

VERS UNE COMPOSITION OPTIMALE DES BÉTONS ROUTIERS

- CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS
- CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX
- CARACTÉRISTIQUES DE SURFACE DES REVÊTEMENTS
- COMPOSITION DES BÉTONS
- QUELQUES APPLICATIONS SPÉCIALES



VERS UNE COMPOSITION OPTIMALE DES BÉTONS ROUTIERS

- CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS
- CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX
- CARACTÉRISTIQUES DE SURFACE DES REVÊTEMENTS
- COMPOSITION DES BÉTONS
- QUELQUES APPLICATIONS SPÉCIALES

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	4
1. LES CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS POUR REVÊTEMENTS ET ACCESSOIRES DE CHAUSSÉES	5
1.1. Recommandations en termes de composition et de résistance à la compression	5
1.2. La teneur en eau des bétons	7
1.3. L'ouvrabilité du béton frais	11
1.4. La teneur en air des bétons	13
1.5. L'absorption d'eau du béton durci	15
1.6. La résistance à l'écaillage	18
2. LES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX POUR LES BÉTONS DE REVÊTEMENTS ET D'ACCESSOIRES DE CHAUSSÉES	20
2.1. Les granulats	20
2.2. Les ciments	24
2.3. L'eau de gâchage	25
2.4. Les adjuvants	25
2.5. Les colorants (pigments)	27
3. LES CARACTÉRISTIQUES DE SURFACE DES REVÊTEMENTS EN BÉTON	29
3.1. La sécurité des usagers	29
3.2. Le béton silencieux	31
4. LA COMPOSITION DES BÉTONS POUR REVÊTEMENTS ET ACCESSOIRES DE CHAUSSÉES	34
4.1. Courbes granulométriques de référence des bétons routiers	35
4.2. Méthode pratique pour la détermination du dosage des granulats : la méthode des moindres carrés	47
5. QUELQUES APPLICATIONS SPÉCIALES DE BÉTONS ROUTIERS	54
5.1. Les bétons colorés lavés	54
5.2. Les bétons imprimés	58
5.3. Les bétons de réparation de revêtements routiers	59
5.4. Les bétons routiers à base de granulats de béton recyclés	65
5.5. Les bétons secs compactés	70
CONCLUSIONS	74
RÉFÉRENCES NORMATIVES UTILES	75
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	78

VERS UNE COMPOSITION OPTIMALE DES BÉTONS ROUTIERS

AVANT-PROPOS

Composé de gravillons, de sable, de ciment, d'eau et d'adjuvants, le béton frais doit, par la prise et le durcissement du ciment, se transformer en un matériau homogène, résistant et durable. Dans le domaine des revêtements de chaussées en béton de ciment, la grande longévité des routes en béton n'est plus à mettre en évidence. De nombreux anciens revêtements sont toujours en service actuellement et prouvent que, en combinant bonne conception et mise en œuvre et un entretien exécuté en temps opportun, ils peuvent durer plus de 50 ans.

Pour donner ce résultat, les éléments constitutifs du béton doivent présenter par eux-mêmes les qualités voulues : granulats durs, propres et exempts de matières nocives, eau pure, ciment de qualité et de classe adaptée au travail entrepris.

Une autre qualité primordiale à obtenir quand on se trouve en présence de données précises : granulats disponibles, résistance requise, moyens de mise en place et de serrage du béton, est une composition adaptée. La solution découle d'une étude simultanée de la granulométrie du béton, de sa richesse en ciment et de sa quantité d'eau de gâchage. L'étude de la granulométrie des bétons, à laquelle de nombreux chercheurs se sont attachés, recourt à des techniques devenues courantes. Certaines font appel à des courbes granulométriques idéales de référence conduisant à faire le choix de proportions de matières inertes donnant au béton une granulométrie aussi voisine que possible de celle de ces courbes de références.

Il nous paraît intéressant d'éditer ce document à plusieurs titres. A côté d'une présentation synthétique des exigences requises pour les revêtements mais aussi pour les matériaux composant le béton, une large place est consacrée aux courbes granulométriques idéales et à une méthode permettant de déterminer les proportions des matériaux pour s'en approcher.

Cette publication s'adresse aux entrepreneurs, aux responsables des centrales à béton mais aussi aux maîtres d'ouvrages, auteurs de projet préoccupés par la gestion d'une route en béton.

Pour la rédaction de ce guide, un grand nombre d'observations expérimentales sur chantier et en laboratoire ont servi de fil conducteur. Celles-ci sont issues de la précieuse collaboration entre FEBELCEM et le Centre national de Recherches Scientifiques et Techniques pour l'Industrie cimentière.

INTRODUCTION

Les bétons destinés aux applications routières se distinguent des bétons de structure par leur mode de mise en œuvre et par les sollicitations auxquelles ils sont soumis. Les impositions et les principes qui régissent leur composition sont donc différents.

La mise en œuvre des bétons routiers est très particulière : les moyens de serrage sont particulièrement puissants et les rendements de pose doivent être élevés compte tenu des quantités importantes à réaliser. Les machines à coffrages glissants, équipées de nombreuses aiguilles vibrantes, nécessitent un béton homogène et d'ouvrabilité constante, le décoffrage suivant immédiatement le serrage.

A cause de leur grande surface exposée, les routes sont particulièrement soumises aux sollicitations des agents atmosphériques. Pour toutes les applications routières, la protection du béton frais contre l'évaporation de l'eau et le gel est cruciale. De plus, dans le cas des revêtements et des accessoires de chaussée, la résistance du béton durci au gel et aux sels de déverglaçage est primordiale. Ainsi, le béton doit être composé de manière à obtenir un mélange compact présentant un minimum de vide. C'est pourquoi les bétons routiers sont caractérisés par une teneur en sable relativement faible et une teneur en eau limitée au strict minimum nécessaire à l'humidification du mélange.

L'objet du présent document est de rappeler les règles qui gouvernent la composition des bétons routiers. Le respect de ces règles de bonne pratique permettront aux bétons de revêtements et d'accessoires de chaussée de garder leurs caractéristiques naturelles de durabilité.



1. LES CARACTÉRISTIQUES DES BÉTONS POUR REVÊTEMENTS ET ACCESSOIRES DE CHAUSSÉES

1.1. RECOMMANDATIONS EN TERMES DE COMPOSITION ET DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

Le tableau 1 résume les recommandations minimales en matière de composition de béton pour les revêtements routiers tandis que le tableau 2 donne les résistances à la compression minimales requises. Ces recommandations dépendent du type de chaussée et concernent la teneur minimale en ciment, le rapport eau-ciment et la teneur en air du béton. La composition proprement dite – choix des matériaux et proportions – sera abordée aux chapitres 2 et 3.

Une remarque s'impose d'emblée : dans la majorité des cas, la teneur en ciment minimale recommandée est supérieure à celle qui est strictement nécessaire pour obtenir la résistance à la compression imposée. Cette teneur minimale en ciment n'est donc pas seulement destinée à obtenir une certaine résistance mécanique, mais aussi à garantir la durabilité des revêtements sous l'action des agents atmosphériques et des sels de déverglaçage ainsi qu'une très bonne résistance à l'usure et au maintien de celle-ci sous l'influence du trafic.

TABLEAU I - RECOMMANDATIONS CONCERNANT LA COMPOSITION DES BÉTONS DE ROUTE

Type de revêtement et mise en oeuvre	Dimension nominale maximale des granulats D_{max}	Teneur minimale en ciment (kg/m^3)	Facteur E/C	Teneur en air (%-v)
Autoroutes et routes où le trafic lourd est important				
Couche supérieure (revêtement monocouche ou bicouche)	$> 20\text{ mm}$	400	$\leq 0,45$	–
	$6 < D_{max} \leq 20\text{ mm}$	400	$\leq 0,45$	$3 \leq v \leq 6$
	$D_{max} \leq 6\text{ mm}$	425	de 0,40 à 0,45 (0,42)	$5 \leq v \leq 8$
Couche inférieure dans le cas d'un revêtement bicouche	$\geq 20\text{ mm}$	375	de 0,45 à 0,50 (0,48)	$3 \leq v \leq 6$
Routes régionales et communales				
Couche supérieure (revêtement monocouche ou bicouche)	$> 20\text{ mm}$	375	$\leq 0,50$	–
	$6 < D_{max} \leq 20\text{ mm}$	375	$\leq 0,50$	$3 \leq v \leq 6$
	$D_{max} \leq 6\text{ mm}$	400	de 0,45 à 0,50	$5 \leq v \leq 8$
Couche inférieure dans le cas d'un revêtement bicouche	$\geq 20\text{ mm}$	350	$\leq 0,50$	$3 \leq v \leq 6$
Routes rurales, pistes cyclables et espaces piétonniers				
Couche supérieure (revêtement monocouche ou bicouche)	$> 20\text{ mm}$	350	$\leq 0,50$	–
	$6 < D_{max} \leq 20\text{ mm}$	350	$\leq 0,50$	$3 \leq v \leq 6$
	$D_{max} \leq 6\text{ mm}$	375	$\leq 0,50$	$5 \leq v \leq 8$
Couche inférieure dans le cas d'un revêtement bicouche	$\geq 20\text{ mm}$	325	$\leq 0,55$	$3 \leq v \leq 6$

En Belgique, le contrôle de la résistance mécanique du béton de route s'effectue par des essais de résistance à la compression sur carottes (hauteur de 10 cm, surface de compression de 100 cm²) prélevées dans le revêtement routier, à minimum 90 jours d'âge. Ceci permet de contrôler non seulement la composition du béton mais également sa mise en œuvre (compactage, cure). En réalisant les essais à 90 jours d'âge ou plus, l'influence de la température extérieure sur le développement de la résistance mécanique du béton est minimalisée, et est donc considérée comme neutralisée.

Néanmoins, dans le cas des revêtements mis en œuvre en bicouche frais sur frais à l'aide de deux compositions de béton différentes, conformément aux recommandations du tableau 1, il n'est pas possible de prélever dans le revêtement routier une carotte d'épaisseur suffisante. En effet, dans ce cas, la couche supérieure a généralement une épaisseur de 5 à 8 cm maximum. Ainsi, la résistance à la compression est vérifiée sur cubes de contrôle de 15 cm de côté et à 28 jours d'âge. La fabrication et la conservation

des cubes sont réalisées selon les directives de la norme NBN EN 12390-2 tandis que la résistance à la compression est contrôlée selon la norme NBN EN 12390-3.

