'est cependant efficace que si elle est réalisée au bon moment, c.-à-d. avant le début de la prise.

4.2 Fissuration et retrait

Retrait plastique

Le retrait plastique, dénommé parfois aussi retrait précoce ou retrait capillaire (parce qu'il se produit avant la fin de la prise du ciment), est dû à une déperdition rapide de l'eau, aussitôt après la mise en place du béton.

Cette perte d'eau est imputable à une évaporation excessive ou à une forte absorption par les coffrages et le fond. Il en résulte un retrait notable (le retrait plastique peut aller jusqu'à 4 mm/m dans des conditions sévères) dans les couches où la perte est importante, alors que le reste du béton est peu affecté. Des tensions internes se développent alors entre les couches soumises à ces retraits différents. Si ces tensions dépassent la résistance du béton à la traction (faible au début, par définition), elles produisent des fissures de quelques centimètres de profondeur et en général non traversantes, qui peuvent mesurer jusqu'à 1 mm d'ouverture, voire davantage.

Les éléments horizontaux (radiers, planchers, dallages, dalles de compression, ...) sont les plus menacés par le retrait plastique (fig 4.2.6).

Le risque inhérent au retrait plastique est d'autant plus grand que le béton présente des performances élevées grâce au choix d'un rapport E/C faible. Plus la quantité d'eau est faible, plus le béton est sensible à une dessiccation précoce.

Outre l'altération esthétique du béton qu'elles constituent, ces fissures peuvent aussi être à l'origine d'une désagrégation du béton, en cas d'infiltration d'eau suivie de gel par exemple.

De plus, la déperdition d'eau peut empêcher une bonne hydratation du ciment. La surface du béton présentera alors une perte de résistance et une porosité élevée. Dans un environnement défavorable, ce béton aura un comportement insatisfaisant : infiltrations d'eau, descellement des gros granulats, aspect farineux et éclats en surface.

Ces fissures peuvent être refermées en surface lors du lissage du béton. Si esthétiquement le résultat est satisfaisant, elles subsistent cependant à l'intérieur du béton et sont des amorces pour une fissuration ultérieure du béton en surface.



Fig 4.2.6
Fissures de retrait plastique, dues à l'absence ou la mise en œuvre trop tardive de cure

Mesures préventives

Les mesures suivantes permettent d'éviter une fissuration précoce due au retrait plastique :

- ▶ Mettre en œuvre rapidement les mesures de cure décrites au chapitre 2.8 afin de limiter au maximum l'évaporation.
- ▶ Empêcher l'absorption d'eau par les coffrages ou le fond en les saturant au préalable.
- ▶ Eviter, dans la mesure du possible, les travaux de bétonnage lors de conditions météorologiques défavorables (températures très élevées et vent important), sinon appliquer les recommandations données au chapitre 2.9.
- ▶ Ajouter des fibres de polypropylène (voir chapitre 1.5).

4.2 Fissuration et retrait

Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation ou retrait hydrique est dû à la diminution de volume du béton que l'on observe au fur et à mesure de son séchage dans le temps. Plus la quantité d'eau non liée s'évapore, plus le retrait du béton est élevé. Ce processus de séchage et le retrait qui en résulte sont d'autant plus importants que l'humidité du milieu environnant est faible.

Le retrait de dessiccation est d'autant plus élevé et rapide que l'excès d'eau non liée est important, car la porosité et la perméabilité du béton augmentent, ce qui accélère encore le phénomène de séchage. La valeur finale du retrait de dessiccation se situe généralement entre 0,3 et 0,8 mm/m. La maîtrise du retrait de dessiccation passe donc principalement par une réduction de la quantité d'eau dans le béton. Une granulométrie bien serrée du squelette du béton favorise également la diminution du retrait de dessiccation.



Fig 4.2.7
Maîtrise
des effets du
retrait par
fractionnement



Fig 4.2.8
L'absence de
joints dans
les glissières
de sécurité
provoque des
fissures régulières dues
au retrait de
dessiccation

Mesures préventives

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

- ▶ Choisir une granulométrie continue appropriée, de manière à minimiser la porosité du béton et à réduire le plus possible sa demande en eau.
- ▶ Réduire à un niveau optimal le rapport E/C au moyen de superplastifiant ($E/C \leq 0,50$).
- ▶ Prévoir soit un fractionnement de l'élément par des joints de retrait (fig 4.2.1 et 4.2.7) soit une armature minimale suffisante et/ou des fibres métalliques, de manière à répartir la fissuration (l'apparition de multiples micro-fissures est souvent moins préjudiciable que l'apparition de fissures moins nombreuses et largement ouvertes).
- ▶ Choisir judicieusement les étapes de bétonnage (fig 4.2.2 et 4.2.3).
- ▶ Appliquer les mesures et les durées de cure recommandées au chapitre 2.8.

Retrait endogène

En l'absence de tout contact avec l'extérieur et donc de perte d'eau vers l'extérieur, le béton est soumis au retrait endogène, qui a une double origine.

Le retrait chimique est une contraction volumique (appelée contraction Le Chatelier) au cours de l'hydratation du ciment, le volume des hydrates formés étant en effet plus petit que la somme des volumes initiaux occupés par l'eau et le ciment anhydre. Cette réduction de volume est de l'ordre de 8 à 12%, et est notamment à l'origine de la structure poreuse du béton.

L'hydratation progressive lie chimiquement l'eau libre. Lorsqu'il n'y a plus d'eau libre dans les pores capillaires, l'eau présente dans les pores de gel est consommée. Les pores se vident et l'humidité relative interne baisse. Cette "dessiccation interne", induite par l'hydratation, est appelée auto-dessiccation.

Le retrait endogène dépend du rapport E/C. Plus le rapport E/C du béton est faible, plus la part du retrait endogène sera élevée. Pour des bétons usuels, dont le E/C est $\geq 0,45$, il est pratiquement négligeable, de l'ordre de 0,1 mm/m. Pour les BHP, et plus encore pour le BUHP, il peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 1 mm/m.

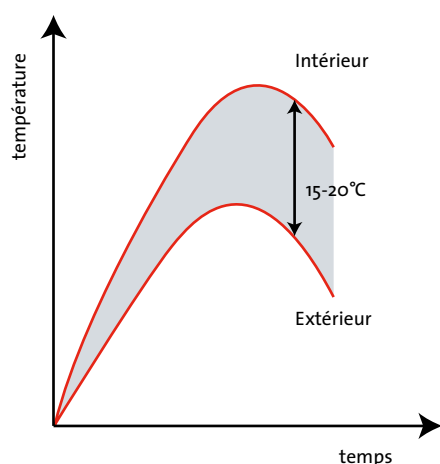
4.2 Fissuration et retrait

Retrait thermique

La chaleur dégagée par l'hydratation du ciment est à l'origine de gradients de température. Ces gradients peuvent encore être accentués par l'hydratation accélérée à température plus élevée.

Après la nette élévation de température qui accompagne la prise, le béton au jeune âge se refroidit au contact de son environnement et, de même que la plupart des matériaux, il diminue de volume quand sa température s'abaisse. Comme le béton refroidit naturellement plus vite en surface qu'en profondeur, des tensions internes peuvent naître entre la zone interne qui se contracte moins et la zone externe qui se contracte plus (fig 4.2.9). Ces tensions peuvent provoquer des fissures superficielles.

D'autre part, comme pour le retrait hydrique, si le béton n'est pas libre de se raccourcir, le retrait dû au lent refroidissement général peut souvent occasionner une fissuration profonde plus ou moins importante, parfois traversante.



Mesures préventives

- ▶ Utiliser un ciment ayant une faible chaleur d'hydratation (type LH) et/ou limiter le dosage du ciment (éventuellement spécifier la résistance à un âge au-delà de 28 jours).
- ▶ Éviter un gradient de température très important lors de l'échauffement du béton (coffrage bois ou protection thermique).
- ▶ Mesurer le gradient de température cœur / peau par des sondes de températures et éviter de décoffrer lorsque la température du béton est maximale à cœur afin de limiter l'ampleur du choc thermique lors du décoffrage (brusque refroidissement du béton à la surface).
- ▶ Choisir judicieusement les étapes du bétonnage (fig 4.2.3).
- ▶ En cas de surface libre importante, isoler la surface.

Règles pratiques

- ▶ Des fissures de gradient thermique (généralement superficielles) sont à craindre si la différence de température entre le cœur et la peau de la pièce dépasse 15°C.
- ▶ Des fissures de retrait empêché (généralement traversantes) sont à craindre pour des différences à partir de 20°C.
- ▶ Prévoir une armature passive dans les zones à risque élevé, en prenant soin de placer les armatures horizontales le plus proche possible du coffrage (en respectant les règles minimales d'enrobage). Le pourcentage d'armature est de préférence réparti en armatures de plus petit diamètre et rapprochées.

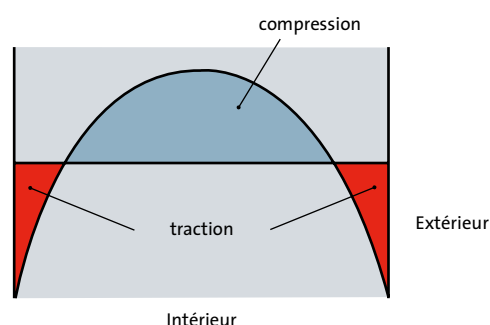


Fig 4.2.9
Diagramme des contraintes suite à une différence de température de 15-20°C entre la face extérieure et le cœur du béton

4.3 Corrosion des armatures

Généralités

Généralement, les armatures et les insertions métalliques sont naturellement protégées dans le béton. Cependant, deux mécanismes peuvent mener, sous certaines conditions, à leur corrosion :

- ▶ la carbonatation
- ▶ l'attaque par les chlorures.

On distingue 2 phases dans le mécanisme de corrosion des armatures :

- ▶ phase 1 : initiation, dont la fin correspond à la dépassivation de l'armature
- ▶ phase 2 : propagation, correspondant à la destruction de l'armature.

La corrosion peut être empêchée pendant toute la durée de vie d'un ouvrage par une épaisseur et une qualité adéquate du béton d'enrobage. Il est également possible d'utiliser des aciers d'armature avec une résistance à la corrosion plus élevée si des exigences particulièrement sévères doivent être respectées.

Causes

L'acier d'armature est durablement protégé de la corrosion dans un béton alcalin, non carbonaté et non chargé en chlorures. Cette protection est garantie par la haute alcalinité de la solution interstitielle des pores de la pâte de ciment, dont les valeurs de pH se situent entre 12,5 et 13,5 selon le type et la quantité de ciment, ainsi que par d'éventuelles additions (p.ex. cendres volantes, fumée de silice).

La couche passive protectrice à la surface de l'acier peut être détruite par deux mécanismes : la carbonatation et l'attaque par les chlorures. La vitesse de dépassivation (phase 1) dépend essentiellement de l'épaisseur, de la qualité du béton d'enrobage, ainsi que des conditions environnementales.

Fig 4-3-1
Signes de corrosion visibles en surface du béton : traces de rouille (photo à gauche), décollements du béton au-dessus d'une armature corrodée (photo à droite)



4.3 Corrosion des armatures

Corrosion par carbonatation

On appelle carbonatation la réaction chimique entre le gaz carbonique CO_2 contenu dans l'air et l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contenu dans la pâte de ciment. La carbonatation commence à la surface du béton et se propage lentement en profondeur. Son influence sur le béton lui-même est favorable car elle le rend plus compact et augmente donc sa durabilité. Elle agit à la manière d'une protection naturelle contre la pénétration des gaz et des liquides. Le béton non armé profite pleinement de l'influence favorable de la carbonatation.

En revanche, cette même carbonatation peut être à l'origine d'importants dommages sur les structures en béton armé. En effet, la carbonatation diminue l'alcalinité élevée de la solution interstitielle des pores de la pâte de ciment, faisant passer le pH de ± 13 (ce qui protège l'armature) à un $\text{pH} < 9$. Dès que le "front de carbonatation" atteint la zone de l'armature, ce qui correspond à la fin de la phase 1 (dépassivation), celle-ci peut commencer à s'oxyder (fig 4.3.2).

La vitesse à laquelle le front de carbonatation pénètre à l'intérieur du béton est d'autant plus grande que le béton est poreux. Elle ralentit cependant progressivement au cours du temps, car la couche déjà carbonatée freine les échanges avec l'extérieur (fig 4.3.3). La vitesse et la profondeur de carbonatation sont toutefois influencées par quantité d'autres facteurs comme la teneur en ciment, les variations de température ainsi que la fréquence des alternances entre l'état sec et l'état mouillé à la surface du béton.