Les recommandations relatives aux accessoires de chaussée et aux barrières de sécurité coulées en place sont données au tableau 3. La distinction est ici faite entre un béton conforme à la norme NBN EN 206-1 et à son document d'application national NBN B 15-001 et tout autre béton prêt à l'emploi.

TABLEAU 2 - RÉSISTANCES À LA COMPRESSION MINIMALES RECOMMANDÉES DES BÉTONS PAR TYPE DE CHAUSSÉE

Type de voirie	Autoroutes et routes où le trafic lourd est important	Routes régionales et communales	Routes rurales, pistes cyclables et espaces piétonniers
----------------	---	---------------------------------	---

**Revêtements monocouches ou couche inférieure des revêtements bicouches
Essais sur carottes (h = 10 cm, S = 100 cm²) à minimum 90 jours**

Résistance à la compression moyenne minimum (N/mm ²)	70 60*	60 50*	55 45*
Résistance à la compression individuelle minimum (N/mm ²)	60 50*	50 40*	45 35*

* En cas d'incorporation d'un entraîneur d'air

**Couche supérieure des revêtements bicouches
Essais sur cubes (15 cm de côté) à 28 jours**

Résistance à la compression moyenne minimum (N/mm ²)	50	40	35
Résistance à la compression individuelle minimum (N/mm ²)	40	30	25

TABLEAU 3 - RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES ACCESSOIRES DE CHAUSSEE ET BARRIERES DE SECURITE COULES EN PLACE

Béton conforme aux normes NBN EN 206-1: 2001 et NBN B 15-001: 2004	Tout autre béton
<ul style="list-style-type: none"> - Classe de résistance C30/37 - Béton non armé (BNA) ou armé (BA) - Classe d'environnement EE4 soit: - E/C ≤ 0,50 si BNA - E/C ≤ 0,45 si BA - Classe de consistance S1 - D_{max} ≤ 31,5 mm - Teneur en ciment ≥ 375 kg/m³ - Teneur en air comprise entre 3 et 6 %-v 	<ul style="list-style-type: none"> - D_{max} ≤ 31,5 mm - Teneur en ciment ≥ 375 kg/m³ - Rapport E/C ≤ 0,50 - Teneur en air comprise entre 3 et 6 %-v - Résistance à la compression moyenne et individuelle respectivement ≥ 50 et ≥ 40 N/mm² (Essais sur carottes (h = 10 cm, S = 100 cm²) à minimum 90 jours)

1.2. LA TENEUR EN EAU DES BÉTONS

L'eau est un facteur très important pour la qualité et les caractéristiques du béton. Il est donc nécessaire de déterminer sa quantité de manière optimale et de la jauger avec précision. Comme nous venons de le voir aux tableaux 1 et 3, sa quantité est limitée par le rapport E/C du béton.

Pour le calcul du rapport E/C, seule l'eau efficace (E_{eff}) doit être prise en compte. En d'autres termes, l'eau absorbée par les granulats ne doit pas être prise en compte pour le calcul du facteur E/C car elle n'influence pas la qualité de la matrice de ciment. En effet, l'eau efficace a été définie comme l'eau susceptible de rencontrer un grain de ciment pour participer à son hydratation. L'eau confinée au fond des granulats n'a évidemment aucune chance de rencontrer le moindre grain de ciment. Pour la simplicité, il est admis que pour les granulats utilisés couramment en Belgique, environ 10 litres d'eau par m³ de béton sont absorbés et donc:

$$E_{eff} = E_{totale} - 10$$

Dans cette relation, E_{totale} représente la teneur en eau totale dans le béton. Celle-ci est calculée par la relation suivante :

$$E_{totale} = E_{granulats} + E_{ajoutée} + E_{adjuvants}$$

Avec :

- $E_{granulats}$: l'eau apportée par tous les granulats (eau absorbée et en surface des granulats);
- $E_{ajoutée}$: l'eau de gâchage ajoutée au mélange;
- $E_{adjuvants}$: l'eau contenue dans les adjuvants éventuels.

Pour certains granulats, la porosité est telle que l'absorption d'eau totale peut être bien supérieure à 10 litres d'eau par m³ de béton; il peut donc être utile de connaître cette valeur d'absorption d'eau pour pouvoir calculer le rapport E/C du béton avec plus d'exactitude. L'absorption de l'eau par les granulats est déterminée par la procédure reprise dans la norme NBN EN 1097-6. Celle-ci peut être définie comme étant l'humidité contenue dans les granulats saturés et superficiellement secs en pourcentage de la masse sèche. L'eau de surface des granulats s'additionne, en effet, à l'eau du mélange et occupe un volume excédant celui des grains. L'état de base des granulats est ainsi saturé et superficiellement sec. Quelques valeurs typiques d'absorption d'eau de granulats sont données au tableau 4 ci-après.

Figure 1 - Représentation schématique des différents états d'humidité des granulats

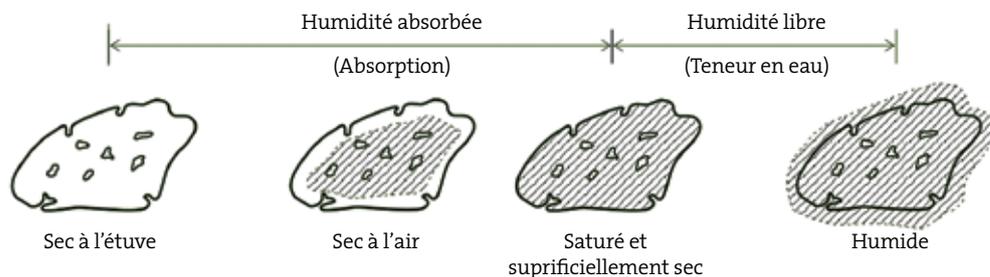


TABLEAU 4 - VALEURS MOYENNES D'ABSORPTION D'EAU ET DE MASSE VOLUMIQUE RÉELLE GÉNÉRALEMENT RENCONTRÉES POUR DES GRANULATS BELGES

Type de granulat	Absorption d'eau (%)	Masse volumique réelle (kg/m ³)
Porphyre	0,3 à 0,8	2650 à 2730
Grès	0,8 à 3,0	2460 à 2690
Calcaire	0,5 à 1,0	2660 à 2800
Graviers siliceux de Meuse	0,9 à 1,5	2630 à 2650
Graviers siliceux de mer	1,9 à 4,5	2430 à 2530
Sable siliceux	0,3 à 0,6	2630 à 2650



Figure 2 - Essais sur béton frais (à l'arrière plan, détermination de la teneur en eau par brûlage)

Expérimentalement, la teneur en eau totale du béton fraîchement gâché peut être déterminée par brûlage d'un échantillon de béton sur un réchaud au gaz par exemple. Lors de cet essai, la température du matériau atteint 350 °C et la totalité de l'eau est évaporée avant que celle-ci ne soit liée au ciment par les réactions d'hydratation.

Une partie seulement de l'eau efficace se combinera avec le ciment. En effet, la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation d'un ciment est d'environ 20 à 25 % de la masse de ciment. Pour l'ouvrabilité du béton, une quantité d'eau supérieure à 25 % est nécessaire. En fait, pour fabriquer un béton homogène et ouvrable, il faut recouvrir la surface des granulats et du ciment d'un film d'eau d'épaisseur appropriée aux caractéristiques recherchées pour le béton frais. Cette eau forme un film autour de tous les grains de ciment, de sable et de gravillons et diminue la résistance à la friction entre ces grains. La quantité d'eau nécessaire est donc liée à la somme des surfaces de tous les grains à mouiller. Le tableau 5 donne les quantités d'eau nécessaire pour l'humidification de tous les grains. Celles-ci résultent de nombreuses déterminations expérimentales. Elles sont données, non pas en fonction des masses, mais en fonction des volumes absolus des diverses fractions granulométriques des matériaux entrant dans la composition du béton.

Ces quantités d'eau conviennent pour réaliser une consistance « terre humide », c'est-à-dire des bétons pouvant être mis en œuvre à la machine à coffrages glissants et elles concernent les matériaux couramment employés dans le pays. Si une ouvrabilité du béton plus élevée est nécessaire, un plastifiant, voire un superplastifiant doit être ajouté.

Le fait de devoir se rapporter aux volumes absolus n'est pas une complication. Pour l'obtenir, il suffit de diviser chaque masse de matériau, classé par fraction granulométrique, par la masse volumique réelle de ce matériau.

La quantité totale d'eau pour gâcher le mélange à la consistance « terre humide » est obtenue en additionnant les quantités partielles nécessaires pour mouiller tous les grains des différentes fractions granulométriques au prorata du pourcentage en volume absolu suivant lequel elles entrent dans la constitution du mélange. A noter que cette quantité d'eau convient pour des matériaux secs.

Les tableaux 6, 7 et 8 donnent des exemples de calculs des quantités d'eau de trois compositions de bétons routiers. Dans ces exemples, les sables 0/4 et 0/2 ont respectivement un module de finesse de 3,0 et 1,5.

Ces exemples permettent de constater que la teneur en eau des bétons est de l'ordre de 170-180 l/m³. Cette teneur en eau est nécessaire pour obtenir un béton homogène et pouvant être mis en œuvre correctement. En considérant les teneurs en ciment recommandées au tableau 1, une teneur en eau de l'ordre de 180 l/m³ permet généralement de respecter les E/C prescrits. Dans le cas contraire, la teneur en ciment doit être augmentée et/ou la granulométrie du squelette inerte du béton adaptée. En effet, plus la quantité de grains fins est élevée (quantité et finesse du sable), plus la demande en eau est élevée.