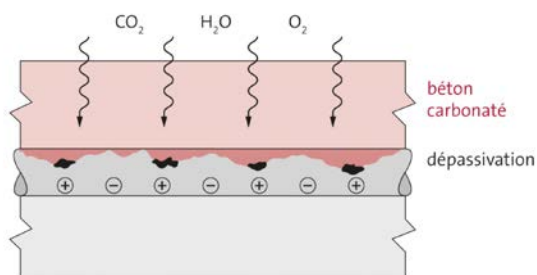


Fig 4.3.2
Corrosion induite par carbonatation

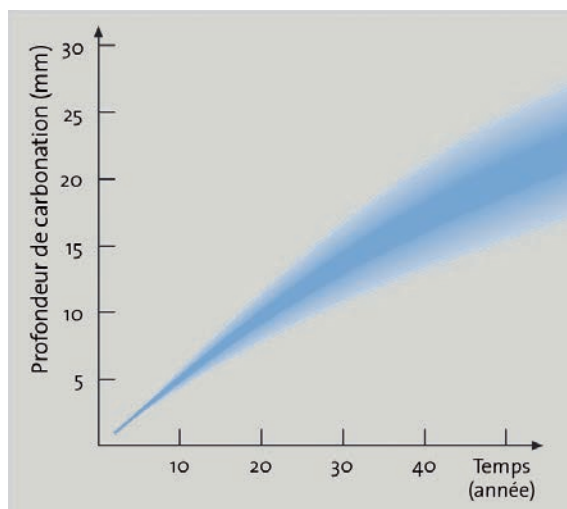


Fig 4.3.3

Le rapport entre l'âge du béton et la profondeur de carbonatation est empreint d'une forte dispersion, due aux nombreux paramètres qui influent sur la vitesse de carbonatation

La corrosion de l'armature (phase 2) commence, dès que trois conditions sont remplies :

- ▶ le front de carbonatation a atteint l'armature (dépassivation)
- ▶ disponibilité d'humidité
- ▶ disponibilité d'oxygène.

Dans les éléments de construction en permanence saturés en eau ou complètement secs, le risque de corrosion est donc faible, puisqu'il manque soit de l'oxygène soit de l'humidité. Par contre, des périodes d'alternance séchage / mouillage augmentent le risque de corrosion. Le choix des classes d'environnement EE (classes d'exposition XC) reflète entre autre ces différences.

4.3 Corrosion des armatures

Corrosion par les chlorures

Suite à l'infiltration de chlorures issus notamment des sels de déverglaçage, de l'eau de mer, d'eau chlorée,... la concentration en chlorures dans la solution interstitielle des pores du béton augmente. L'atteinte d'une "concentration critique" à l'endroit des armatures peut provoquer une dépassivation locale de la surface de l'acier, ce qui correspond à la fin de la phase 1 (fig 4.3.4).

La propagation de la corrosion (phase 2) dépendra de la présence simultanée de chlorures, d'eau et d'oxygène : le choix des classes d'environnement ES (classes d'exposition XS ou XD) reflète entre autre ces différences.

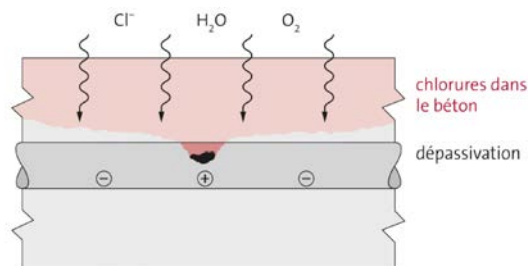


Fig 4.3.4
Corrosion induite par les chlorures

Fig 4.3.5
Dégâts de corrosion d'une armature : érosion par corrosion régulière de la barre d'armature sous l'effet de la carbonatation



Typologie apparente

Surface du béton

Selon son ampleur, la corrosion de l'armature se remarque en surface du béton par des traces de rouille ou des décollements du béton d'enrobage (fig 4.3.1). Les traces de rouille sont les premiers signes visibles en surface du béton. La formation de la rouille à partir de l'acier s'accompagne d'une augmentation volumique de 2 à 3 fois le volume de l'acier. La pression qui en résulte conduit à la fissuration du béton d'enrobage et, à un stade plus avancé, à son décollement au-dessus des barres d'armature corrodées. Dès lors, les barres d'armature ne disposent plus d'aucune protection et le béton armé commence à perdre de sa capacité portante.

Armature

L'armature subit une perte de sa section effective par la corrosion. Ceci a un impact direct sur la portance de l'élément de construction. On distingue une corrosion uniforme de la surface des barres suite à la carbonatation (fig 4.3.5) d'une corrosion ponctuelle par piqûres, induites par les chlorures. La perte de section provoquée par les piqûres de corrosion est généralement nettement plus prononcée et critique que celle induite par la carbonatation. La corrosion répartie régulièrement se caractérise par les éclatements du béton d'enrobage, tandis que la corrosion par piqûres reste souvent inaperçue et se développe sans beaucoup de signes extérieurs à la surface.

4.3 Corrosion des armatures

Mesures préventives

Les mesures ont pour but d'assurer que la phase 1 (initiation) dépasse la durée d'utilisation prévue de l'élément (50 ans dans le cadre de la NBN EN 206).

Pour ce faire il faut:

- ▶ Recouvrir les armatures d'un enrobage de béton suffisant. En général l'épaisseur de l'enrobage se situe entre 25 et 40 mm pour le bâtiment. La NBN EN 1992-1-1 (Eurocode 2), relative au dimensionnement des structures en béton, définit les exigences pour l'enrobage en fonction de la classe d'exposition et de la classe structurale. Une attention particulière doit être vouée aux armatures situées derrière les rainures et les faux joints.
- ▶ Respecter les spécifications de la norme NBN EN 206 en matière de composition de béton.
- ▶ Pratiquer un bon compactage et une bonne cure afin que la surface du béton soit compacte et bien hydratée dès le tout jeune âge et que la progression du front de carbonatation soit ralentie aussitôt que possible.
- ▶ Limiter la fissuration du béton. En effet, les fissures d'une ouverture supérieure à 0,3 mm facilitent davantage la pénétration du dioxyde de carbone (CO_2), des chlorures (Cl), d'eau (H_2O) et d'oxygène (O_2) jusqu'à l'armature.

Dans le cas où le béton est exposé aux chlorures (eau de mer, eaux chlorées) l'usage d'un ciment à forte teneur en laitier - type CEM III/B 42,5 - sera favorable. En effet les chlorures en solution sont fixés par le laitier, leur propagation est donc ralentie.

La résistance d'un béton vis-à-vis de ces deux mécanismes de corrosion peut être évaluée via des "essais de performance":

- ▶ mesure de la résistance à la carbonatation, selon la NBN EN 13295 et NBN EN 14630 (fig 4.3.6)
- ▶ mesure du coefficient de migration des ions des chlorures, selon la NT Build 492 (fig 4.3.7).



Fig 4.3.6

Mise en évidence du front de carbonatation par un test à la phénolphthaléine : le béton carbonaté reste gris alors que le béton non carbonaté, en partie centrale, très alcalin, fait virer cet indicateur au rouge-pourpre



Fig 4.3.7

Equipement pour essai accéléré de la migration des ions chlorures

4.4 Efflorescences

Qu'entend-on par efflorescences ?

Les efflorescences sont des taches généralement blanches qui apparaissent à la surface du béton. Elles sont dues aux substances dissoutes dans l'eau lors du malaxage ou produites par l'hydratation du ciment, et qui se déposent en surface aux endroits où l'eau s'évapore au fur et à mesure du séchage du béton.

Les efflorescences les plus répandues sont dues à l'hydroxyde de calcium (ou hydrate de chaux) libéré lors de l'hydratation du ciment. On parle alors des efflorescences de chaux (aussi appelés exsudations).

En s'évaporant de la surface du béton, l'eau laisse un résidu d'hydroxyde de chaux que le gaz carbonique de l'air va rapidement transformer en carbonate de calcium insoluble. La répétition des alternances entre l'état sec et l'état mouillé à la surface du béton peut rendre ce dépôt assez épais pour être visible sous forme d'une tache blanche (fig 4.4.3).

Nous pouvons distinguer les efflorescences primaires et les efflorescences secondaires :

- ▶ Les efflorescences primaires surviennent lors de la prise du béton avant que celui-ci n'ait été exposé aux intempéries.
- ▶ Les efflorescences secondaires surviennent après la prise du béton, soit en conséquence de l'exposition à la pluie soit suite à l'achèvement de la prise du ciment.

Effet des efflorescences

Les efflorescences n'ont aucune influence sur les caractéristiques mécaniques des éléments : pas de diminution de la résistance mécanique, de la résistance à l'usure, de la résistance au cycle gel dégel et aux sels de déverglaçage,...

Si les efflorescences nuisent dans un premier temps à la qualité esthétique du béton, elles s'atténuent voire disparaissent quelques années après la mise en oeuvre des éléments en béton.

Quand se forment les efflorescences dues à la chaux ?

Les conditions atmosphériques auxquelles le béton est soumis jouent un rôle important. Un environnement alternativement sec et humide du béton au jeune âge constitue une condition favorable à l'apparition d'efflorescences de chaux. Elles se forment généralement surtout par temps froid et humide. La pluie, la neige, le brouillard et la rosée favorisent leur apparition.

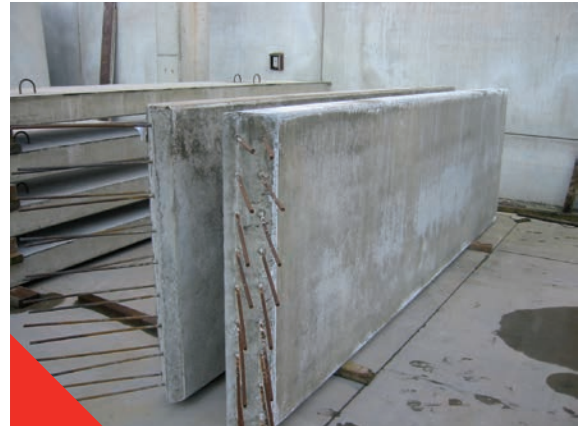


Fig 4.4.1

Efflorescences sur un élément en béton (vue globale et détail)



4.4 Efflorescences

Elimination des efflorescences

Les dépôts de carbonate de calcium s'atténuent ou disparaissent dans le temps sous l'effet de la pluie.

Le nettoyage peut être accéléré en traitant la surface à l'aide par exemple d'une solution d'acide chlorhydrique (de maximum 3%). Il est conseillé de tout d'abord saturer d'eau le béton afin que l'acide n'y pénètre pas trop et n'agisse qu'en surface. Après réaction, il faut rincer abondamment à l'eau, afin d'éviter une action ultérieure de l'acide sur le béton lui-même.

Mesures préventives

Il est difficile d'éviter totalement le risque d'efflorescences sur des éléments en béton qui seront obligatoirement exposés aux intempéries.

On peut tout de même diminuer ce risque en appliquant les mesures suivantes :

- ▶ Diminuer la quantité d'eau de gâchage (utiliser des plastifiants ou superplastifiants) en vue d'obtenir un béton compact, le moins poreux possible.
- ▶ Abriter le béton au jeune âge de la pluie et de l'ensoleillement direct.
- ▶ Curer les éléments préfabriqués dans des conditions d'humidité suffisamment élevée (mais pas saturée), vérifier l'absence de condensation. Ne pas empiler les produits directement les uns sur les autres.
- ▶ Utiliser des ciments aux ajouts (laitier, cendres volantes,...) qui produisent moins de chaux lors de leur hydratation.
- ▶ L'utilisation d'enduits ou de peintures de protection est possible, mais doit inévitablement passer par le conseil d'un spécialiste.

L'apparition d'efflorescences est un phénomène qui dépend de très nombreux facteurs, difficiles à maîtriser, voire incontrôlables, car souvent liés au microclimat local. Il faut en conséquence adapter au cas par cas les mesures préconisées et, au besoin, faire des essais afin de définir la méthode la plus efficace.



Fig 4.4.2
Efflorescences sur un mur en béton soumis à la pluie après décoffrage

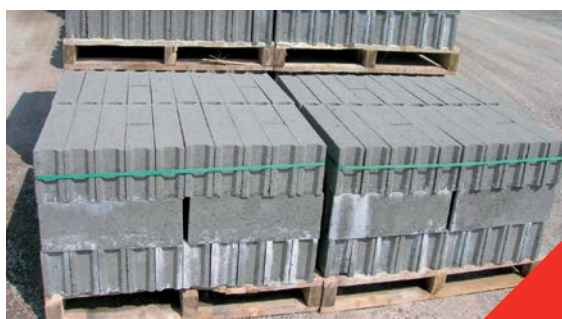


Fig 4.4.3
Efflorescences sur blocs bétons soumis à une alternance sec-humide

4.5 Action du gel et des sels de déverglaçage

Action du gel

La dégradation du béton par les cycles de gel et de dégel est due essentiellement à la transformation en glace de l'eau contenue dans les capillaires de la pâte de ciment ou dans les granulats. La formation de la glace implique une augmentation de volume d'environ 10%. Cette expansion, associée au mouvement de l'eau qui n'a pas encore gelé dans les capillaires du béton, va engendrer des pressions hydrauliques internes importantes, dépassant la capacité de résistance à la traction du béton. Il en résulte certains dommages: la répétition fréquente des cycles de gel - dégel fait apparaître un réseau très dense de microfissures dans la zone superficielle du béton. Ce réseau évolue plus ou moins rapidement vers un feuilletage ou un écaillage de la surface (fig. 4.5.1).

Les chutes de la température du béton en-dessous du point de congélation de l'eau sont d'autant plus dangereuses qu'elles sont rapides et fréquentes.