TABLEAU 5 - DEMANDE EN EAU, E %, EN POUR-CENT DU VOLUME ABSOLU DES CONSTITUANTS DU BÉTON

Gravillons

Calibre (mm)	Demande en eau e (%)	
	Gravillons roulés	Gravillons concassés
20/32	3,20	3,50
14/20	3,70	4,10
10/20	4,00	4,40
6/14	5,00	5,50
6/10	6,00	6,60
4/6	7,00	8,00
2/4	8,50	10,00

Sables

Sables roulés		Sables de concassage	
Module de finesse *	Demande en eau e (%)	<p>Sable de concassage lavé : 30,0 à 33,0 %</p> <p>Sable de concassage non lavé (suivant teneur en fines) : 33,0 à 40,0 %</p>	
3,00	20,0		
2,50	22,0		
2,25	23,0		
2,00	24,5		
1,75	26,5		
1,50	30,0		
1,25	35,0		
1,00	40,5		
0,75	47,0		

Demande en eau d'un sable roulé en fonction de son module de finesse

Module de finesse du sable	Demande en eau en % du volume
0,75	47,0
1,00	40,5
1,25	35,0
1,50	30,0
1,75	26,5
2,00	24,5
2,25	23,0
2,50	22,0
3,00	20,0

* Le module de finesse est calculé en prenant la somme des refus cumulés exprimés en % sur les tamis de 4 - 2 - 1 - 0,5 - 0,250 et 0,125 mm

Ciment

(masse volumique absolue : 2,9 à 3,1 kg/dm³)

Demande en eau e = 70 %

TABLEAU 6 - EXEMPLE 1 : COMPOSITION D'UN BÉTON SILENCIEUX 0/20

Matériau	Quantité de chaque matériau en masse	Calcul des quantités en volume	Calcul des besoins en eau
Porphyre 14/20	310 kg/m ³	: 2,72 = 114 l/m ³	x 0,041 = 4,7 l/m ³
Porphyre 6/14	520 kg/m ³	: 2,72 = 191 l/m ³	x 0,055 = 10,5 l/m ³
Porphyre 4/6	370 kg/m ³	: 2,72 = 136 l/m ³	x 0,080 = 10,9 l/m ³
Sable de rivière 0/4	445 kg/m ³	: 2,65 = 168 l/m ³	x 0,200 = 33,6 l/m ³
Sable de rivière 0/2	150 kg/m ³	: 2,65 = 57 l/m ³	x 0,300 = 17,1 l/m ³
CEM III/A 42,5 N LA	400 kg/m ³	: 2,95 = 136 l/m ³	x 0,700 = 95,2 l/m ³
Total			172,0 l d'eau /m³

TABLEAU 7 - EXEMPLE 2 : COMPOSITION D'UN BÉTON SILENCIEUX 0/14

Matériau	Quantité de chaque matériau en masse	Calcul des quantités en volume	Calcul des besoins en eau
Porphyre 6/14	770 kg/m ³	: 2,72 = 283 l/m ³	x 0,055 = 15,6 l/m ³
Porphyre 4/6	300 kg/m ³	: 2,72 = 110 l/m ³	x 0,080 = 8,8 l/m ³
Sable de rivière 0/4	450 kg/m ³	: 2,65 = 170 l/m ³	x 0,200 = 34,0 l/m ³
Sable de mer 0/2	250 kg/m ³	: 2,65 = 94 l/m ³	x 0,300 = 28,2 l/m ³
CEM III/A 42,5 N LA	400 kg/m ³	: 2,95 = 136 l/m ³	x 0,700 = 95,2 l/m ³
Total			181,8 l d'eau /m³

TABLEAU 8 - EXEMPLE 3 : COMPOSITION D'UN BÉTON SILENCIEUX 0/6

Matériau	Quantité de chaque matériau en masse	Calcul des quantités en volume	Calcul des besoins en eau
Porphyre 4/6	995 kg/m ³	: 2,72 = 366 l/m ³	x 0,080 = 29,3 l/m ³
Sable de rivière 0/4	700 kg/m ³	: 2,65 = 264 l/m ³	x 0,200 = 52,8 l/m ³
CEM III/A 42,5 N LA	425 kg/m ³	: 2,95 = 144 l/m ³	x 0,700 = 100,8 l/m ³
Total			182,9 l d'eau /m³

1.3. L'OUVRABILITÉ DU BÉTON FRAIS

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à être mis en œuvre correctement. De nombreux facteurs influencent l'ouvrabilité : type et dosage en ciment, granulométrie du béton, forme des gravillons, qualité du sable, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau.

La teneur en eau du béton frais est la caractéristique la plus aisée à adapter pour modifier l'ouvrabilité. Cependant, il est bien connu que l'augmentation de la teneur en eau comporte des risques importants pour la qualité du béton, comme par exemple :

- la diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances mécaniques ;
- une porosité accrue et donc une plus grande sensibilité aux sels de déverglaçage ;
- un retrait augmenté.

L'ouvrabilité du béton frais peut être évaluée grâce à des essais normalisés ; dans la gamme des consistances des bétons routiers, les essais les plus appropriés sont l'affaissement au cône d'Abrams (« Slump », NBN EN 12350-2, fig. 3) et l'essai Vébé (NBN EN 12350-3, fig. 4). Le premier consiste en la mesure, en millimètres, du tassement d'un tronc de cône de béton frais lors de son démoulage et le deuxième, en la mesure, en secondes, du temps nécessaire au tassement total d'un même tronc de cône au fond d'un moule cylindrique placé sur une table vibrante normalisée. L'augmentation de l'affaissement au cône comme la diminution du temps Vébé indiquent un accroissement de la fluidité du béton.

Afin de garantir une mise en place idéale, l'ouvrabilité doit être adaptée aux moyens de mise en œuvre (manuelle, poutre vibrante, machine à coffrages glissants) et au type d'ouvrage (revêtement routier, bande de contre-butage, barrière de sécurité,...).

A titre indicatif, pour un revêtement routier mis en place à l'aide d'une machine à coffrages glissants, le béton doit avoir un affaissement (slump) de 20 à 60 mm (classe d'affaissement S1 jusqu'à la limite inférieure de S2) ou un temps Vébé d'environ 5 à 7 secondes, ce qui correspond à la classe Vébé V4 à V3.

Pour une mise en place manuelle entre des coffrages fixes et à l'aide d'une poutre vibrante légère et d'aiguilles vibrantes, un affaissement de 80 à 100 mm est conseillé (classe S2 – S3). A noter que les anciennes poutres vibrantes étaient très puissantes et demandaient un affaissement du béton très faible (de 0 à 20 mm).

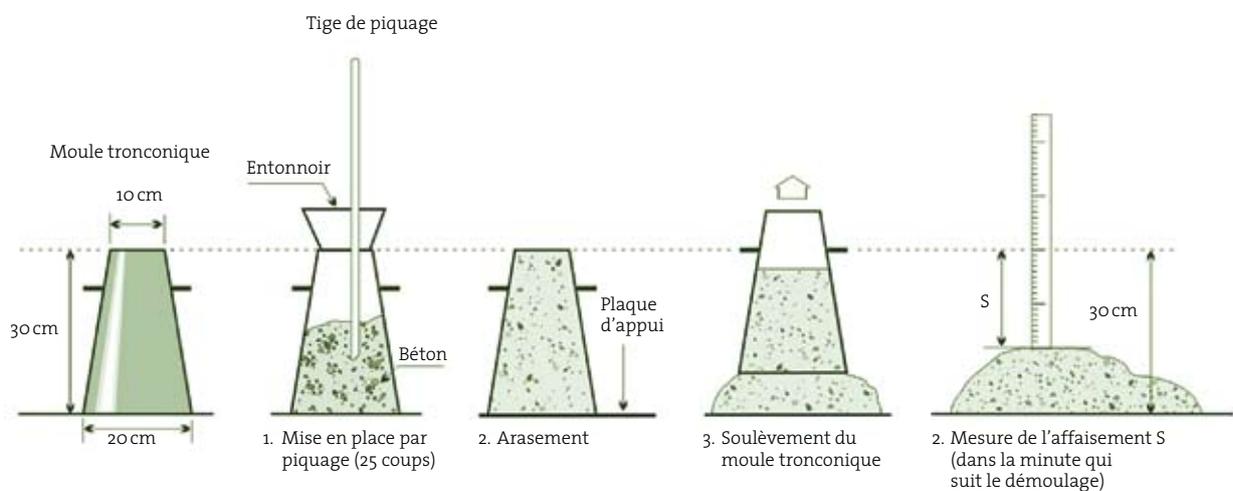


Figure 3 - Essai d'affaissement au cône d'Abrams (slump)

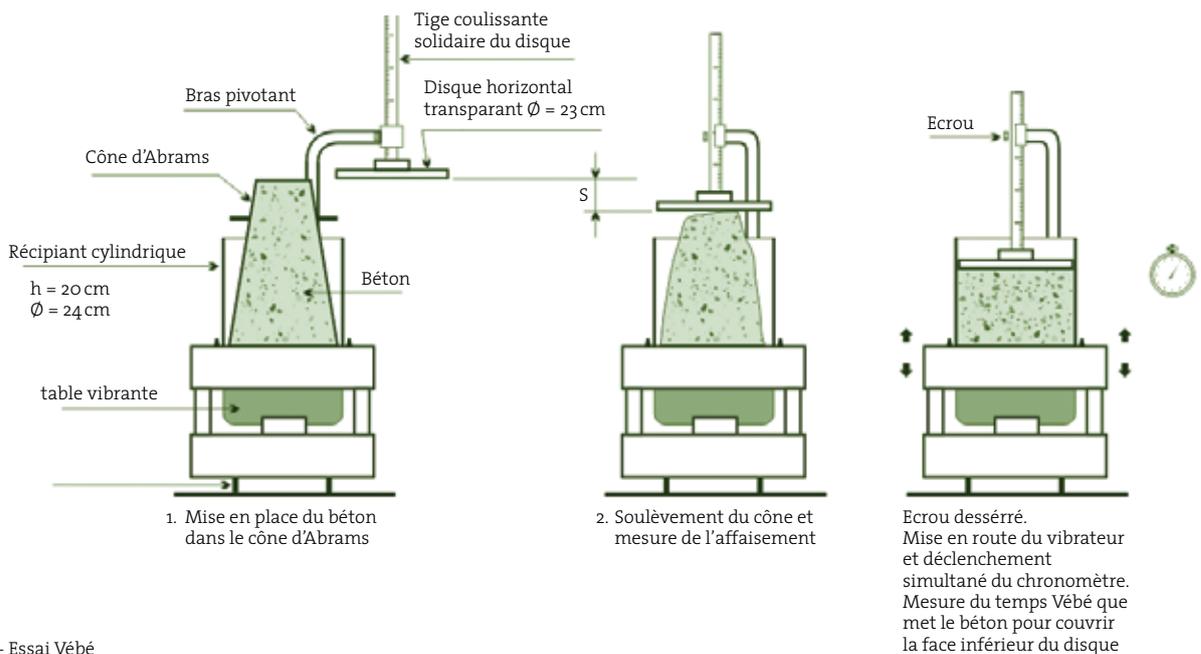


Figure 4 - Essai Vébé

Figure 5 - Mise en place d'un revêtement en béton à l'aide d'aiguilles et d'une poutre vibrantes. A noter que ce mode de mise en œuvre du béton demande beaucoup de main d'œuvre. Bien que de classe S2, le béton reste consistant !