Fig 4.5.1

La partie basse de ce mur en béton est lavée quotidiennement à l'eau. Le gel a provoqué les éclatements du béton de surface



Fig 4.5.2

Ecaillage d'une glissière de sécurité en béton armé



Action des sels de déverglaçage

Les dommages causés au béton par les sels de déverglaçage (appelés aussi fondants) peuvent avoir plusieurs origines :

- ▶ Saturation en eau de la surface: les fondants font fondre la neige ou la glace. Une couche d'eau est donc maintenue à la surface et sature le béton. On n'a plus de "vases d'expansions" s'opposant au gonflement lorsque l'eau gèle à nouveau.
- ▶ Choc thermique que ces agents provoquent dans les couches superficielles du matériau: les fondants puisent dans le béton la chaleur nécessaire à faire fondre la neige et la glace qui le recouvrent. Ils provoquent ainsi une brusque chute de la température superficielle du béton, chute qui génère de fortes tensions entre la couche de surface et les couches inférieures dont la température n'a pas varié. Il peut en résulter très rapidement des éclats ou un écaillage de la surface (fig 4.5.2).
- ▶ Pression osmotique: l'eau qui gèle dans le béton est en réalité une solution saline. Au cours du gel, il se produit une séparation en glace d'une part, moins concentrée en sel qu'au départ, et en solution saline d'autre part, qui est donc devenue plus concentrée en sels. Il s'établit donc un flux pour rééquilibrer ces concentrations en sels. Ce flux engendre une pression dans le matériau qui peut mener à une fissuration ou écaillage, suivant la profondeur à laquelle ces pressions prennent place.
- ▶ Gel par couches: à une température donnée, les couches supérieures et inférieures gèlent sous l'action du froid. La couche intermédiaire, où se trouve la concentration maximale en chlorures ne gèle pas. Si, suite à un abaissement supplémentaire de température, l'eau de cette couche vient à geler, elle ne trouve pas d'espace d'expansion et repousse la couche supérieure.



L'effet destructeur des sels de déverglaçage est beaucoup plus redoutable que l'action du gel seul, mais il est aussi plus limité: seules les surfaces soumises à l'épandage de sel ou sur lesquelles des sels ont été véhiculés sont menacées.

4.5 Action du gel et des sels de déverglaçage

Effets secondaires des sels

Les sels de déverglaçage utilisés comme fondants sont généralement des chlorures de calcium ou de sodium. Dissous dans la glace ou la neige fondue, ces chlorures pénètrent alors plus ou moins profondément dans le béton, en fonction de sa porosité, pouvant provoquer à terme une corrosion des armatures (voir chapitre 4.3).

Etant donné que les sels peuvent contenir des alcalins, il faudra en tenir compte dans la prévention du risque de réaction alcali-silice (voir chapitre 4.9).

Action de l'air entraîné

Lors du gel du béton, le paramètre important est la distance que doit parcourir l'eau sous pression.

Le fait d'introduire de minuscules bulles d'air permet de diminuer cette distance que doit parcourir l'eau pour trouver un refuge où elle peut geler et gonfler sans contrainte.

Dans ce but, on introduit, lors du malaxage, des adjuvants entraîneurs d'air.

L'efficacité d'un adjuvant entraîneur d'air peut s'apprécier par sa capacité à former beaucoup de petites bulles, pour un volume d'air donné.

Le réseau de bulles d'air est caractérisé par le paramètre "facteur d'espacement" ou "spacing factor". Il s'agit de la demi-distance moyenne existant entre deux bulles d'air. Une valeur en-dessous de 200 μm permet généralement au béton de résister au gel. La caractérisation du réseau de bulles d'air est réalisée sur le béton durci par traitement d'image microscopique (fig 4.5.3 et 4.5.4).

En revanche, l'augmentation de la teneur en air entraîne une certaine diminution de la résistance du béton :

1% d'air entraîné au-delà de 2% correspond environ à une réduction de 5% des résistances à 28 jours.

Cet effet négatif peut être compensé par l'utilisation d'un ciment de classe de résistance plus élevée ou la diminution du rapport E/C. En effet, 1% d'air entraîné dans le béton permet une diminution d'eau de gâchage d'environ 5 litres par m^3 , tout en conservant l'ouvrabilité.

D'une manière générale, la production et la mise en oeuvre de bétons à air entraîné requièrent une attention très particulière sur les points suivants :

- ▶ dosage précis de l'adjuvant (quantités très faibles)
- ▶ consistance du béton
- ▶ paramètres de pompage (type de pompe, pression)
- ▶ durée et intensité du malaxage
- ▶ méthode et durée de compactage (afin de ne pas casser les bulles d'air).

En outre, l'aptitude à l'emploi d'un béton à air entraîné doit être établie au moyen d'essais préalables et contrôlée en cours d'exécution.

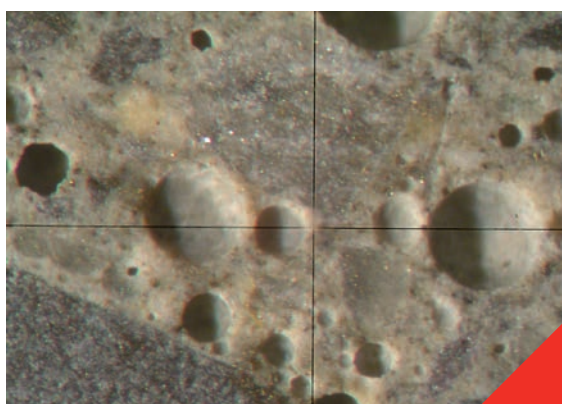


Fig 4-5-3
Bonne répartition des micro-bulles dans un béton à air entraîné (grossissement 100x)

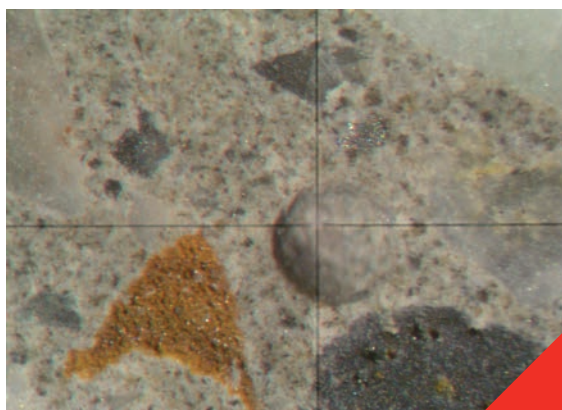


Fig 4-5-4
Mauvaise répartition des micro-bulles dans un béton à air entraîné (grossissement 100x)

4.5 Action du gel et des sels de déverglaçage

Composition des bétons soumis aux attaques du gel et des sels de déverglaçage

Mesures préventives

Le principe de base pour formuler un béton résistant au gel est le suivant: il faut une bonne résistance mécanique, empêcher l'eau de rentrer et avoir un réseau bien distribué de bulles d'air. En pratique, cela se traduit par :

- ▶ dosage élevé en ciment
- ▶ E/C faible
- ▶ air entraîné
- ▶ utiliser des granulats non gélifs.

Les exigences minimales relatives à la composition des bétons sont fixées dans la norme NBN B15-001 (classes d'environnement EE2, EE3 ou EE4 ; en milieu marin ES2 ou ES4). L'usage d'air entraîné doit être spécifié explicitement.

En outre, afin d'avoir un béton résistant aux sels de déverglaçage, il faut particulièrement soigner la peau du béton, qui sera attaquée en premier par l'action des sels. Soit :

- ▶ soin particulier de la cure du béton
- ▶ éviter le ressuage et la remontée de laitance.

Au niveau de la mise en oeuvre, il convient de finir les surfaces qui seront soumises à des sels selon les recommandations du chapitre 3.1 (p.ex. brossage). Les surfaces moins sollicitées peuvent être talochées pour bien fermer la peau du béton mais pas trop, ceci afin d'éviter la remontée de laitance.



Fig 4-5-5
Contrôle de la teneur en air à l'aéromètre

Bétons de route

Il va de soi que la résistance au gel et sels est extrêmement importante pour les revêtements de routes en béton. Pour cette raison, les CCT (Cahiers des Charges Types) des ministères régionaux des travaux publics (Qualiroutes en Wallonie, CCT relatif aux voiries de la Région de Bruxelles Capitale et SB 250 en Flandre) donnent pour les bétons de route des exigences supplémentaires de composition et définissent des caractéristiques minimales à atteindre sur béton durci, notamment en termes d'absorption d'eau et d'écaillage.

Vérification par des essais

La résistance au gel des bétons est vérifiée des essais de gel interne (CEN/TR 15177, fig 4.5.6) ainsi que de gel en présence de sels par un essai d'écaillage (CEN/TS 12390-9, fig 4.5.7). La mesure de l'absorption d'eau (WAI pour Water Absorption by Immersion selon la NBN B15-215) peut être un indicateur indirect de la résistance au gel.



Fig 4-5-6
Essai de gel interne (gel dans l'air)



Fig 4-5-7
Echantillons après essai d'écaillage

4.6 Attaque sulfatique externe

L'attaque par les sulfates d'origine externe

Les eaux sulfatées (ou eaux séléniteuses) ou les sols riches en sulfates constituent un milieu agressif pour le béton durci. En se combinant avec l'aluminate tricalcique (hydraté ou anhydre) de la pâte de ciment durcie, les sulfates dissous dans l'eau donnent naissance à des composés expansifs, l'ettringite (ou sel de Candlot).

On considère généralement l'environnement potentiellement agressif si le béton est en contact avec des eaux souterraines contenant plus de 600 mg/l de sulfates ou avec des couches de terrain en contenant plus de 3 000 mg/kg (environnement EA2 ou EA3).

Domaines de risques et dommages dus aux sulfates d'origine externe

En surface, les canalisations d'eaux usées ménagères et/ou industrielles ou les réservoirs (de stockage/épuration) peuvent être menacés lorsqu'ils transportent ou contiennent des sulfates en solution.

Sous l'effet des sulfates, l'altération du béton se manifeste par un gonflement, accompagné d'une fissuration importante (fig 4.6.1). L'action des sulfates est toutefois relativement lente, les constructions provisoires ne nécessitent donc aucune mesure particulière.

La présence dans le sous-sol de minéraux sulfatés comme le gypse et l'anhydrite (sulfates de calcium) constitue également un risque dont il faut tenir compte, même dans le cas d'une présence éloignée. En effet les eaux souterraines peuvent dissoudre et transporter très loin des sulfates en solution. L'agression par les sulfates menace donc avant tout les ouvrages ou parties d'ouvrages enterrés.

Mesures préventives

Lorsqu'il est établi ou prévisible que des éléments en béton seront en contact avec des sulfates dissous dans l'eau ou simplement présents dans le sol, il est nécessaire de prendre les précautions suivantes :

- ▶ Utiliser un ciment à résistance élevée aux sulfates (HSR) conforme à la norme NBN B12-108. On peut alors choisir entre :
 - les ciments CEM I-SR
 - les ciments à base de laitier CEM III/B-SR ou CEM III/C-SR qui contiennent plus de 65% de laitier
 - les ciments CEM V/A HSR.
- ▶ Ne mettre en œuvre que des bétons très compacts, donc à faible porosité.
- ▶ Limiter le rapport E/C selon la classe d'environnement.
- ▶ Tenir compte du fait que la capillarité peut faire remonter les eaux séléniteuses assez haut dans les structures.



Fig 4.6.1
Dégradation d'éprouvettes de béton soumises à un test de résistance aux sulfates

4.7 Réaction sulfatique interne

La Réaction Sulfatique Interne (RSI), appelée également DEF (Delayed Ettringite Formation) est une réaction pouvant se produire dans certaines conditions entre du sulfate contenu dans le béton et les aluminates. La présence d'eau est nécessaire à la réaction.

Ce phénomène nécessite la conjonction de plusieurs paramètres (température élevée de durcissement, durée du pic de température, composition du ciment, présence d'eau à la surface du béton). Ces sulfates en excès proviennent principalement de la décomposition, à haute température, en mono-sulfoaluminate, de l'ettringite primaire (tri-sulfoaluminate), formée au cours de l'hydratation du ciment.

Après durcissement du béton, plusieurs semaines à plusieurs années, si le béton est en présence d'eau, ce sulfate en excès va se combiner avec des aluminates pour reformer de l'ettringite appelée différée. L'ettringite est un composé expansif. L'ettringite primaire qui se forme durant l'hydratation du ciment a la place pour gonfler, étant donné qu'elle se développe lorsque le matériau n'est pas encore durci.

Par contre, l'ettringite différée se forme lorsque le matériau est durci. Elle n'a donc pas la place de gonfler et son développement s'accompagne d'une expansion et d'une fissuration du béton (fig 4.7.1).



Fig 4.7.1

Pile massive d'un pont atteinte de réaction sulfatique interne. Le béton a subi une température de 80°C durant plus de 200 heures

Prévention

La meilleure des préventions consiste à limiter la température à cœur du béton à 65°C lors de son durcissement. Eu égard au fait que des températures excessives du béton en cours de durcissement peuvent notamment faire baisser les résistances à long terme, provoquer du retrait thermique et donc des risques de fissuration, cette prévention sera largement bénéfique à la qualité intrinsèque du béton. Des dispositions constructives visant à éviter la stagnation d'eau à la surface de béton sont également un moyen de se prémunir de la formation de DEF.