1.4. LA TENEUR EN AIR DES BÉTONS

L'objectif recherché lors de l'utilisation d'un entraîneur d'air est de conférer au béton une bonne résistance à l'écaillage due au gel en présence de sels de déverglaçage.

Les entraîneurs d'air sont des adjuvants qui entraînent et stabilisent un nombre élevé de microbulles d'air, réparties uniformément dans la masse du béton et qui subsistent après durcissement du béton.

Contrairement aux bulles d'air occluses, les bulles d'air entraînées intentionnellement sont extrêmement petites (de 10 à 500 μm). Ces bulles ne sont pas intimement liées et sont uniformément réparties dans la pâte (ciment + eau + air).

Les exigences en matière de teneur en air des bétons routiers sont données au tableau 1 pour les revêtements et au tableau 3 pour les éléments linéaires. Il est à remarquer que lorsque le calibre maximum du granulat du béton diminue, la teneur en air entraîné doit être augmentée. En effet, un béton est d'autant plus sensible à l'écaillage que la proportion de mortier est élevée. Celle-ci augmente lorsque le calibre des granulats diminue.

Le contrôle de la teneur en air sur béton est réalisé à l'aide d'un aéromètre (air-meter – figure 6) conforme à la norme NBN EN 12350-7 (méthode à pression variable). Sur béton durci, les caractéristiques des vides d'air peuvent être contrôlées par comptage au microscope stéréoscopique (norme NBN EN 480-11).

A côté de l'amélioration de la résistance des bétons à l'écaillage, l'air entraîné a encore d'autres influences sur les caractéristiques du béton frais et du béton durci. Bien réparties, les microbulles font office de roulements entre les grains de sable accroissant ainsi l'ouvrabilité du béton. Les résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation de la teneur en air. Il a été démontré que la résistance à la compression peut chuter de plus de 5 N/mm^2 par pour-cent d'air entraîné (figure 7).



Figure 6 - Contrôle de la teneur en air d'un béton routier à l'aide d'un air-meter (méthode à pression variable selon NBN EN 12350-7)



Figure 7 - Résistance à la compression en fonction de la teneur en air du béton (Bétons à base de 375 kg/m³ de ciment – E/C = 0,45)

1.5. L'ABSORPTION D'EAU DU BÉTON DURCI

Le béton est un matériau poreux. En d'autres termes, il comporte des pores ou vides. Ces pores, qui sont également déterminants pour la résistance et la durabilité du béton, sont provoqués par la présence d'eau durant l'hydratation. La quantité d'eau pouvant être liée chimiquement par un ciment Portland est d'environ 25 % de la masse de ciment. En outre, une quantité d'eau, égale à environ 15 % de la masse de ciment, est liée en tant qu'eau de gel. Cette eau de gel est constituée d'eau qui a été adsorbée physiquement à la surface des produits d'hydratation et d'un film d'eau mono-moléculaire qui est lié entre les produits de cristallisation. L'eau de gel s'évapore complètement dans une étuve à 105 °C, mais malgré cette liaison libre, elle est incapable de réagir avec le ciment non encore lié.

Les produits d'hydratation fixés occupent un volume absolu inférieur à la somme des volumes absolus de l'eau et du ciment qui ont déjà réagi. De l'espace s'est donc libéré : ce sont les alvéoles capillaires. Ces alvéoles peuvent être vides ou remplies d'eau. Comme déjà signalé au paragraphe 1.2., pour une bonne ouvrabilité du béton, la quantité d'eau utilisée pour la fabrication d'un béton conduit à un rapport E/C généralement supérieur à 0,40. Une partie de l'eau n'est donc pas liée chimiquement ni physiquement et s'installe dans les alvéoles capillaires (eau interstitielle), d'où elle peut éventuellement s'évaporer ultérieurement. Cette formation d'alvéoles capillaires entraîne un affaiblissement mécanique du béton. Etant donné que des substances agressives peuvent s'infiltrer aisément dans le béton via ce réseau d'interstices, la durabilité est également influencée négativement.

Le volume des vides nocifs s'évalue, en pratique, par l'essai d'absorption d'eau par immersion du béton durci (norme NBN B 15-215). Plus le volume de ces vides est important, plus le risque de dégâts dus au gel et aux sels de déverglaçage est important.

La surface du béton de route soumis aux influences atmosphériques est particulièrement importante ; c'est pour cette raison que les cahiers des charges prescrivent un pourcentage maximal d'eau absorbée mesuré dans les 40 à 50 mm supérieurs du revêtement. Les essais sont donc réalisés sur les tranches supérieures des carottes (section de 100 cm²) prélevées par forage dans le revêtement routier. Les valeurs maximales d'absorption d'eau par immersion à prendre en compte sont données au tableau 9.

Les facteurs qui ont une influence sur la teneur en eau en ont aussi sur l'absorption d'eau ; c'est ainsi que l'emploi de sables fins ou tout ajout d'eau augmente l'absorption d'eau (figure 8). Elle est aussi directement dépendante de la qualité de la protection du béton frais contre l'évaporation. Cette protection doit être appliquée le plus rapidement possible (en fait, sur une surface de béton mate) derrière la machine de mise en œuvre du béton. Il a également été constaté que pour toute augmentation de 1 % de la teneur en air du béton (à E/C constant), l'absorption d'eau par immersion augmente de plus de 0,2 %-m (figure 10). D'un côté, la présence des bulles d'air coupant les pores capillaire réduit la quantité d'eau absorbée ; d'un autre côté, un béton à air entraîné présente une masse plus faible qu'un béton sans air entraîné. Ce second phénomène est prépondérant de sorte que l'absorption d'eau exprimée en % par rapport à la masse sèche du béton est généralement plus élevée.

TABLEAU 9 - EXIGENCES CONCERNANT L'ABSORPTION D'EAU ET LA RÉSISTANCE AU GEL EN PRÉSENCE DE SELS DE DÉVERGLAÇAGE DES BÉTONS DE ROUTE

Type de revêtement et mise en oeuvre	Dimension nominale maximale des granulats D_{max}	Teneur minimale en ciment (kg/m^3)	Absorption d'eau (%)	Pertes au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage (g/dm^2)
--------------------------------------	---	--	----------------------	--

Autoroutes et routes où le trafic lourd est important

Couche supérieure (revêtement monocouche ou bicouche)	> 20 mm	400	$Abs_i \leq 6,5$ $Abs_m \leq 6,0$	≤ 5
	$6 < D_{max} \leq 20$ mm	400	$Abs_i \leq 6,8$ $Abs_m \leq 6,3$	≤ 5
	$D_{max} \leq 6$ mm	425	$Abs_i \leq 7,0$ $Abs_m \leq 6,5$	≤ 5
Couche inférieure dans le cas d'un revêtement bicouche	≥ 20 mm	375	-	-

Routes régionales et communales

Couche supérieure (revêtement monocouche ou bicouche)	> 20 mm	375	$Abs_i \leq 6,5$ $Abs_m \leq 6,0$	≤ 10
	$6 < D_{max} \leq 20$ mm	375	$Abs_i \leq 6,8$ $Abs_m \leq 6,3$	≤ 10
	$D_{max} \leq 6$ mm	400	$Abs_i \leq 7,0$ $Abs_m \leq 6,5$	≤ 10
Couche inférieure dans le cas d'un revêtement bicouche	≥ 20 mm	350	-	-

Routes rurales, pistes cyclables et espaces piétonniers

Couche supérieure (revêtement monocouche ou bicouche)	> 20 mm	350	$Abs_i \leq 6,8$ $Abs_m \leq 6,3$	≤ 20
	$6 < D_{max} \leq 20$ mm	350	$Abs_i \leq 7,0$ $Abs_m \leq 6,5$	≤ 20
	$D_{max} \leq 6$ mm	375	$Abs_i \leq 7,0$ $Abs_m \leq 6,5$	≤ 20
Couche inférieure dans le cas d'un revêtement bicouche	≥ 20 mm	325	-	-

Abs_i = absorption d'eau individuelle
 Abs_m = absorption d'eau moyenne

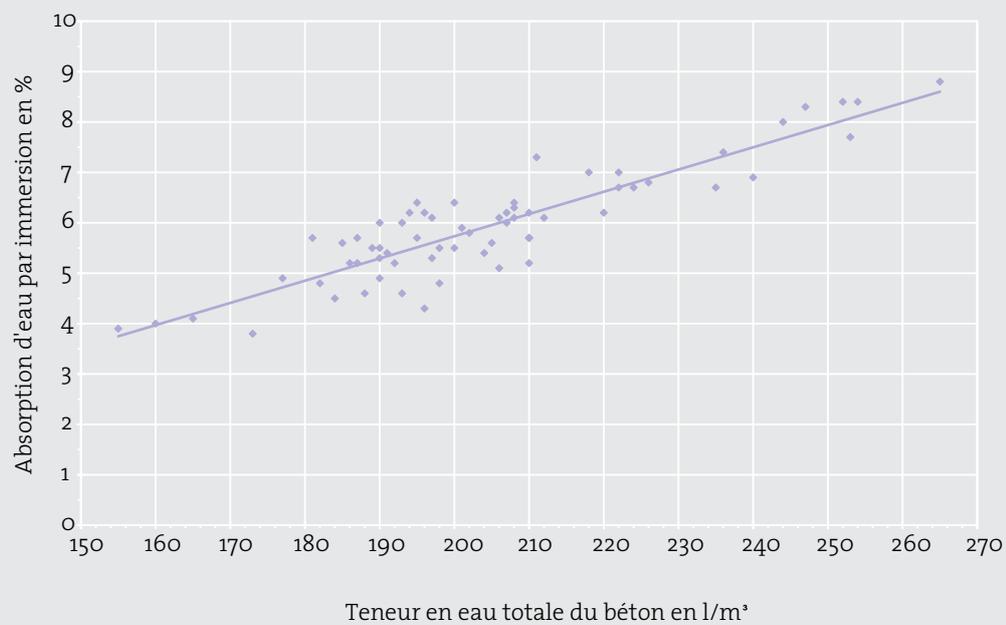
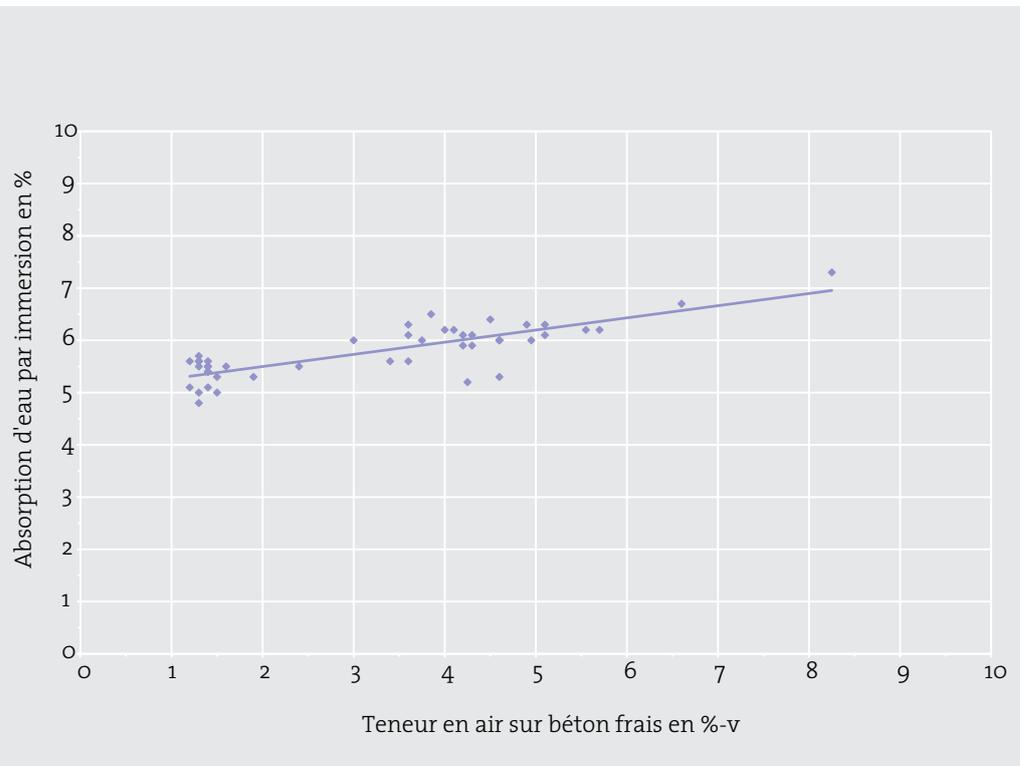