Moyens pour abaisser la température du béton en cours de durcissement

De nombreux moyens existent pour diminuer la température du béton de pièces massives en cours de durcissement :

- ▶ utilisation de ciments à faible chaleur d'hydratation comme par exemple les ciments au laitier
- ▶ privilégier les coffrages non isolants (mais attention, défavorable pour le retrait thermique)
- ▶ refroidir la température de l'eau ou arroser les granulats en été
- ▶ mettre en œuvre un système de refroidissement actif (par circulation d'eau froide)
- ▶ éviter le bétonnage de pièces massives par temps chaud.

4.8 Action des produits chimiques

Les deux types d'agression par les produits chimiques

Face à l'agression de produits chimiques, le béton peut soit se montrer résistant, soit se dégrader plus ou moins rapidement. Les dommages, lorsqu'il y en a, sont essentiellement de deux sortes :

L'érosion chimique

L'altération du béton par érosion chimique se produit lorsqu'il y a dissolution de l'un des composants de la pâte de ciment ou du granulat par un agent chimique extérieur (fig 4.8.1 à 4.8.3). Il s'ensuit un lessivage du composant dissout : le béton devient alors de plus en plus poreux et perd de la matière en même temps que son rôle protecteur de l'armature.

Ce processus commence toujours à partir de la surface de contact avec l'agent chimique et progresse (en général lentement) vers l'intérieur du béton.

Le gonflement

L'altération du béton par gonflement fait suite à la combinaison, à l'intérieur du béton, entre une substance chimique ayant pénétré depuis la surface, un constituant de la pâte de ciment, et l'eau des capillaires. Lorsque cette combinaison produit un composé solide dont le volume est supérieur à celui des constituants de départ, il en résulte des pressions internes qui peuvent provoquer un gonflement de la masse, associé à une fissuration lente, mais importante. Celle-ci peut se manifester jusqu'à une certaine distance du point de pénétration de la substance agressive.

Mesures préventives

La protection du béton contre les agressions extérieures d'origine chimique nécessite les mesures suivantes :

- ▶ choix correct du ciment et dosage approprié
- ▶ mise en œuvre d'un béton compact, de faible porosité, avec un rapport E/C faible $\leq 0,50$
- ▶ enrobage suffisant des armatures (prévoir éventuellement une surépaisseur dite "couche sacrificielle")
- ▶ cure soignée du béton
- ▶ application des textes normatifs et recommandations.

Les ciments de type CEM III peuvent être recommandés dans tous les cas où des éléments de structure doivent être protégés contre l'agression de substances chimiques (acides, sels ou sulfates).

En cas d'attaque par des sulfates en solution, les mesures ci-dessus doivent encore être associées à l'emploi d'un ciment à résistance élevée aux sulfates. A cet effet, les ciments HSR de type CEM I, CEM III, CEM V sont particulièrement indiqués (voir également le chapitre 4.6).

Dans le cas d'agressions très spécifiques ou de concentrations très élevées en agents agressifs (voir NBN EN 206), on complètera les mesures énoncées ci-dessus par l'exécution d'un revêtement de surface spécialement prévu à cet effet (à base de résines synthétiques, de céramique, etc...). En cas de doutes, l'avis d'un spécialiste sera demandé.

Exemples de bétons soumis à une attaque acide



Fig 4.8.1
Tenue
correcte



Fig 4.8.2
Mauvaise
tenue –
Granulats
siliceux



Fig 4.8.3
Mauvaise
tenue –
Granulats
calcaires

4.8 Action des produits chimiques

Effet de quelques substances chimiques sur le béton

Le tableau 4.8.1 récapitule les effets produits par diverses substances chimiques (ou naturelles) lorsqu'elles entrent en contact prolongé avec le béton.

L'effet sera d'autant plus marqué que la concentration ou que le taux de renouvellement sont élevés.

Substances	Comportement du béton			Comportement du béton armé
	Pas d'altération	Altération par érosion chimique	Altération par gonflement	Altération par corrosion des armatures
Bases	●			
Acides		◆		■
Sels en solution (magnésium et ammonium)		◆		
Eau de pluie Eau distillée Eau déminéralisée		◆		■
Huile, graisses	●			
Sulfates en solution			◆	■
Chlorures en solution	●			◆
Gaz carbonique (CO ₂)	●			■

● Pas d'altération
 ◆ Agression directe
 ■ Corrosion suite à l'altération de la surface du béton ou à sa carbonatation profonde

Tab 4.8.1
Effet de quelques substances sur le béton

4.9 Réaction alcali-silice

Introduction

On désigne par Réaction Alcali-Silice (RAS, parfois aussi appelé RAG pour Réaction Alcali-Granulats) la réaction entre la silice réactive contenue dans certains granulats et les alcalis de la solution interstitielle des pores du béton. Les conditions requises pour cette réaction sont la combinaison d'un granulat potentiellement réactif aux alcalis, une teneur en alcalis suffisamment élevée et une humidité suffisante dans le béton (fig 4.9.1).

Granulats réactifs

La solubilité de la silice dépend de sa structure cristalline : la silice amorphe (p. ex. opale, silex, silicifications des calcaires et des grès) est plus facilement soluble que la silice à structure cristalline (quartz) plus ou moins ordonnée (p. ex. dans les gneiss et grès). Il existe différents types de roches alcali-réactives pour lesquelles l'étendue des dégâts et la vitesse de développement de la réaction varient.

Alcalis

Les alcalis (sodium et potassium) de la solution interstitielle des pores du béton proviennent principalement du ciment et des additions. De manière simplifiée, la teneur en alcalis est exprimée en Na_2O -équivalent (par la formule $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O}$). Les alcalis participant à la réaction sont appelés alcalis actifs.

Humidité

Le développement de la RAS dépend surtout des conditions d'humidité régnant dans l'ouvrage. Elle progresse tant qu'une humidité minimale et une teneur en alcalis suffisante sont présentes. L'humidité minimale nécessaire dépend de la teneur en alcalis de la solution interstitielle des pores et se situe à environ 70–80% d'humidité relative dans le béton. Dans les ouvrages massifs en béton (épaisseurs > 50–60 cm), qui ne sèchent jamais complètement, l'humidité propre est suffisamment élevée pour induire le développement de la RAS.

Les infiltrations d'eau dans le béton, accentuées par des fissures induites par le retrait, le gel ou la corrosion favorisent le développement de la RAS dans le béton.

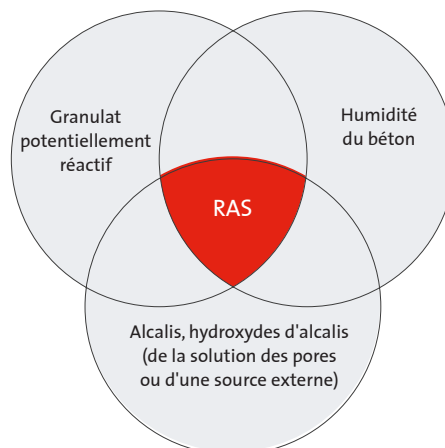


Fig 4.9.1
Diagramme des conditions requises pour apparition de la RAS

Typologie apparente

En général, on observe sur l'ouvrage des fissures en réseau caractéristique, accompagnées d'exsudation de gel (voir page suivante) de couleur variable (gris sombre, jaune-brûnâtre). Une expertise particulière est toutefois nécessaire pour confirmer la présence de la RAS ou pour lier une pathologie visible à cette réaction.

La RAS peut conduire à une destruction progressive du béton en donnant naissance à un réseau de fissures serrées, de grande ouverture et avec des déplacements latéraux (fig 4.9.2).

La RAS produit une distribution hétérogène des désordres dans l'élément de construction. Outre les pertes de résistances mécaniques, il résulte un risque accru de dégâts dus au gel ou à la corrosion. L'aptitude au service peut être affectée, si des déformations entravent le fonctionnement.



Fig 4.9.2
Ouvrage atteint de réaction alcali-silice

4.9 Réaction alcali-silice

Causes

La vitesse avec laquelle un dégât de RAS se développe est variable et est influencée par la qualité du béton, le granulats, l'exposition de l'élément d'ouvrage (surtout l'humidité, les cycles de température), l'armature, etc. Plus la teneur en alcalis de la solution interstitielle des pores du béton est élevée, plus la teneur en ions hydroxydes sera élevée. Les ions hydroxydes attaquent la silice contenue dans le granulats pour former un gel hydraté de silicates d'alcalis et de calcium, appelé en général brièvement "gel" (fig 4.9.3).

Le gel peut absorber de grandes quantités d'eau, produisant ainsi une pression d'expansion. Dès que celle-ci dépasse la résistance à la traction du granulats, des fissures se créent dans le béton à partir du granulats. En surface, des fissures caractéristiques apparaissent en réseau. La fissuration affectant le granulats et la pâte de ciment affaiblit fortement la structure du béton et mène à de grandes pertes au niveau des résistances mécaniques (fig 4.9.4).

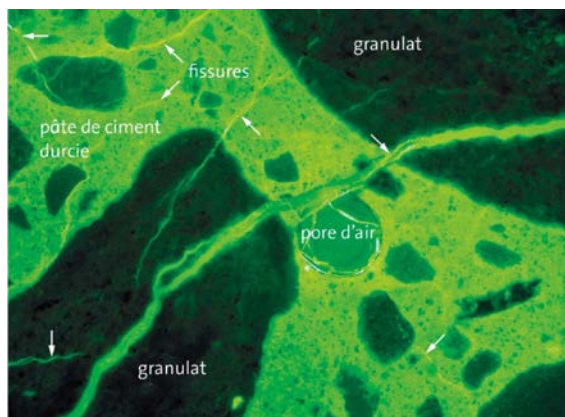


Fig 4.9.3
Dépot de gel dans les fissures et un pore d'air d'un béton dégradé (photo : lumière UV)

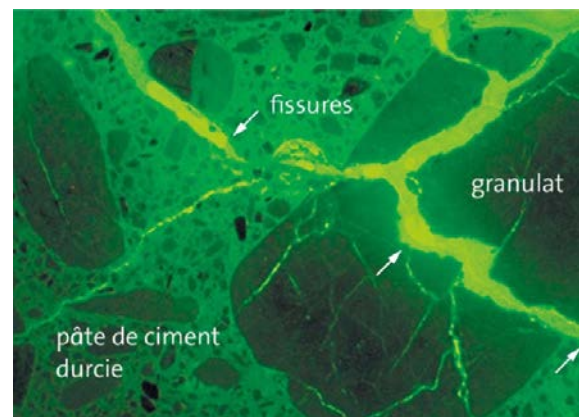


Fig 4.9.4
Fissuration typique due à la RAS du granulats et de la pâte de ciment (photo : lumière UV)

4.9 Réaction alcali-silice

Mesures préventives :

Les normes béton et plus particulièrement l'annexe I de la norme NBN B15-001 reprennent les mesures à appliquer pour prévenir le risque d'apparition de la RAS. Au moins une parmi les quatre mesures suivantes doit être appliquée :

- ▶ Utiliser des granulats non-réactifs pour l'ensemble du squelette granulaire.
- ▶ Utiliser un ciment LA (Low Alkali) au sens de la norme NBN B 12-109.
- ▶ Faire le calcul du bilan en alcalis de la formule béton en se basant sur des valeurs maximales (statistique ou absolu) de tous les composants du béton. La teneur maximale en Na_2O -équivalent (kg/m^3) admissible dépend du type de ciment utilisé (tab 4.9.1). Des tableaux similaires se trouvent dans la norme pour des combinaisons de ciment-addition ou des mélanges de ciment.
- ▶ Choisir une composition de béton satisfaisant à un essai de gonflement.

Empêcher les apports d'eau extérieurs par des mesures de conception appropriées (formes d'ouvrage facilitant l'évacuation des eaux, étanchéité fiable, contrôlable et entretenue,...) est une mesure très efficace également. Sa longévité dans le temps doit cependant être assurée, ce qui peut être parfois difficile à garantir.

Choix du ciment

Comme démontré dans le tableau 4.9.1, l'utilisation des ciments au laitier s'avère une mesure de prévention intéressante. Les réactions d'hydratation de ces ciments sont bénéfiques, car elles fixent les alcalins.

Ciment		Limite maximale du bilan des alcalins du béton (kg/m^3)
CEM I CEM II		3,5
CEM III/A	$S^a) < 50\%$	5,0
	$S^a) \geq 50\%$	6,0
CEM III/B		7,0
CEM III/C		10,0
CEM V/A		8,0

^{a)} S est la teneur en laitier du ciment en % par rapport à la somme des constituants principaux et secondaires

Tab 4.9.1
Valeurs limites pour le bilan des alcalins

4.10 Résistance au feu

Le béton face au feu

Lorsqu'il est soumis à des températures très élevées, le béton ne brûle pas, il ne dégage ni fumée ni gaz toxique. Au contraire, il s'oppose à la propagation du feu et, lorsqu'il y est exposé, sa température ne s'élève que très lentement. Le béton constitue donc une excellente barrière anti-feu sans qu'il soit besoin de le revêtir d'une protection supplémentaire. Seule une exposition intense et de longue durée permet d'observer des éclats de surface au droit des armatures (fig 4.10.1).

Le dimensionnement au feu des structures en béton est lié à leur robustesse, à la continuité et à l'enrobage des armatures et la bonne conception des assemblages.

Température critique

Avec ou sans armatures, le béton peut supporter sans dommage des températures jusqu'à 300°C. Cette température dite "critique" n'est atteinte que très lentement au contact du feu. Des essais ont montré que, lorsque la surface du béton est soumise à une flamme de 1 000°C (ce qui correspond approximativement à un feu de bois intense ou à un brûleur à gaz), il faut attendre une heure pour que la température critique atteigne une profondeur de 2 cm dans le béton, et une heure de plus pour qu'elle atteigne 5 cm.



Fig 4.10.1
Armatures mises à nu suite à l'éclatement du béton d'enrobage lors d'un incendie



Fig 4.10.2
Un bâtiment a été sauvé grâce au mur de béton

Mesures de protection supplémentaires pour des cas particuliers

Le béton constitue par lui-même une excellente protection contre le feu et les températures élevées. Au besoin, on peut encore améliorer cette protection en augmentant l'enrobage des armatures.

Dans les cas où le risque d'incendie, la charge thermique ou la température de service sont particulièrement élevés, des mesures supplémentaires permettent d'améliorer encore considérablement la résistance thermique du béton. Parmi ces mesures, on peut mentionner :

- ▶ L'exclusion de tout granulats carbonaté ou siliceux (le calcaire et le grès, par exemple) au profit de granulats résistant au feu, comme le basalte, l'argile expansée, la terre cuite, etc.
- ▶ L'ajout d'un stabilisateur céramique (par exemple de la poudre de tuile) dans le cas de températures de service très élevées.
- ▶ L'introduction dans le béton de fibres synthétiques qui seront volatilisées par les hautes températures et laisseront des micro canaux par où l'eau des pores pourra s'évaporer sans créer de surpression, évitant ainsi l'éclatement du béton d'enrobage.

Après l'incendie

Le contrôle des ouvrages touchés par le feu consiste en une inspection visuelle et une comparaison avec des cas similaires. Tout béton exposé à des températures dépassant 300°C doit être ausculté afin d'envisager le remplacement des couches dégradées.

Pour les bétons exposés à des températures inférieures à 300°C, souvent un simple nettoyage suffit.

La rapidité des réparations est un facteur important pour limiter au maximum les pertes d'activité qui suivent un incendie important.

La réparation est préférable à la démolition et la reconstruction, pour des raisons d'économie.

4.11 Approches de la durabilité du béton

Introduction

La durabilité peut se définir comme étant l'aptitude d'un bien à accomplir ses fonctions jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint.

Les critères de durabilité du béton ont longtemps été liés aux performances mécaniques requises à 28 jours et au comportement en service.

Cependant les ouvrages vieillissent aussi du fait de l'action qu'exerce sur eux l'environnement dans lequel ils se trouvent. L'ouvrage et son matériau doivent donc être adaptés à leur milieu. Le climat, l'agressivité des eaux, des sols et de l'atmosphère sont donc des paramètres à prendre en compte dès la conception du béton afin que celui-ci présente au final les caractéristiques physico-chimiques adaptées à l'environnement dans lequel il s'insérera.

Plus la fonction de l'ouvrage est importante mieux sa durabilité devra être garantie, pour maintenir d'une part la permanence de sa fonction et pour optimiser d'autre part le retour sur l'investissement consenti.

La durabilité, ou durée de vie, pour un béton de structure peut donc être définie comme la durée durant laquelle l'ouvrage ne nécessite pas de grosse opération de maintenance, garantissant un faible coût de réparation et d'entretien.

Différentes approches

Il existe plusieurs approches prévues par la norme béton NBN EN 206 pour appréhender la durabilité :

- ▶ approche prescriptive
- ▶ concepts de performance équivalente
- ▶ approche performantielle.

L'approche prescriptive

Cette approche, actuellement la plus courante, vise une durée de vie de 50 ans. Elle définit des spécifications essentiellement en termes de moyens (nature et dosage des constituants), reprises dans la norme NBN EN 206 et son annexe nationale NBN B15-001. Il n'y a donc pas de lien direct avec les différents mécanismes d'agression du béton. Elle est basée également sur les principes de dimensionnement repris dans Eurocode 2 (qui reprend notamment les règles concernant l'enrobage) et les principes de mise en œuvre repris dans la norme NBN EN 13670 et son annexe nationale NBN B15-400.

Les concepts de performance équivalente du béton

Les concepts de performance équivalente du béton (en Anglais ECPC pour Equivalent Concrete Performance Concept et EPCC pour Equivalent Performance of Combinations Concept) sont également prévus dans la norme NBN EN 206.

Ils permettent de modifier les exigences prescriptives en ce qui concerne le dosage minimal en liant équivalent et le rapport maximal eau/liant équivalent sous réserve de prouver que le béton a une équivalence de performance avec celle d'un béton de référence, en particulier vis-à-vis de sa durabilité.

En Belgique, les concepts de "performance équivalente" sont définis, pour un nombre restreint d'applications, dans la norme NBN B15-100. Dans son chapitre 7, la norme décrit la méthode comparant le comportement du béton, fabriqué avec le liant testé, avec celui d'un béton de référence qui satisfait aux exigences normalisées, aux règles de l'art et aux critères de durabilité pour l'application choisie.

4.11 Approches de la durabilité du béton

L'approche performantielle

Cette approche (en anglais PSC ou PBS pour Performance-Based Specification of Concrete) définit des stipulations en termes de résultats et donc de performances. Il s'agit d'une démarche prédictive, par essai ou modélisation, de la durabilité des structures en béton, basée soit sur l'évaluation "directe" des performances en relation avec un mécanisme d'agression, soit sur la notion d'indicateurs "indirects" de durabilité.

Cette approche peut être utilisée au niveau du design mais également en contrôle de conformité.

Cette méthode est typiquement utilisée dans le cas où la durabilité attendue de l'ouvrage dépasse 50 ans. La possibilité du recours à une telle approche est prévue dans les normes NBN EN 1992-1-1 (Eurocode) et NBN EN 206. Il n'y a cependant pas, à ce jour d'harmonisation au niveau européen des mesures directes ou des indicateurs de durabilité (choix des indicateurs, méthode d'essais et valeurs spécifiées).

Il n'y a non plus - actuellement - en Belgique de texte de référence pour l'application d'une approche performantielle. Dans le cadre d'ouvrage où la durabilité attendue est > 50 ans, les auteurs de projet se basent sur des documents prénormatifs tels que fib34 ou s'inspirent des approches utilisées dans d'autres pays. La France notamment est assez avancée dans le développement de cette démarche.

La première application en Europe de l'approche performantielle a été faite en 1995 sur les bétons du pont Vasco de Gama, à Lisbonne, dans la perspective d'une durée de vie contractuelle de 120 ans.

Perspectives

L'application des concepts de performance équivalente et l'approche performantielle ouvrent la porte à de nouveaux développements du béton, c'est une opportunité pour le monde du béton.

L'application de ces approches conduit généralement à l'utilisation de bétons plus techniques, surtout dans le cadre de l'approche performantielle. La réalisation des études de formulation et la préparation des chantiers demandent des délais importants, qui devront être prévus dans la planification des projets : certains essais de caractérisation des bétons peuvent demander jusqu'à 6 mois. La production de ces bétons demande du personnel formé et des installations de production performantes, fiables et très précises.

Si généralement le coût du béton dans le cadre de l'approche performantielle est plus élevé, la durée de vie des bâtiments et des ouvrages ainsi que les coûts de maintenance s'en trouvent réduits pour l'utilisateur.

Sécurité - Construction durable

5.1

Le béton et la construction durable

5.2

Santé et sécurité



5.1 Le béton et la construction durable

La définition du développement durable renvoie au rapport Brundtland "Our Common Future" des Nations Unies de 1987: "Le développement durable est le développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins".

Construire durablement est l'application de ce principe lors de l'élaboration de projets, de leur construction et de leur utilisation. On peut distinguer dans le développement durable 3 composantes (profit - people - planet) qui doivent pouvoir trouver un équilibre entre elles :

- ▶ Composante économique ("profit"): d'une part l'accent mis sur la durabilité doit être financièrement réalisable; d'autre part, l'attention portée à la construction durable offre également de nombreuses nouvelles opportunités commerciales. On parle de plus en plus de "prosperity" afin de prendre en considération les gains sociaux, en plus du profit économique.
- ▶ Composante sociale ("people"): l'attention aux personnes se traduit sur les chantiers par des aspects tels que la sécurité, la santé, le bien-être. Mais également sur les possibilités de faire appel à l'emploi local, sur l'interaction avec l'environnement, avec les riverains,...
- ▶ Composante environnementale ("planet"): la limitation de l'impact des activités humaines sur l'environnement et plus spécifiquement l'impact de la construction sur l'environnement. Il devient courant que l'évaluation environnementale soit effectuée sur l'ensemble du cycle de vie d'une structure: les matières premières utilisées et la construction elle-même mais également les consommations d'énergie durant la période d'utilisation, les réparations / rénovations voire la réhabilitation et enfin la démolition ou la réutilisation de certaines parties.

Il est établi que la construction et le logement sont à l'origine de $\pm 40\%$ de la consommation d'énergie au niveau mondial (dont la majeure partie durant l'occupation) et de $\pm 50\%$ de la consommation de matières premières d'origines naturelles.

La composante environnementale est donc bien plus large que le seul impact sur l'environnement des matériaux utilisés pour la construction, bien que son importance augmente à mesure que la performance énergétique des constructions s'améliore. D'autres aspects importants de la construction durable sont :

- ▶ l'emplacement du bâtiment (proximité des installations telles que les égouts, les transports en commun)
- ▶ la conception globale du bâtiment (adaptabilité, orientation (bénéfice des rayons solaires, de la lumière du jour), emprise au sol, conception structurale efficace, limitation de l'imperméabilisation des sols, ...)
- ▶ l'impact environnemental du chantier (y compris la réduction des déchets)
- ▶ la performance énergétique du bâtiment (isolation thermique, étanchéité à l'air, ventilation avec récupération de chaleur, utilisation de la capacité thermique des matériaux, géothermie, ... et le cas échéant intégration d'équipements de production d'énergie tels que chauffe-eau solaires, panneaux solaires, éoliennes, ...)
- ▶ la possibilité de démonter le bâtiment et de réutiliser ou recycler les matériaux
- ▶ la prise en compte de la santé, du bien-être et du confort des utilisateurs.

Des systèmes d'évaluation de l'impact environnemental tels que BREEAM, LEED, HQE, ... tentent de donner des scores (pondérés) à l'ensemble de ces éléments afin d'évaluer l'impact sur l'environnement des bâtiments. Les autorités peuvent utiliser ces systèmes ou des systèmes similaires comme incitations à la construction durable. Les dernières lignes directrices en matière de marchés publics laissent plus de place aux "green procurement" (achats durables).

5.1 Le béton et la construction durable

Construire durablement en béton

Le béton est généralement considéré comme un matériau durable. En effet, le béton et les éléments de construction réalisés avec celui-ci présentent de nombreux avantages :

- ▶ énergie "grise" limitée (énergie utilisée pour l'extraction, la production et le transport)
- ▶ production locale avec des distances de transport globalement faibles
- ▶ inertie thermique élevée (intéressante pour les bâtiments à faible consommation d'énergie ou constructions passives)
- ▶ très longue durée de vie, avec peu d'entretien
- ▶ pas de rejet de substances (organiques volatiles) dans l'air intérieur, protection contre le radon naturel dans le sous-sol
- ▶ pas de lixiviation de substances dans les eaux souterraines
- ▶ bonne résistance au feu
- ▶ bonnes propriétés acoustiques
- ▶ très bonne aptitude au recyclage.

Afin d'évaluer l'impact environnemental d'un bâtiment (unité fonctionnelle, par exemple mètre carré (m²) de planchers ou de murs), l'utilisation des EPD (Environmental Product Declarations), réalisés selon des règles normées européennes semble être la meilleure méthode actuellement. Cette analyse est réalisée sur l'entière du cycle de vie du matériau, sur un ensemble de critères également appelés catégories d'impact tels que réchauffement climatique, épuisement des ressources, ...

Bien que la production de ciment (15 à 20% de la masse du béton) émette une quantité importante de CO₂ et que le béton nécessite de grandes quantités de granulats - qui proviennent principalement de l'extraction de matières premières naturelles - l'industrie du ciment et du béton a mis en œuvre des moyens permettant de réduire ces impact environnementaux.

Fabrication du ciment

La figure 5.1.1 illustre la répartition de l'origine des principales émissions de CO₂ du ciment (CEM I). Il en ressort clairement que d'une part la réduction des combustibles fossiles et d'autre part le remplacement (partiel) du clinker sont les leviers les plus importants de réduction des émissions de CO₂ pour l'industrie du ciment et du béton.