Figure 8 - Absorption d'eau par immersion en fonction de la teneur en eau du béton frais

Figure 9 - La protection contre la dessiccation du béton fraîchement mis en œuvre est une étape primordiale pour sa qualité et donc pour la durabilité du revêtement. Généralement, cette protection se réalise par la pose d'une membrane étanche (à gauche) ou par la pulvérisation d'un produit de cure (à droite)



Figure 10 - Absorption d'eau par immersion en fonction de la teneur en air (Bétons à base de 375 kg/m³ de ciment - E/C = 0,45)



1.6. LA RÉSISTANCE À L'ÉCAILLAGE

Le gel combiné à l'action des sels de déverglaçage constitue une sollicitation importante à la surface des bétons. L'action aggravante des sels de déverglaçage est due aux facteurs suivants :

- la fonte de la glace par les sels est une réaction endothermique. La chaleur nécessaire est puisée dans le matériau au contact du sel, c'est-à-dire dans la couche superficielle du béton qui se refroidit donc brusquement. Il apparaît alors un gradient thermique qui entraîne l'apparition de contraintes internes susceptibles de créer une fissuration du béton ;
- la fonte de la glace maintient un degré de saturation élevé en surface du béton ;
- après une période de dégel, on obtient une eau à forte concentration en chlorures. Ceux-ci sont alors entraînés par absorption capillaire et diffusion. La présence de sel abaisse le point de congélation et cela d'autant plus que la concentration augmente. Des mesures sur des ouvrages régulièrement salés montrent que les chlorures présentent généralement des profils de concentration en fonction de l'épaisseur tel que présentés en figure 11. La combinaison point de congélation/ température du béton peut être telle que deux couches gelées soient séparées par une couche intermédiaire non gelée. Si, suite à un abaissement supplémentaire de la température, l'eau de cette couche vient à geler, elle ne trouve pas d'espace d'expansion et repousse de ce fait la couche supérieure. Cet effet s'appelle «écaillage» ;
- du fait que la concentration en sel varie fortement, naissent des pressions osmotiques qui cumulent également leurs effets.

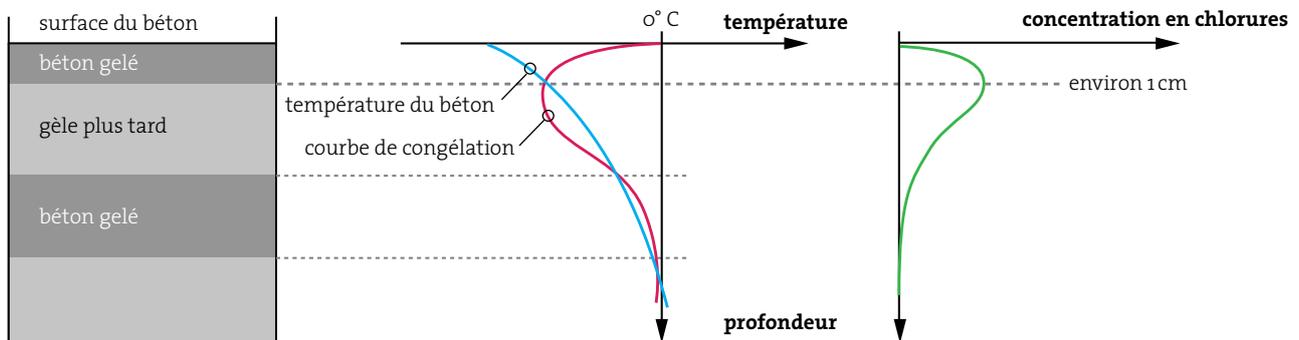


Figure 11 - L'eau gelant par couches dans un béton soumis à l'action des sels de déverglaçage peut provoquer des éclatements

Les recommandations en matière de résistance au gel en présence de sels de déverglaçage sont données au tableau 9. Le contrôle est réalisé sur carottes prélevées dans le revêtement conformément au projet de norme ISO-DIS 4846-2. Celui-ci prévoit des cycles successifs de gel-dégel (entre -18°C et $+20^{\circ}\text{C}$) sur éprouvettes dont la surface est recouverte d'une solution de produit dégivrant (en général, du CaCl_2). Tous les 5 cycles, la perte de masse de l'éprouvette est mesurée. L'expérience montre que la résistance à l'écaillage in situ du béton est bonne pour des pertes cumulées de matière inférieures à 10 g/dm^2 après 30 cycles de gel-dégel.

Signalons qu'une spécification technique européenne a été publiée en 2006. Celle-ci propose 3 méthodes d'essais pour mesurer la résistance aux sels de déverglaçage d'un béton. La méthode d'essais de référence est le *Slab test*. Cette méthode prévoit la succession de 56 cycles de gel-dégel entre -20°C et $+20^{\circ}\text{C}$. La surface des éprouvettes est recouverte d'une solution de NaCl et les pertes de masse sont récupérées tous les 7 cycles. Des premiers essais d'orientation ont montré que cette méthode est plus sévère que la méthode ISO-DIS 4846-2. Ainsi, les critères d'acceptation des bétons doivent être adaptés et ne sont pas connus à ce jour.

Figure 12 – Revêtement routier présentant un écaillage dû à l'action du gel en présence de sels de déverglaçage



2. LES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX POUR LES BÉTONS DE REVÊTEMENTS ET D'ACCESSOIRES DE CHAUSSÉES

2.1. LES GRANULATS

Les granulats sont constitués d'un ensemble de grains minéraux qui selon leurs dimensions (comprises entre 0 et 125 mm) se situent dans la famille des fillers, des sables, des graves ou des gravillons. Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (sédimentaires ou magmatiques) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction de leur nature et des techniques de production.

La nature minérale d'un granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou élaborés à partir de roches massives (granulats concassés).

Les granulats sont classés en fonction de leur granulométrie (distribution dimensionnelle des grains). Ils sont désignés par le couple d/D avec d , la dimension inférieure du granulats et D , sa dimension supérieure.

Les granulats utilisés pour la confection des bétons routiers sont les sables, les gravillons et les graves. Néanmoins, ces dernières peuvent présenter des variations importantes dans leur composition granulométrique et notamment dans la teneur en sable. Elles ne sont donc pas à conseiller.

Les granulats sont considérés comme courants lorsque leur masse volumique est supérieure à 2000 kg/m^3 et légers si elle est inférieure à 2000 kg/m^3 . Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent de leur origine et de leur procédé d'élaboration.

TABLEAU 10 - CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DE GRANULARITÉ DES GRANULATS SELON NBN EN 12620

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	$0/D$	$D < 2 \text{ mm}$ avec au moins 85 % de passant à $0,125 \text{ mm}$ et 70 % de passant à $0,063 \text{ mm}$
Sables	$0/D$	$d = 0$ et $D \leq 4 \text{ mm}$
Graves	$0/D$	$d = 0$ et $D \geq 6,3 \text{ mm}$ et $\leq 45 \text{ mm}$
Gravillons	d/D	$d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \geq 4 \text{ mm}$

2.1.1. EXIGENCES CONCERNANT LES GRAVILLONS

En Belgique, la pierre naturelle concassée ainsi que le gravier concassé sont autorisés comme gravillons pour la fabrication de bétons routiers. L'emploi des gravillons roulés est à éviter pour les revêtements soumis à un trafic automobile. En effet, les matériaux de rivière ou de mer sont à surface lisse ou légèrement rugueuse ce qui est défavorable à l'obtention d'une bonne rugosité de la surface de la route. De plus, la rugosité de la pierre concassée est favorable à la bonne adhérence au mortier. Cet avantage se traduit par une meilleure résistance en traction du béton et par un meilleur accrochage des gravillons en surface des bétons soumis à usure par frottement.

La dimension maximale admise des grains est de 31,5 mm. Pour les revêtements en béton silencieux, elle est toutefois limitée à 20, voire 14 mm et à 10 ou 6,3 pour la couche supérieure d'un revêtement mis en œuvre en bicouche.

Afin d'éviter la ségrégation, il est impératif d'approvisionner les gravillons en fractions granulaires restreintes, par exemple 2/6,3, 6,3/14 et 14/20.

Les gravillons pour revêtement en béton sont soumis à des critères de qualité beaucoup plus exigeants que ceux pour les bétons de structure classique. Ces critères sont donnés sous forme de catégories dans la norme NBN EN 12620 et les prescriptions d'application pour les bétons routiers sont précisées dans les cahiers des charges. Le tableau 11 donne les principales impositions relatives aux gravillons destinés aux bétons routiers.

Il est à remarquer que les gravillons doivent être issus de roches dures et résistantes à l'usure. Des prescriptions sont, en effet, données en termes de résistance à la fragmentation (Coefficient Los Angeles LA) et à l'attrition ou à l'usure (Coefficient Micro-Deval MDE) ainsi qu'en termes de résistance au polissage (Polished Stone Value PSV). Le coefficient Los Angeles est

mesuré en soumettant le matériau aux chocs de boulets dans un tambour en rotation tandis que le coefficient Micro-Deval consiste à mesurer l'effet de l'attrition sur des gravillons placés dans un cylindre horizontal en présence d'eau. On parle ainsi de Micro-Deval en présence d'eau (MDE). Les résistances sont d'autant meilleures que les valeurs de LA et MDE sont faibles. Étant donné que les bétons routiers doivent offrir une grande résistance à l'usure, c'est évidemment aux granulats les plus durs qu'il faut recourir et, parmi ceux-ci aux gravillons anguleux et rugueux qui ont le meilleur coefficient d'accrochage au mortier. Soulignons toutefois qu'au point de vue résistance à la compression et à la traction du béton, les granulats de résistance moyenne sont amplement suffisants. Ainsi, pour les revêtements faiblement circulés (voiries agricoles, pistes cyclables, ...) ou pour les couches inférieures des bétons bicouches, les exigences sont moins sévères. La caractéristique de coefficient de polissage accéléré des gravillons permet quant à elle de quantifier l'aptitude des gravillons à résister au polissage. La perte de rugosité d'un granulat après qu'il a été mis en contact dynamique avec des matériaux abrasifs est mesurée. Il s'agit d'une caractéristique très importante car le passage rapide et répété des véhicules sur les gravillons de surface peut provoquer leur polissage ce qui accroît les risques de dérapage et les distances de freinage. Un coefficient élevé est donc requis. Quelques valeurs typiques des coefficients Los Angeles, Micro-Deval en présence d'eau et de polissage accéléré sont données au tableau 12.

Une attention toute particulière doit également être apportée au caractère non gélif des granulats. En effet, des granulats gélifs peuvent se gorger d'eau puis gonfler lors du gel et provoquer des éclatements lorsqu'ils sont proches de la surface. Il faut être particulièrement attentif à ce risque lors de l'emploi de grès dont les bancs sont parfois traversés par des veines de schiste, ou de certains graviers de terrasses et contenant des pierres friables.

TABLEAU 11 – PRINCIPALES IMPOSITIONS RELATIVES AUX GRAVILLONS DESTINÉS AUX BÉTONS ROUTIERS

Caractéristique	Prescription	Catégorie selon NBN EN 12620	Remarque
Teneur en fines (% en masse)	≤ 1,5 ≤ 4	$f_{1,5}$ f_4	D > 8 mm D ≤ 8 mm
Résistance à la fragmentation (Coefficient Los Angeles)	≤ 25 ≤ 30	LA ₂₅ LA ₃₀	Couches de roulement Couches inférieures ; éléments linéaires et si le cahier des charges l'autorise, également pour couches de roulement des routes agricoles et des pistes cyclables
Résistance à l'usure (Coefficient Micro-Deval)	≤ 20 ≤ 25	M _{DE20} M _{DE25}	Couches de roulement Couches inférieures ; éléments linéaires et si le cahier des charges l'autorise, également pour couches de roulement des routes agricoles et des pistes cyclables
Coefficient de polissage accéléré (PSV)	≥ 50 ≥ 40 –	PSV ₅₀ PSV _{Déclaré} PSV _{NR}	Couches de roulement Couches de roulement pour routes agricoles et pistes cyclables si le cahier des charges l'autorise Couches inférieures et éléments linéaires
Coefficient d'aplatissement	≤ 20 ≤ 25 ≤ 30	Fl ₂₀ Fl ₂₅ Fl ₃₀	D > 16 8 < D ≤ 16 D ≤ 8
Teneur en chlorures (%)	≤ 0,03	Valeur déclarée	-
Teneur en éléments coquilliers (%)	≤ 10	SC ₁₀	Pour gravillons d'origine marine
Sensibilité des gravillons au gel dégel	≤ 1	F ₁	-
Masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau	–	Valeur déclarée	-

TABLEAU 12 - VALEURS MOYENNES DES COEFFICIENTS LOS ANGELES, MICRO-DEVAL EN PRÉSENCE D'EAU ET DE POLISSAGE ACCÉLÉRÉ POUR DES GRANULATS BELGES

Type de granulat	Los Angeles (10/14)	Micro-Deval en présence d'eau (10/14)	Coefficient de polissage accéléré
Porphyre	11 à 13	4 à 8	53 à 58
Grès	13 à 17	11 à 24	55 à 60
Calcaire	20 à 30	9 à 17	37 à 44
Gravier concassé	17 à 26	4 à 10	55 à 57

Si un granulat ne répond pas parfaitement aux impositions de granularité, cela ne le rend pas forcément impropre à réaliser une courbe granulométrique optimale ; par contre, les impositions relatives à la forme et au pourcentage de fines doivent être scrupuleusement respectées car elles gouvernent l'ouvrabilité du béton. Leur non-respect entraîne automatiquement une augmentation de la teneur en eau du béton. La forme, définie par le coefficient d'aplatissement, précise le degré d'écart que les gravillons présentent par rapport à une forme géométrique idéale, la sphère ou le cube. Les graviers roulés sont des agrégats qui, en général, se rapprochent le plus de la sphère, bien que certains graviers contiennent des éléments plats de faible épaisseur, qui n'ont d'arrondi que les arêtes. La forme des gravillons concassés dépend de la dureté de la roche mère et du nombre de cycles de concassage. Plus un gravillon est concassé, plus sa forme devient cubique. Les gravillons présentant une forme plate et/ou allongée offrent beaucoup plus de résistance au serrage du béton et laissent plus de vides entre eux, ce qui réduit la compacité du béton. Les gravillons dits « reconcassés » qu'on trouve sur le marché belge, sont de forme plus cubique et sont à préférer pour l'obtention de bétons de qualité.

2.1.2. EXIGENCES CONCERNANT LES SABLES

La qualité du sable a une influence primordiale à tout point de vue. Elle influence directement l'ouvrabilité, la durabilité et la résistance du béton. Le gros sable de rivière 0/2 à 0/4 ayant un module de finesse supérieur à 2,4 est le sable pour béton le plus approprié pour les revêtements routiers. Néanmoins, nous verrons au chapitre 4 qu'un sable présentant un minimum voire pas du tout de grains supérieurs à 2 mm peut, dans certains cas, être préférable.

PORPHYRE



GRAVIERS ROULÉS



CALCAIRE



GRÈS



GRAVIERS CONCASSÉS

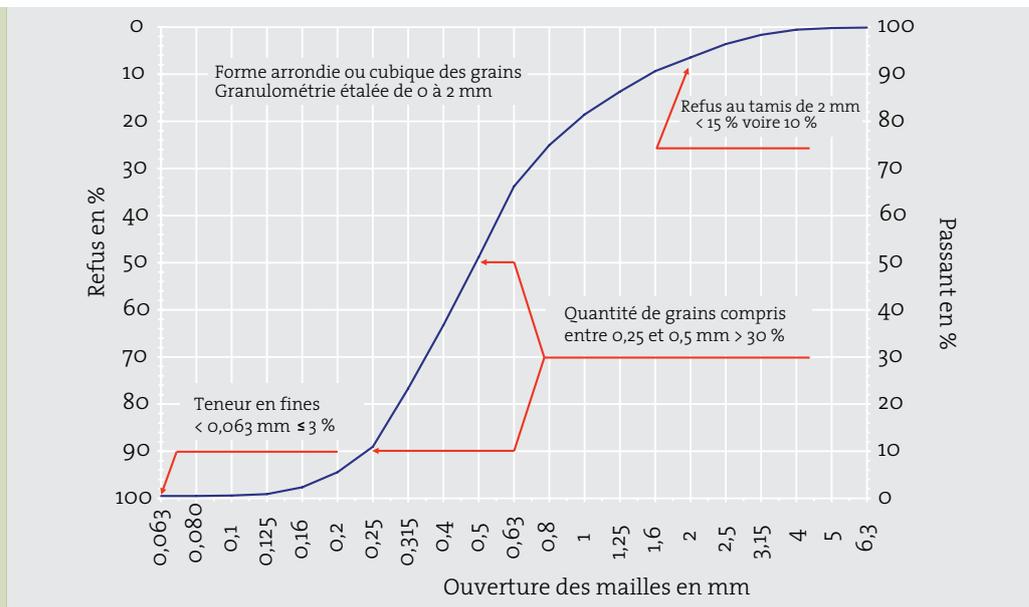


Figure 13 – Les gravillons les plus courants en Belgique

La norme NBN EN 12620 précise également les directives pour les sables ; celles applicables aux bétons routiers sont reprises aux cahiers des charges. On retiendra essentiellement la granularité et la variabilité de la granularité ainsi que la teneur en fines. Cette dernière doit être inférieure à 3%. D'une manière générale, un bon sable pour béton possède les caractéristiques reprises à la figure 14.

Le béton de route est, quant à lui, caractérisé par une teneur en sable relativement faible. Un surcroît de sable augmente en effet le besoin en eau et peut donner lieu à un béton moins dense et moins durable.

Figure 14 –
Caractéristiques
granulométriques d'un
bon sable pour béton



2.2. LES CIMENTS

Les types de ciments les plus couramment employés pour la confection de bétons routiers sont les ciments de classe de résistance 42,5 (N ou R). Le choix est laissé entre un ciment Portland (CEM I) ou un ciment de haut fourneau contenant au maximum 65% de laitier (CEM III/A). Du ciment de classe de résistance 52,5 est parfois utilisé pour des applications particulières comme le béton à durcissement rapide utilisé, par exemple, pour les réparations.

Il faut absolument éviter les ciments de classe de résistance 32,5 et ce même en été par temps chaud. En effet, ces ciments ont des temps de prise plus longs et développent des bétons plus sensibles à une mauvaise protection contre la dessiccation.

De manière à inhiber la réaction alcali-silice, l'emploi d'un ciment à teneur limitée en alcalis (type LA selon la norme NBN B 12-109) s'impose pour les revêtements et accessoires de chaussées en raison de l'environnement routier humide.