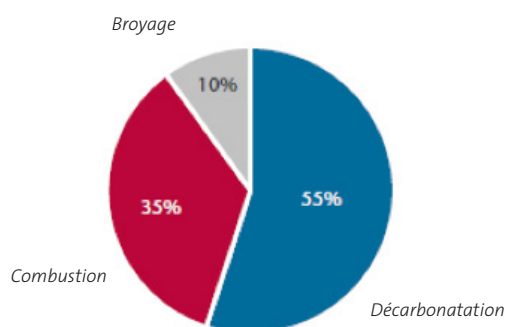


Fig 5.1.1
Répartition des émissions de CO₂ durant la production de ciment

Utilisation de combustibles alternatifs pour la production de clinker

Des sous-produits provenant d'autres industries sont prétraités dans des plates-formes industrielles dédiées pour être réutilisés comme combustibles dans les fours de cimenterie. De cette façon, les émissions de CO₂ des combustibles fossiles traditionnels sont naturellement diminuées. Ces combustibles alternatifs sont composés d'éléments en fin de vie - ne pouvant plus être recyclés et offrant un pouvoir calorifique important - tels par exemple des solvants mélangés à des sciures de bois, des farines et des graisses animales, de la biomasse, des pneus en caoutchouc finement déchiquetés. Dans ce processus, les substances minérales présentes dans ces produits sont récupérées dans le processus de fabrication du clinker : on parle dès lors de "co-process". La sélection et le dosage exact des combustibles alternatifs nécessitent un suivi qualité intensif. Le processus de production du clinker garantit la destruction complète des éléments contenus dans ces combustibles alternatifs. Le pourcentage de substitution des usines les plus performantes atteignent aujourd'hui un taux de substitution dépassant 90%.

5.1 Le béton et la construction durable

Substitution de clinker par des ajouts minéraux

La norme NBN EN 197-1 permet l'utilisation de plusieurs types de composants minéraux. En pratique, le laitier granulé de haut-fourneau, les cendres volantes et le filler calcaire sont les plus utilisés. En Belgique, le laitier de haut fourneau est utilisé depuis les années 1930. Cependant, outre les limites de la norme ciment, cette possibilité est conditionnée d'une part par la disponibilité limitée de laitier de haut fourneau et de cendres volantes et d'autre part par les propriétés des ciments (moins réactifs à jeune âge).

Le tableau 5.1.1 montre l'efficacité potentielle de la réduction de la teneur en clinker pour la diminution des émissions de CO₂ par tonne de ciment. Comme évoqué ci-avant, cela a des impacts sur les caractéristiques des ciments et des bétons produits (principalement la réactivité à jeune âge). Par ailleurs, une partie de clinker reste toujours nécessaire, d'une part pour l'activation du laitier et des cendres volantes, d'autre part pour assurer un pH suffisamment élevé du béton (milieu alcalin pour la protection des armatures contre la corrosion). En Belgique, la teneur moyenne en clinker des ciments (tous fabricants confondus) a diminué de 10% ces 10 dernières années et est actuellement de l'ordre de 62%.

Évolutions futures

De nombreuses recherches sont menées par les producteurs de ciment en collaboration avec le monde académique afin de pouvoir faire évoluer le cadre de la norme ciment NBN EN 197-1 :

- ▶ ciments avec des teneurs plus élevées en ajouts minéraux
- ▶ ciments avec de nouvelles combinaisons d'ajouts minéraux
- ▶ utilisation de nouveaux constituants
- ▶ nouveaux types de ciments avec d'autres formes minéralogiques, par exemple ciments sulfo-alumineux, ciments sursulfatés ou liants géopolymères.

Un processus de validation, comprenant entre autres des essais mécaniques et des recherches sur la durabilité, mais également l'influence sur la corrosion des armatures et la compatibilité avec les adjuvants pour le béton, est évidemment nécessaire pour déterminer l'aptitude à l'emploi de ces nouveaux types de ciment.

Des études sont également menées sur la captation et le stockage du CO₂ (dans le sol ou à d'autres fins). L'ensemble de ces actions est appelé CCS ou "Carbon Capture & Storage / Sequestration".

Constituant	Emission de CO ₂ par tonne de constituant
Clinker (K)	820
Cendres Volantes (V)	22
Laitier (S)	42
Calcaire (L)	32

Tab 5.1.1
Emission de CO₂ par tonne de constituant.
(source: VN Constructeurs)

5.1 Le béton et la construction durable

Transport des matières premières

Le transport des granulats et du ciment constitue une partie importante de l'impact environnemental du béton. Les mesures qui peuvent être prises sont les suivantes :

- ▶ privilégier les matières premières produites localement
- ▶ utiliser le transport par voie d'eau.

Limitation de la consommation de matières premières

La consommation de matières premières pour la production de béton peut être limitée par les mesures suivantes :

- ▶ éviter et/ou réutiliser les retours béton (dans le respect de la norme NBN EN 206)
- ▶ utilisation d'eau naturelle au lieu de l'eau de réseau
- ▶ décantation et réutilisation des eaux de lavage/rinçage.

Une contribution importante à la limitation de l'utilisation des ressources naturelles peut être faite en recyclant le béton à la fin de son cycle de vie. Toutefois, le recyclage doit se faire en respectant un processus qualité clairement établi :

- ▶ démolition sélective
- ▶ cahier des charges d'acceptation et de gestion des flux entrants dans l'installation de recyclage
- ▶ élimination soigneuse de toute pollution avant opération de concassage
- ▶ contrôle qualité du produit selon les exigences des normes granulats (NBN EN 12620).

Il est important que les granulats recyclés soient utilisés de façon appropriée. La norme NBN B15-001 spécifie la quantité maximale admissible de granulats recyclés pouvant être utilisés, en fonction de leur qualité et de la classe d'environnement (Tab 5.1.2).

Les matériaux de qualité moindre peuvent être utilisés comme matériau de remplissage ou de sous-couches.

Durabilité du béton

La durée de vie du béton est un aspect parfois oublié, probablement parce que celui-ci est rarement endommagé dans les constructions courantes. Cependant, certaines structures nécessitent beaucoup d'entretien et, dans certains cas, doivent même être démolies parce qu'elles perdent leur fonctionnalité. C'est parfois le cas des constructions en béton le long de la côte et des structures de génie civil (routes et ouvrages d'art, murs de quais, écluses ...). En fin de compte, ces derniers sont souvent utilisés beaucoup plus longtemps que prévu, souvent avec un entretien insuffisant ou inexistant.

Pour de telles constructions, il est important que la durée de vie de l'ouvrage soit bien définie (si elle s'écarte de la norme, soit 50 ans) et que toutes les mesures nécessaires soient prises pour que la structure puisse résister aux différents mécanismes potentiels d'endommagement identifiés (voir chapitre 4).

Enfin, l'utilisation de bétons innovants peut être préconisée de manière à combiner, outre la fonction portante, les fonctions les plus diverses en un seul matériau : béton isolant (béton cellulaire), béton décoratif, béton à (ultra) hautes performances, ... Ces matériaux participent pleinement à une démarche de construction durable.

	Classes d'environnement			
	EI	EE1	EE2, EE3, EA1	EE4, ES1, ES2, ES3, ES4, EA2, EA3
Granulat de béton de type A+ ¹⁾	30%	30%	20%	0%
Granulat mixte de type B+ ²⁾	20%	0%	0%	0%

¹⁾ la norme NBN B15-001 définit des critères pour la composition et les propriétés des granulats débris de béton "A+"
²⁾ la norme NBN B15-001 définit des critères pour la composition et les propriétés des granulats mixte de béton "B+"

Tab 5.1.2

Pourcentage maximum de remplacement des gravillons (% volume) en fonction de la classe d'environnement pour du béton armé

5.2 Santé et sécurité

Sécurité lors de l'utilisation des ciments et du béton

Le ciment est un liant hydraulique. Au contact de l'eau ou de l'humidité, la réaction d'hydratation mène quasi immédiatement à une forte augmentation du pH pour atteindre une valeur de ± 13 . Par conséquent, le ciment et le béton peuvent provoquer des irritations voire des brûlures en cas de contact prolongé avec la peau ou de projection dans les yeux. Il est donc indispensable de porter des équipements de protection pour la mise en œuvre des bétons et des produits à base de ciment : lunettes, combinaisons, gants, bottes,... En cas d'irritation, rincer à l'eau abondamment et consulter un médecin.

Les fiches de sécurité du ciment et du béton peuvent être obtenues auprès des producteurs.

Le ciment et la directive européenne sur le chrome VI

Le chrome VI est naturellement présent en quantité infinitésimale dans les matières premières extraites en carrières qui sont utilisées pour la production du ciment. Certaines personnes peuvent développer une réaction allergique lorsqu'il sont en contact avec le chrome VI. La directive européenne 2003/53/CE, transcrite en droit belge par arrêté royal, impose que "le ciment et les préparations contenant du ciment ne peuvent être utilisés ou mis sur le marché s'ils contiennent, lorsqu'ils sont hydratés, plus de 0,0002% (2 ppm) de chrome VI soluble du poids sec total du ciment".

Lors de la fabrication, on rajoute donc au ciment, si nécessaire, un agent réducteur qui permet de garantir une teneur en chrome VI inférieure à la limite imposée. La période d'efficacité de l'agent réducteur est mentionnée sur chaque bordereau de livraison ou sur chaque sac. Ce délai est valable dans des conditions de stockage appropriées: le ciment doit être stocké dans un silo ou en sac, à l'abri de l'humidité, et ne doit pas subir une aération excessive.

Il est important de rappeler que la plupart des cas de dermatoses rencontrés sont liés à une irritation de la peau due au caractère alcalin de la pâte de ciment. Elles peuvent apparaître si les consignes de port d'équipements de protection individuelle ne sont pas respectées. La réduction de la teneur en chrome VI soluble des ciments ne doit en aucun cas dispenser les utilisateurs de l'usage des gants, de chaussures imperméables, de combinaisons, de lunettes,...

Livraison du ciment

Le déchargement du ciment vrac des véhicules citernes vers les silos des centrales à béton se fait pas poussage à l'air comprimé à l'aide d'un compresseur monté sur les véhicules de livraison. Comme dans tout process utilisant de l'air comprimé il existe des risques de rupture de flexibles ou de raccords en cas d'usure de ces derniers ou de montée exagérée en pression.

Les conséquences de ce risque (brutal coup de fouet du flexible) peuvent être limitées par la mise en place d'un câble de retenue ou câble "anti-coup de fouet" (fig 5.2.1) et ainsi éviter des blessures graves. Ce câble est une mesure supplémentaire de sécurité et ne remplace bien sûr pas une inspection et un entretien régulier de tous les flexibles et raccords.



Fig 5.2.1
Placement
du câble anti
coup de fouet

5.2 Santé et sécurité

Lors du poussage du ciment dans le silo, l'air présent dans le silo doit pouvoir s'évacuer pour laisser la place au ciment. Afin d'éviter une pollution environnementale par des poussières de ciment, cet air est filtré par des filtres montés en partie haute des silos (fig 5.2.2). Il est primordial de vérifier régulièrement l'absence de colmatage de ces filtres et le bon fonctionnement des soupapes de sécurité. Un filtre colmaté peut exploser et provoquer de graves blessures lors de sa chute.



Fig 5.2.2
Filtres au sommet des silos d'une centrale à béton

Pompage du béton

La mise en place de béton pompé génère quelques risques spécifiques qu'il faut se garder de sous-évaluer. En particulier, il faut toujours vérifier si l'on a bien tenu compte de :

- ▶ l'augmentation de la pression du béton sur les coffrages verticaux
- ▶ la présence éventuelle de ligne électrique aérienne dans le champ de la flèche de distribution
- ▶ la capacité portante de l'emplacement prévu pour la pompe et ses accessoires (mât de répartition, etc.)
- ▶ l'impact de risques de coups de fouets du flexible.

Risque électrique

En cas de contact de la flèche de la pompe avec une ligne électrique, la pompe est sous tension. Tout contact avec celle-ci entraîne donc un choc électrique. Le sol autour de la machine est également mis au potentiel. Cette tension diminue avec la distance. Dès lors si on fait un pas, il y a une différence de potentiel entre les deux pieds, le courant traversant alors le corps en circulant d'un pied à l'autre. Il n'est pas nécessaire d'entrer en contact avec une ligne électrique pour mettre la pompe sous tension. En deçà d'une certaine distance, le courant traverse l'air en formant un arc et rejoint le bras de la pompe.

En cas de proximité de lignes à haute tension, il est donc uniquement permis de travailler si la tension des lignes est coupée pendant la durée des travaux. Si cela n'est pas possible, il faut respecter une distance de sécurité minimale de 6 m entre la flèche et les cables. La pompe doit également être mise à la terre de manière efficace par précaution lorsque l'on travaille près de lignes électriques.

5.2 Santé et sécurité

En raison des mouvements multidirectionnels de la flèche de la pompe et le besoin de se concentrer sur le point de livraison, l'opérateur de la pompe à béton peut perdre de vue la position de la flèche par rapport aux lignes électriques. Selon sa position par rapport à la ligne électrique, il peut être impossible pour l'opérateur d'évaluer la distance entre sa flèche et la ligne électrique. Dans ces cas, si la flèche de la pompe n'est pas équipée d'un dispositif de détection de lignes, un "observateur" doit être désigné pour scruter à tout moment la position de la flèche par rapport à celle de la ligne électrique et rester en contact radio avec l'opérateur de pompe (fig 5.2.3).

Risques de coups de fouets

Le tuyau de refoulement en caoutchouc pend généralement de manière verticale à l'extrémité de la flèche mobile (fig 5.2.4). Si de l'air est aspiré dans la pompe à béton, la compression qui en découle peut créer un effet de fouet lorsqu'il quitte le tuyau de refoulement. Un tuyau muni d'un collier métallique à son extrémité ne peut en aucun cas être utilisé comme tuyau de refoulement. De même un mouvement soudain et inattendu de la flèche ou du tuyau, n'est jamais à exclure. Le nombre de personnes se trouvant dans la zone en contact proche du tuyau ou de la flèche sera donc limité au minimum nécessaire.

Mise en œuvre du béton au cufa

La mise en œuvre du béton au cufa est une opération courante. Un cufa rempli de béton représente une masse de plusieurs tonnes et a donc une inertie importante. Afin d'assurer une mise en œuvre du béton au cufa dans les meilleures conditions de sécurité, on veillera particulièrement aux points suivants :

- ▶ Assurer un contrôle périodique de tout matériel de levage.
- ▶ Lors du déplacement du cufa, ne pas se positionner entre le cufa et le camion ou tout autre objet fixe afin d'éviter les risques d'écrasement. Toujours respecter une distance de sécurité. Ne jamais se déplacer sous des charges suspendues.
- ▶ En cas de communication défailante ou difficile avec l'opérateur de grue, interrompre les travaux.
- ▶ S'assurer que le matériel de levage est adapté à la charge (poids, ancrage, fixation).
- ▶ Ne jamais tenter de remettre des résidus de béton contenus dans le cufa dans le camion mixer.
- ▶ Lors du remplissage ou du rinçage du cufa, ne pas surélever celui-ci. Il doit être posé au sol de façon stable.
- ▶ En cas de vent fort entraînant des oscillations du cufa, interrompre les travaux.
- ▶ Ne jamais essayer de retenir le cufa manuellement.
- ▶ Prévoir des plateformes stables et munies de garde-corps au-dessus des coffrages.

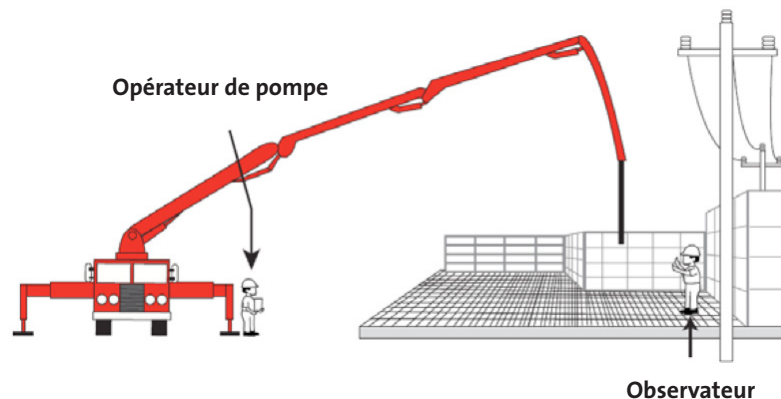


Fig 5.2.3
Opérateur assisté d'un observateur près de lignes électriques



Fig 5.2.4
Zone de risque autour du tuyau de refoulement

Glossaire



Glossaire

A

Acier d'armature du béton

Acier apte à être employé comme armature passive.

Addition

Matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières.

La norme NBN EN 206 traite deux types d'additions minérales : les additions quasiment inertes (de Type I) et les additions chimiquement réactives (de Type II)

Adjuvant

Produit chimique ajouté au béton durant le processus de malaxage, en petites quantités par rapport à la masse de ciment, pour modifier les propriétés du béton frais ou durci.

Air entraîné

Micro-bulles d'air d'un diamètre de 5 µm à 100 µm, qui sont intentionnellement créés par l'ajout d'un entraîneur d'air pendant le malaxage du béton.

Ajout

Produits incorporés au béton, dans le but d'en améliorer certaines propriétés, et qui ne sont ni des ciments ni des granulats ni de l'eau de gâchage ni des additions. Il s'agit par exemple de fibres, de produits augmentant la viscosité ou la thixotropie, des colorants...

Alcalis (également appelés alcalins)

Substances qui forment dans l'eau des solutions alcalines. Les alcalis appartiennent au groupe des bases. Dans le ciment et le béton, on exprime les alcalis Na_2O et K_2O sous la forme de Na_2O -équivalent ($= \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O}$).

Armature

Barres ou treillis soudés en acier de l'armature passive ainsi que gaines et câbles en acier des unités précontraintes. Les fibres métalliques peuvent également, sous certaines conditions, être considérées comme armatures passives.

B

Béton

Matériau formé par mélange de ciment, de sable, de gravillon et d'eau, et éventuellement d'adjuvants, d'additions et d'ajouts.

Béton à air entraîné

Béton confectionné en utilisant un entraîneur d'air.

Béton apparent (Béton de parement)

Béton, dont les surfaces coffrées remplissent une fonction esthétique avec des effets créés par la peau du coffrage.

Béton armé

Béton dont l'armature est constitué de barres d'armatures passives en acier ou de fibres métalliques. Les barres sont soit utilisées telles quelles (et ligaturées sur chantier) soit sous forme de treillis soit sous forme de cages d'armature préfabriquées.

Béton autoplaçant (BAP)

Béton qui coule sous l'effet de son propre poids et se compacte lui-même en remplissant le coffrage comprenant déjà l'armature, les réservations etc. tout en conservant son homogénéité.

Béton à Composition Prescrite (BCP)

Béton dont la composition et les composants sont prescrits au producteur du béton. Le producteur est responsable de fournir un béton de la composition exigée.

Béton durci

Béton à l'état solide ayant acquis une résistance notable.

Béton frais

Béton entièrement mélangé et encore dans un état permettant de le compacter avec la méthode choisie.

Béton à Hautes Performances (BHP)

Béton appartenant à une classe de résistance à la compression supérieure à C50/60.

Béton léger

Béton dont la masse volumique après séchage à l'étuve est supérieure ou égale à 800 kg/m³ mais inférieure ou égale à 2 000 kg/m³. Il est produit entièrement ou partiellement à partir de granulats légers.

Béton lourd

Béton dont la masse volumique après séchage à l'étuve est supérieure à 2 600 kg/m³. Béton écran pour la construction de réacteurs nucléaires et de protection civile avec une structure dense et une masse volumique sèche supérieure à 2 600 kg/m³ jusqu'à environ 3 500 kg/m³ grâce à l'emploi de granulats d'une masse volumique élevée.

Béton de masse

Béton pour des éléments d'ouvrages d'une épaisseur supérieure à environ 60 cm

Béton de masse volumique normale

Béton dont la masse volumique après séchage à l'étuve est supérieure à 2 000 kg/m³ mais inférieure ou égale à 2 600 kg/m³.

Béton pompé

Béton frais, qui est pompé dans des tuyaux à l'endroit de sa mise en place.

Béton précontraint

Béton soumis à des contraintes de compression engendrées par la tension de câbles en acier préalablement incorporés dans l'ouvrage et permettant d'augmenter sa résistance en traction. Les câbles en acier peuvent être tendus avant le coulage du béton dans l'ouvrage, on parle alors de "pré-tension" ou bien, ils peuvent être mise en place dans une gaine et être mis en tension après coulage et durcissement du béton, on parle alors de "post-tension".

Béton prêt à l'emploi

Béton confectionné dans une centrale à béton et transporté avec des véhicules adéquats (appelés camions mixer) au chantier où il est livré prêt pour la mise en place.

Béton projeté

Béton mis en place et compacté par application de couches projetées selon des procédés opérant par voie sèche ou par voie humide.

Béton à Propriétés (ou performances) Spécifiées (BPS)

Béton dont les propriétés exigées sont spécifiées vis-à-vis du producteur. Le producteur de béton est responsable de la conformité à l'ensemble des propriétés et exigences complémentaires spécifiées.

Béton renforcé de fibres

Béton armé à l'aide d'un ajout de fibres métalliques ou synthétiques de très faible section.

C

Camion mixer (Camion malaxeur)

Véhicule utilisé pour le transport et la livraison du béton, équipé d'une cuve rotative, capable de maintenir l'homogénéité du béton durant le transport.

Carbonatation

Réaction de la chaux Ca(OH)_2 de la pâte de ciment avec le CO_2 de l'air. Par conséquence, la valeur pH de la solution interstitielle du béton baisse et la protection contre la corrosion de l'acier d'armature est altérée.

Chaleur d'hydratation

Quantité de chaleur qui se développe suite à l'hydratation du ciment pendant un intervalle de temps défini.

Ciment

Matériau minéral finement moulu qui, mélangé avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Classe d'environnement

Classification des éléments d'ouvrages qui décrit les environnements courants s'appliquant généralement aux pratiques belges en matière de béton et les risques qui en résultent concernant la durabilité du béton.

Classe d'exposition

Classification des éléments d'ouvrage qui décrit les mécanismes d'agressions et les risques qui en résultent concernant la durabilité du béton.

Classe de chlorures

Classe normée du béton en fonction de sa teneur en chlorures, calculée à partir de la teneur en chlorures de chacun des constituants, p. ex. pour le béton armé Cl 0,40.

Classe de consistance

Répartition du béton en classes normées de consistance en fonction de la méthode de mesure, p.ex. pour l'affaissement S1 à S5.

Classe de résistance à la compression

Subdivision du béton en classes normées en fonction de sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours, p. ex. pour du béton de masse volumique normale et lourd C8/10 à C100/115.

Clinker Portland

Constituant principal entrant dans la fabrication du ciment, obtenu par calcination d'un mélange précis de matières premières. Son hydratation conduit au durcissement du ciment.

CO₂

Le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO_2) est un composé chimique constitué de carbone et d'oxygène, qui appartient aux gaz responsables de l'effet de serre. Il se forme dans l'industrie du ciment principalement durant le début de la fabrication du clinker durant la phase de décarbonatation du carbonate de calcium, matière première principale, en chaux et dioxyde de carbone selon l'équation chimique suivante: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

Consistance

Caractéristique du matériau, indiquant l'ouvrabilité et la compactibilité du béton frais.

Cure

Mesure de protection immédiate du béton contre la dessiccation et les actions externes, jusqu'à ce qu'il ait atteint une résistance suffisante, en particulier dans la zone proche de la surface du béton.

Glossaire

D

Déclaration des Performances

(Declaration of Performance ou DoP en anglais)

Document obligatoire - pour les produits de construction dont l'usage répond au champ d'application d'une norme européenne harmonisée - dans lequel le producteur déclare les caractéristiques relatives aux exigences fondamentales du Règlement des Produits de Construction.

Durée de service (durée de vie)

Laps de temps prévu dans la convention d'utilisation pour l'utilisation de l'ouvrage.

E

Eau efficace

Teneur en eau totale du béton frais diminuée de la quantité qui peut être absorbée par les granulats. L'eau efficace est utilisée dans le calcul du facteur Eau/Ciment.

Eau de gâchage

L'eau de gâchage représente la quantité d'eau qui est ajoutée au mélange de ciment, additions et granulats pendant le malaxage du béton.

Eau totale

L'eau de gâchage additionnée de l'eau déjà contenue dans et à la surface des granulats, additionnée de l'eau des adjuvants et des ajouts utilisés sous la forme de suspension et toute eau résultant de l'ajout de glace ou de chauffage à la vapeur.

Eau recyclée

Eau récupérée provenant du nettoyage du malaxeur et du camion malaxeur à la centrale à béton et qui est traitée avant d'être réutilisée pour la fabrication du béton.

Efflorescence

Cristallisation de sels en surface du béton.

Élément de béton préfabriqué

Élément en béton fabriqué en usine ou sur le chantier et définitivement mis en place à un moment ultérieur.

Enrobage de l'armature

Épaisseur de recouvrement mesurée entre le côté extérieur de l'armature la plus proche de la surface et la surface du béton.

Essai initial (ITT pour Initial Type Testing)

Essai réalisé au début de la production d'une nouvelle sorte de béton ou de la mise en service d'une installation de production sous les conditions de production, destiné à vérifier la conformité à l'ensemble des exigences de la spécification.

F

Famille de béton

Groupe de bétons dont une relation fiable entre les propriétés pertinentes est établie et documentée.

Filler

Additions inertes dont la majorité des grains a un diamètre inférieur ou égal à 0,063 mm.

Fluage

Déformation dans le temps d'un élément en béton (qui s'additionne à la déformation élastique) sous influence d'une charge constante.

G

Gâchage

Opération de mélange du ciment avec l'eau. Par extension, opération de fabrication du béton.

Granulat

Matériau minéral granulaire apte à être utilisé dans du béton. Les granulats peuvent être naturels, manufacturés ou recyclés à partir de matériaux précédemment utilisés en construction.