2.3. L'EAU DE GÂCHAGE

L'eau de gâchage est indispensable au béton. En quantité trop élevée, elle devient cependant un de ses pires ennemis : un excès d'eau augmente le risque de fissuration du béton et diminue sa résistance ainsi que sa durabilité.

L'eau de gâchage doit être propre. Elle doit être exempte de toute matière susceptible d'influencer la prise et le durcissement du béton ou de corroder les armatures.

L'eau de distribution convient à la fabrication du béton sans devoir être soumise à une analyse préalable.

Pour différentes raisons, il peut arriver que le fabricant du béton soit amené à employer de l'eau d'une autre origine : voies d'eau, étangs, puits, eau de recyclage, etc. En cas de doute quant à l'adéquation de l'eau utilisée pour la fabrication du béton, des essais de contrôle doivent être effectués. La norme NBN EN 1008 donne des exigences à ce sujet. Il est possible de comparer les résistances à 7 jours de deux mêmes bétons ou de deux mêmes mortiers à base de ciment réellement utilisé pour le béton, gâchés l'un avec de l'eau de distribution, l'autre avec de l'eau douteuse. Si aucune chute sensible de résistance n'est enregistrée pour le béton ou le mortier à base d'eau douteuse (10 % de chute de résistance au grand maximum), celle-ci peut être employée dans le béton. L'essai doit être recommencé en cas de modification des caractéristiques de l'eau ou du ciment utilisé.

2.4. LES ADJUVANTS

Les plastifiants/réducteurs d'eau, les superplastifiants/hautement réducteurs d'eau et les entraîneurs d'air sont les principaux adjuvants utilisés dans les bétons routiers. Exceptionnellement, des régulateurs de vitesse de prise (retardateurs et accélérateurs) peuvent être utilisés. Ces adjuvants doivent être conformes à la norme NBN EN 934-2.

Il ne faut jamais perdre de vue que les adjuvants sont destinés à améliorer certaines caractéristiques de bétons bien composés au départ, et non à corriger un béton mal formulé ou formulé à partir de matériaux impropres ou mal choisis.

L'emploi d'un adjuvant nécessite généralement d'effectuer un essai de compatibilité entre celui-ci et le ciment qui sera réellement employé sur chantier ; il arrive en effet parfois que le couple ciment-adjuvant présente des incompatibilités, ou que le dosage proposé par le fabricant soit incorrect pour obtenir l'effet escompté. En cas de doute, des essais de laboratoire rapides (mesure de l'ouvrabilité du béton frais, mesure du délai de maniabilité du béton) permettront de définir un dosage approprié.

2.4.1. LES PLASTIFIANTS RÉDUCTEURS D'EAU

Les plastifiants sont pratiquement toujours nécessaires pour rendre le béton de route suffisamment plastique. Ils ont pour fonction principale de conduire, à même ouvrabilité, à une augmentation des résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau du béton. La diminution de la teneur en eau (au moins 10 l/m³ de béton) entraîne une augmentation de la compacité et par conséquent de la durabilité. Ils sont à base de lignosulfonates, de sels d'acides organiques, de mélamines sulfonates, de naphthalènes sulfonates et de dérivés de mélamines ou naphthalènes.

2.4.2. LES SUPERPLASTIFIANTS HAUTEMENT RÉDUCTEURS D'EAU

Introduits dans un béton, en général peu avant sa mise en œuvre, les superplastifiants ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange. Ce sont, en général, des produits de synthèse organique. Les plus utilisés sont les dérivés de mélamines ou de naphthalène, ainsi que des polyacrylates et des polycarboxylates. Ces derniers sont de nouvelles molécules issues de l'industrie chimique qui ont considérablement amélioré les performances des superplastifiants (augmentation plus considérable de l'ouvrabilité, maintien d'une ouvrabilité élevée plus long, ...).

Les superplastifiants sont moins utilisés que les plastifiants dans le secteur routier, si ce n'est pour des bétonnages où peu de moyens de vibration sont disponibles ou pour réaliser des bétons à forte résistance initiale qui doivent supporter le trafic moins de 72 heures après la mise en œuvre (béton de réparation à rapport E/C < 0,40).

2.4.3. LES ENTRAÎNEURS D'AIR

Les entraîneurs d'air ont pour fonction d'entraîner la formation dans le béton, de microbulles d'air uniformément réparties dans la masse. Les entraîneurs d'air sont des corps tensio-actifs : lignosulfonates, abiétates de résines, sels d'éthanolamine, que l'on mélange en fonction des propriétés à obtenir.

Le béton durci contient naturellement une certaine quantité d'air provenant, soit d'un entraînement lors du malaxage, soit de l'évaporation de l'eau de gâchage non fixée. Cet air (de l'ordre de 15 l/m³, soit 1,5 % du volume) est réparti de manière aléatoire. En revanche, l'entraîneur d'air permet d'en entraîner un volume supérieur et de le répartir uniformément. La résistance au gel du béton durci, ainsi que sa résistance aux sels de déverglaçage, sont considérablement améliorées. Les microbulles qui coupent les réseaux des capillaires limitent le développement des contraintes dues au gel de l'eau interstitielle.

L'utilisation des entraîneurs d'air pour les bétons routiers est obligatoire à l'exception des bétons 0/32 qui présentent une teneur en ciment élevée et une faible quantité de sable soit un mortier de qualité non gélif. La quantité d'air occlus présente dans les autres bétons routiers doit être supérieure à 3 % afin d'assurer une durabilité optimale à l'attaque par le gel en présence de sels de déverglaçage.

Plusieurs facteurs peuvent influencer l'efficacité des adjuvants entraîneurs d'air. Parmi les plus importants, il faut citer le type d'adjuvant entraîneur d'air et la présence ou non d'autres adjuvants. En effet, lorsqu'un plastifiant est utilisé simultanément avec un entraîneur d'air, ce dernier est en général plus efficace et son dosage peut dès lors être plus faible. Un exemple est donné au tableau 13.

TABLEAU 13 – INFLUENCE D'UN PLASTIFIANT SUR LE DOSAGE D'UN ENTRAÎNEUR D'AIR

375 kg/m ³ de ciment CEM III/A 42,5 N LA E/C = 0,45 Slump = ± 50 mm	Quantité de plastifiant (% par rapport à la quantité de ciment)	Quantité d'entraîneur d'air (% par rapport à la quantité de ciment)	% air occlus du béton frais (% - v)
Béton sans air entraîné	0,35	---	1,4
Bétons avec air entraîné	0,09 ---	0,12 0,20	4,0 4,1

Le type de ciment, la présence de cendres volantes, la teneur en eau, le rapport E/C ainsi que la granulométrie de la fraction « mortier » du béton influencent également l'efficacité des entraîneurs d'air. Le malaxage et la température exercent aussi une influence. En fait, à mesure que la température du béton augmente, la quantité d'air diminue pour un même dosage d'entraîneur d'air mais cet effet semble être essentiellement prononcé lorsque l'ouvrabilité du béton est élevée ($\text{slump} > 50 \text{ mm}$); le malaxage prolongé des bétons provoque aussi une chute de la teneur en air entraîné en détruisant les bulles.

2.5. LES COLORANTS (PIGMENTS)

Une coloration du béton est parfois prescrite pour des raisons esthétiques ou de sécurité (aménagement urbains, pistes cyclables, îlots directionnels, etc.).

Il existe deux types de colorants : les colorants organiques et les colorants minéraux (naturels ou de synthèse).

Les colorants minéraux sont les plus souvent utilisés. Leur dosage se situe généralement aux environs de 2 à 5 % en masse par rapport à la quantité de ciment selon la teinte désirée. Si le dosage est supérieur à 5 %, ces pigments peuvent provoquer une diminution sensible de la résistance du béton à cause d'une demande en eau importante vu leur finesse.

Une grande prudence doit être observée en cas d'utilisation de colorants organiques. Leur couleur est moins stable que celle des colorants minéraux. Pour ces derniers, la stabilité de la couleur est aujourd'hui favorisée par la fabrication de pigments de synthèse. En outre, les molécules organiques peuvent influencer la vitesse de début de prise et le processus d'hydratation du ciment.

Les principaux colorants minéraux sont :

- gris à noir, rouge, jaune brun : oxydes de fer ou de ferromanganèse (Fe_2O_3 et Fe_3O_4);
- blanc : dioxyde de titane (TiO_2);
- vert : oxyde de chrome (Cr_2O_3);
- bleu : oxyde de cobalt;
- vert clair, jaune vif, ocre clair : oxydes métalliques complexes;
- rouge, ocre, brun : colorants naturels à base de terres, donc organiques.

L'action des pigments est principalement influencée par la couleur des fines du béton : plus elles sont claires, plus les pigments sont efficaces. Un moyen de renforcer l'action des pigments est donc d'utiliser du ciment blanc pour révéler la couleur mais aussi des granulats (gravillons et sables) colorés.



Figure 16 – Les revêtements en bétons colorés sont multifonctionnels: aménagement des espaces publics, pistes cyclables, voies de bus ou de tram, ...

3. LES CARACTÉRISTIQUES DE SURFACE DES REVÊTEMENTS EN BÉTON

Selon l'usage qui en est fait, un revêtement en béton doit répondre à plusieurs critères. Ceux-ci concernent, évidemment, la sécurité des usagers (résistance au glissement et adhérence entre les pneus du véhicule et la surface de la route) mais aussi le bruit de roulement qui doit être le plus faible possible. C'est ainsi que la planéité du revêtement et la texture de surface sont des caractéristiques primordiales. Elles dépendent de la qualité de la mise en œuvre du béton mais aussi de la composition du béton.

3.1. LA SÉCURITÉ DES USAGERS

La résistance au glissement entre les pneus d'un véhicule et la surface de la route joue un rôle important dans la sécurité routière. Les facteurs qui influencent cette indispensable résistance au glissement sont hormis le comportement (conscient ou inconscient) du conducteur et la présence d'eau de pluie ou de gel, la profondeur du dessin des pneumatiques, le profil en long de la chaussée et, l'état et la texture superficielle du revêtement (micro et macro-texture).