Granulat courant

Granulat ayant, après séchage à l'étuve, une masse volumique supérieure à 2 000 kg/m³ et inférieure à 3 000 kg/m³.

Granulat léger

Granulat ayant, après séchage à l'étuve, une masse volumique inférieure ou égale à 2 000 kg/m³.

Granulat lourd

Granulat ayant, après séchage à l'étuve, une masse volumique supérieure à 3 000 kg/m³.

Grave

Granulat composé d'un mélange de granulats fins (sable) et de gravillons (gravier roulé ou concassé).

H

Hydratation

Réaction chimique du ciment avec de l'eau, transformant les minéraux du ciment en composés contenant de l'eau, appelés phases hydratées.

M

Module d'élasticité

Caractéristique du matériau, indiquant la relation contrainte/déformation dans le champ de déformation linéaire élastique.

O

Organisme de certification

Organisme - accrédité par l'Etat - qui évalue la conformité d'un produit de construction (p.ex. béton, ciment, granulats) aux normes techniques associées et qui délivre un certificat de conformité.

P

Pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des substances naturelles ou artificielles employées comme liant du fait de leur composition siliceuse ou alumino-siliceuse. Les pouzzolanes naturelles sont des roches d'origine volcanique. Les pouzzolanes artificielles sont des argiles calcinées, de la fumée de silice et des cendres volantes.

R

Rapport eau/ciment

Rapport massique de la teneur en eau efficace à la teneur en ciment du béton frais, en abrégé rapport E/C. Dans le cas d'utilisation d'additions de type II, la teneur en ciment peut être remplacée par la teneur en ciment équivalent ou la teneur en liant équivalent, calculée comme (ciment + k . addition).

Réaction Alkali-Silice (RAS),

Appelée également Réaction Alkali-Granulats (RAG) ou encore Alkali-Silica Reaction (ASR) en anglais. Réaction chimique entre la silice soluble contenue dans certains granulats et les alcalis contenus dans le béton, principalement apportés par le ciment. Il se forme un gel qui gonfle lorsqu'il absorbe de l'eau. L'augmentation volumique crée des contraintes de tension au sein du béton qui peut provoquer d'importants dégâts (fissuration interne et/ou externe).

Rendement volumique

Rapport entre la masse volumique théorique (calculée sur base de la somme des masses de constituants pesés pour fabriquer 1 m³ de béton) et la masse volumique réelle (mesurée sur béton frais selon la norme NBN EN 12350-6).

Résistance caractéristique

Valeur statistique minimale de résistance au delà de laquelle se situe 95% de la population de tous les résultats pour le type de béton et la période d'évaluation considérés.

Résistance à la carbonatation

Caractéristique du béton, indiquant sa résistance vis-à-vis de la pénétration du CO₂ (carbonatation), mesurée dans le cadre d'un essai normé de carbonatation accélérée.

Résistance aux chlorures

Caractéristique du béton, indiquant sa résistance vis-à-vis de la pénétration des chlorures, mesurée dans le cadre d'un essai normé de migration de chlorures.

Résistance à la compression

Caractéristique du béton, indiquant sa résistance vis-à-vis des charges de compression externes, mesurée dans le cadre d'un essai normé de compression.

Résistance au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage

Caractéristique du béton, indiquant sa résistance vis-à-vis des cycles de gel et dégel en présence d'un agent de déverglaçage, mesurée dans le cadre d'un essai normé de résistance au gel et sel.

Ressuage

Remontée d'eau à la surface du béton frais après compactage, suite notamment à une composition inadéquate du béton.

Retrait de dessiccation

Diminution du volume du béton, causée par le séchage du béton dès le début de son durcissement.

Retrait endogène

Diminution du volume du béton, causée par l'hydratation du ciment (dessiccation interne). Surtout important en cas de rapport E/C bas.

Retrait plastique

Retrait qui résulte des tensions capillaires lors de l'évaporation de l'eau dans le béton encore frais, induisant une diminution volumique du béton.

Retrait thermique

Diminution de volume du béton liée à une baisse de la température, soit dans le béton jeune après l'échauffement durant l'hydratation, soit dans le béton durci sous des variations de température ambiante.

Glossaire

T

Teneur en air

Volume d'air dans le béton frais, créé durant le processus de malaxage et non expulsé durant le compactage (air occlus) ou créé par l'utilisation d'un entraîneur d'air (air entraîné).

Teneur en fines

Dans le béton : somme de la teneur en ciment, de la proportion des granulats inférieure à 0,250 mm ainsi que, le cas échéant, des additions au béton. Dans certains contextes on considère les fines à 0,125 mm (si tel est le cas dans ce document c'est clairement indiqué).

Dans le granulat : fraction granulaire passant au tamis de 0,063 mm.

Thixotropie

Augmentation de la viscosité du béton lorsqu'il est laissé au repos. Le phénomène est réversible suite à un remalaxage énergétique et n'est donc pas à confondre avec la perte d'ouvrabilité dans le temps.

V

Volume de la pâte de ciment

Volume du ciment, de l'eau efficace, des additions, des ajouts sous forme de poudre et de l'air incorporé.

Bibliographie, normes et liens utiles



Bibliographie, normes et liens utiles

Bibliographie

AFGC (Association Française de Génie Civil)
Conception des bétons pour une durée
de vie donnée des ouvrages
Paris - 2004, France

Baron/Ollivier (sous la direction de)
Les bétons – Bases et données pour leur formulation
Eyrolles, Paris - 1996, France

Bekaert
Steel – and Synthetic Fibre Reinforced Concrete
Zwevegem - 2011, Belgique

Cimbéton
Construire avec les bétons
Le Moniteur, Paris – 2000, France

Cimbéton
Fiches techniques G10 et G11;
Paris - 2003 et 2006, France

CRR (Centre de Recherches Routières)
R82/11 : Code de bonne pratique pour les revêtements
industriels extérieurs en béton
Bruxelles - 2011, Belgique

CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction)
NIT 204 : Sols industriels à base de ciment (en cours de révi-
sion)
Bruxelles - 1997, Belgique

CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction)
V.Pollet et B.Dooms
Digest n°12. Le bétonnage en période hivernale
Bruxelles - 2012, Belgique

Dreux/Festa
Nouveau guide du béton et de ses constituants
Eyrolles, Paris - 1998, France

Febelcem
ABC du ciment et du béton
Bruxelles – 2005, Belgique

Febelcem
Dossiers Ciment (publication régulière)
Bruxelles – Publication régulière, Belgique

fib (International Federation for Structural Concrete)
Bulletin 34: Model code for Service Life Design
Lausanne - 2006, Suisse

GBB (Groupement Belge du Béton)
Technologie du béton
Bruxelles - 2009, Belgique

Holcim (Suisse)
Guide pratique du béton, 6ème édition
Zurich – 2015, Suisse

Kosmatka/Panarese/Allen/Cumming
Design and Control of Concrete Mixtures
Portland Cement Association
Chicago - 1991, USA

Neville
Properties of Concrete
Pearson Education Ltd, Harlow - 2011, England

Ollivier/Vichot (sous la direction de)
La durabilité des bétons
Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées
Paris – 2008, France

Soletanche Bachy
Guide technique, 2ème édition
Rueil Malmaison – 2013, France

TFB (Technik und Forschung im Betonbau)
Bulletin du ciment,
Mensuel du service de recherche et conseils techniques
en matière de ciment et béton
Wildegg, Suisse

Venuat
La pratique des ciments, mortiers et bétons
Tome 1 : La pratique des liants et des bétons
Tome 2 : Pratique du bétonnage, pathologie et applications
Editions du Moniteur, Paris - 1989, France

Vereniging Nederlandse Constructeurs
Duurzaam Construeren met materialen
Gorinchem - 2013, Pays-Bas

Bibliographie, normes et liens utiles

Liste des normes et documents de référence

Les documents dont il est fait référence dans le texte sont les suivants :

- NBN EN 197-1**: Ciment - Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, octobre 2011
- NBN EN 197-2**: Ciment - Partie 2: Evaluation de la conformité, février 2014
- NBN EN 196-8**: Méthodes d'essai des ciments - Partie 8: Chaleur d'hydratation - Méthode par dissolution, mai 2010
- NBN EN 196-9**: Méthodes d'essai des ciments - Partie 9: Chaleur d'hydratation - Méthode semi-adiabatique, mai 2010
- NBN EN 206+A1**: Béton - Spécification, performances, production et conformité, novembre 2016
- NBN EN 413-1**: Ciment à maçonner - Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité, juin 2011
- NBN EN 450-1**: Cendres volantes pour béton - Partie 1: Définition, spécifications et critères de conformité, septembre 2012
- NBN EN 934-2+A1**: Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2: Adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, juillet 2012
- NBN EN 1008**: Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton, septembre 2002
- NBN EN 1536+A1**: Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Pieux forés, août 2015
- NBN EN 1538+A1**: Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Parois moulées, juillet 2015
- NBN EN 1992-1-1/AC**: Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments, novembre 2010
- NBN EN 12620+A1**: Granulats pour béton, mai 2008
- NBN EN 12878**: Pigments de coloration des matériaux de construction à base de ciment et/ou de chaux - Spécifications et méthodes d'essai, mai 2014
- NBN EN 13263-1+A1**: Fumée de silice pour béton - Partie 1: Définitions, exigences et critères de conformité, mai 2009
- NBN EN 13295**: Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la résistance à la carbonatation, juillet 2004
- NBN EN 14216**: Ciments - Composition, spécifications et critères de conformité de ciments spéciaux à très faible chaleur d'hydratation, août 2015
- NBN EN 14630**: Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénolphtaléine, mars 2007
- NBN EN 14647/AC**: Ciment d'aluminates de calcium - Composition, spécifications et critères de conformité, novembre 2006
- NBN EN 14889-1**: Fibres pour béton - Partie 1: Fibres d'acier - Définitions, spécifications et conformité, mars 2007
- NBN EN 14889-2**: Fibres pour béton - Partie 2: Fibres polymère - Définition, spécifications et conformité, mars 2007
- NBN EN 15167-1**: Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1: Définitions, exigences et critères de conformité, mars 2007
- NBN EN 15743+A1**: Ciment sursulfaté - Composition, spécifications et critères de conformité, mai 2015
- NBN EN ISO 9001**: Systèmes de management de la qualité - Exigences, septembre 2015
- NBN B12-108**: Ciments - Ciments à haute résistance aux sulfates, juin 2015
- NBN B12-109**: Ciments - Ciments à teneur limitée en alcalis, juillet 2015
- NBN B12-110**: Ciments - Ciments Portland à haute résistance initiale, janvier 2002
- NBN B15-001**: Béton - Spécification, performances, production et conformité - Complément national à la NBN EN 206:2013+A1:2016, parution 2018
- NBN B15-007**: Béton apparent - Classifications et spécifications, mai 2018
- NBN B15-100**: Méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de ciments et d'additions destinés au béton, parution 2018

Bibliographie, normes et liens utiles

NBN B15-215: Essais sur béton durci - Absorption d'eau par immersion, mai 2018

NBN B 15-400/AC: Exécution des structures en béton - Supplément national à la NBN EN 13670:2010, avril 2016

NT Build 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, novembre 1999

CEN/TR 15177: Testing the freeze-thaw resistance of concrete - Internal structural damage, avril 2006

CEN/TS 12390-9: Essais sur béton durci - Partie 9: Résistance au gel dégel-dégel en présence de sels de déverglaçage (écaillage), décembre 2016

PTV 411: Codification des granulats conformes aux normes NBN EN 12620, NBN EN 13043, NBN EN 13139 et NBN EN 13242, Edition 2.3 - 2017

PTV 603: Ciments - caractéristiques additionnelles, Edition 3.2 - 2016

Cahier des Charges Type (CCT) Qualiroutes, Service Public de Wallonie

CCT 2015 - Cahier des Charges Type relatif aux Voiries Région de Bruxelles-Capitale

SB 250 - Standaardbestek 250 voor de wegenbouw Administratie Wegen en Verkeer, Vlaamse Overheid

Liens utiles

CRIC (Centre national de Recherche scientifique et technique pour l'Industrie Cimentière)
www.cric.be

FEBE (Fédération de l'industrie du Béton préfabriqué)
www.febe.be

Febelcem (Fédération de l'Industrie Cimentière Belge)
www.febelcem.be

FedBeton (Fédération belge du Béton Prêt à l'Emploi)
www.fedbeton.be

GBB (Groupement Belge du Béton)
www.gbb-bbg.be

Infobeton
www.infobeton.be

Probeton
www.probeton.be

SPW (Service Public de Wallonie)
Qualité et Construction
qc.spw.wallonie.be/

Bruxelles Mobilité – Service Public Régional de Bruxelles
www.mobilite-mobiliteit.brussels

Expertise Beton en Staal - Departement Mobiliteit en Openbare Werken (MOW)
www.expertisebetonenstaal.be

Holcim (Belgique) S.A./ Holcim (België) N.V.
Avenue Robert Schuman 71
B-1401 Nivelles
Tel +32 67 87 66 01
www.holcim.be



 A member of
LafargeHolcim