Aux vitesses faibles, le degré d'adhérence à la route est uniquement déterminé par la micro-texture. Pour une route en béton, une telle micro-texture rugueuse, de type papier de verre, peut s'obtenir par simple brossage de la surface. La durabilité de cette texture sera d'autant plus longue que les matériaux utilisés seront plus résistants à l'usure et au polissage et que la circulation sera moins dense. Si l'utilisation de matériaux polissables dans le béton est évitée, ou au moins si la circulation ne les fait pas apparaître en surface, un certain degré d'auto régénération de la micro-texture peut généralement être escompté. Suite aux efforts de frottement des roues sur la chaussée, des grains sont continuellement arrachés au revêtement et la texture offerte au trafic reste par conséquent toujours semblable. Les caractéristiques physico-mécaniques (Los Angeles, Micro-Deval en présence d'Eau, résistance au polissage) exigées pour les granulats entrant dans la composition des bétons routiers sont données au chapitre 2.1.

Aux vitesses plus élevées, une macro-texture plus profonde est nécessaire afin de conserver le contact pneu-chaussée malgré la présence d'un film d'eau. En effet, à mesure que la vitesse augmente, le pneu arrive de plus en plus difficilement à repousser l'eau devant lui. La surface de contact est de plus en plus petite (figure 17) : dans la zone a, le contact est complètement rompu par le film d'eau ; dans la zone b, ce film est localement traversé par des irrégularités de surface, de sorte que des forces de frottement peuvent apparaître grâce à la déformation du pneu ; ce n'est qu'en zone c, où l'eau peut s'évacuer, que le contact est encore suffisant. L'épaisseur du film d'eau ainsi que la texture du pneu et du revêtement déterminent l'importance de la zone c. Dès que cette zone cesse d'exister, apparaît le phénomène connu mais redouté que constitue l'aquaplanage.

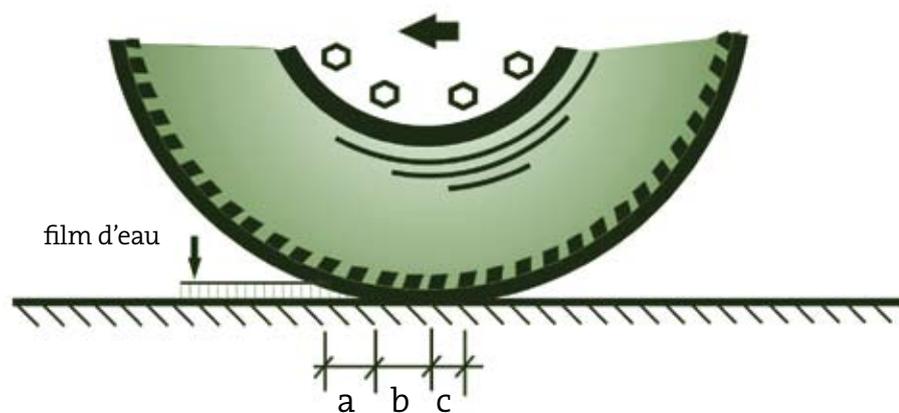


Figure 17 – Zones de contact entre le pneu et la route



Figure 18 – Le brossage de la surface du béton est réalisé en appliquant transversalement sur le béton frais une brosse dure à fibres jointives. La micro-texture ainsi obtenue est d'autant plus durable que la qualité du mortier est excellente (sable – ciment – eau – protection)



Figure 19 – Le dénudage est une opération qui consiste à éliminer le mortier superficiel du revêtement pour laisser apparaître les gravillons en surface. Ce traitement est pratiquement le seul à être utilisé en Belgique pour les autoroutes et les routes importantes en raison du faible bruit de roulement qu'il occasionne

Une macro-texture rugueuse et profonde favorise l'évacuation de l'eau, de sorte que l'étendue de la zone a reste limitée. Afin de pouvoir rompre le film d'eau en zone b, il faut de plus disposer d'une micro-texture râpeuse. De cette manière, comme en zone c, elle permettra que subsiste suffisamment d'adhérence entre le pneu et le revêtement.

Sur les routes qui supportent un trafic rapide et intense, ainsi qu'aux points névralgiques (virages serrés, zones de freinage, ...) de routes moins importantes, il faut veiller à la présence tant d'une macro-texture que d'une micro-texture. Pour les routes secondaires, où la vitesse est normalement moins élevée, une bonne micro-texture est généralement suffisante. Les différents traitements de surface possibles, appliqués dans ce cadre aux revêtements en béton, sont le brossage et le dénudage. Le striage n'est quant à lui, plus appliqué afin de limiter le bruit de roulement.

Outre l'utilisation de matériaux non polissables dans le cas de voiries où la vitesse peut être assez élevée, un traitement de surface par brossage ou par striage n'implique aucune incidence particulière sur la composition du béton. Il y a toutefois lieu d'éviter d'avoir un béton présentant un excès de mortier qui donnera inmanquablement une couche superficielle moins durable.

Par contre, un traitement de surface par dénudage exige un squelette granulométrique plus affiné, toujours avec une faible quantité de mortier mais avec une quantité assez importante de gravillons de petite taille (entre 4 et 8 mm). Il s'agit d'une exigence importante pour limiter le bruit de roulement et pour obtenir un bel aspect esthétique de la surface du béton. Ces points sont détaillés ci-après.



Figure 20 – Le striage transversal ou rainurage est obtenu à l'aide de râteliers dont les dents, en plastique ou en acier, sont distantes de 20 à 50 mm. La profondeur des stries est de 2 à 3 mm. Ce type de traitement a été beaucoup utilisé sur les routes à trafic important pour être ensuite abandonné en raison de l'inconfort acoustique et de roulement qu'il peut provoquer

3.2. LE BÉTON SILENCIEUX

Le contact pneu/revêtement est une source de bruit non négligeable qui entrave le confort de roulement de l'automobiliste et qui engendre des nuisances non négligeables pour les riverains de la voirie. La plupart des sons de la vie courante sont compris entre 30 et 90 décibels. Des niveaux supérieurs à 90 dB sont rencontrés essentiellement dans la vie professionnelle (industrie, armée, ...) et dans certaines activités de loisirs (chasse, musique, sports mécaniques). En général, un trafic automobile se situe aux environs de 80 dB. Il faut noter que l'échelle des décibels est une échelle logarithmique. Ainsi, 3 décibels supplémentaires correspondent à un doublement du niveau sonore, et 10 décibels multiplient celui-ci par 10. De même, les décibels ne s'additionnent pas : deux véhicules de niveau sonore de 80 décibels ne font pas un bruit de 160 décibels mais de 83 décibels.

Plusieurs aspects interviennent dans le niveau des bruits de roulement à savoir la planéité ou la méga-texture et la texture de surface. Il faut absolument éviter les défauts de planéité. Ainsi une mise en œuvre à la slipform équipée d'une poutre lisseuse à l'arrière (super-smoother) est favorable. En termes de composition et de fabrication du béton, un béton de consistance uniforme adaptée aux machines de pose et aux conditions de chantier ainsi qu'un approvisionnement régulier sont des facteurs essentiels à l'obtention d'un bon uni de surface.

La texture de surface, à savoir la macro-texture, doit être suffisante. Celle-ci permet à l'air poussé par le pneu de s'échapper dans ou à la surface du revêtement. Ainsi, pour réduire au mieux le bruit de roulement, il convient d'utiliser la technique du dénudage chimique comme traitement de surface et étudier une composition appropriée du béton et donc :

- de réduire le calibre maximum du plus gros granulat. En effet, plus le D_{max} est petit, moins bruyant est le revêtement. Dans la pratique, le D_{max} est limité au maximum à 20 mm. Des bétons plus fins (0/6, 0/10) sont possibles mais dans ces cas, la technique de mise en œuvre en bicouche est pratiquée.
- d'utiliser une teneur importante en granulats de calibre compris entre 4 et 8 mm. Les recommandations font état de minimum 20 % de gravillons compris entre 4 et 6 mm ou 25 % de gravillons compris entre 4 et 8 mm ;
- de limiter la profondeur de dénudage à une valeur proche de 1 mm (de 0,8 à 1,2 mm).



Figure 21 - Super-smoother : il s'agit d'une poutre lisseuse longitudinale à déplacement transversal à l'arrière de la machine

Des mesures ont permis ainsi de constater qu'un revêtement en béton dénudé 0/20 permet de gagner 7 dB(A) sur le bruit de roulement, par rapport à un revêtement en béton strié 0/32. D'autres mesures ont été réalisées à Estaimpuis en 2002 sur quatre tronçons expérimentaux de béton armé continu bicouche, réalisés à l'aide de deux machines à coffrages glissants, avec comme valeur de D_{max} pour la couche supérieure : 7 mm (aujourd'hui 6 mm selon la norme NBN EN 12620), 10, 14 et 20 mm. Le tableau 14 synthétise les résultats obtenus. Ceux-ci montrent que plus le D_{max} des gravillons est petit, moins le revêtement est bruyant, mais les écarts sont toutefois assez faibles. Ce qui apparaît clairement, c'est qu'une réalisation du revêtement en deux couches posées frais sur frais (bicouche) améliore sensiblement la planéité de surface et donc le caractère silencieux du revêtement. La raison semble en être la plus grande facilité pour la deuxième machine à coffrages glissants de mettre en œuvre une couche de faible épaisseur, sans arrêts de machines et à vitesse constante et donc de bien respecter les niveaux imposés par les dispositifs de guidages (fils, ...).

TABLEAU 14 – MESURES DE BRUIT À ESTAIMPUIS SUR LES DIFFÉRENTES SECTIONS DE BÉTONS FINS (MESURES RÉALISÉES 1 AN APRÈS LA MISE EN SERVICE DU REVÊTEMENT)

Vitesse de référence (km/h)	Niveau sonore d'un véhicule léger en dB(A) (méthode SPB (Statistical Pass-by Method))			
	Section 4/7	Section 7/10	Section 10/14	Section 14/20
70	75,9	76,6	77,2	77,8
90	79,4	80,0	80,9	81,4



1	2
3	4
5	6
7	8

Figure 22 – Mise en œuvre d'un béton armé continu bicouche à Estaimpuis
 1 & 2 – Mise en œuvre de la couche inférieure (béton 0/32)
 3 & 4 – Mise en œuvre de la couche supérieure frais sur frais (5 cm de béton 0/7 ou 6 cm de béton 0/10 ou 8 cm de béton 0/14 ou 8 cm de béton 0/20)
 5 – Pulvérisation du retardateur de prise
 6 – Pose d'une membrane étanche afin de protéger le béton frais contre la dessiccation
 7 – Elimination du mortier superficiel après quelques heures de durcissement (dénudage)
 8 – Aspect du béton dénudé, fine macro-texture responsable d'un faible bruit de roulement

4. LA COMPOSITION DES BÉTONS POUR REVÊTEMENTS ET ACCESSOIRES DE CHAUSSÉES

Le choix des proportions des différents constituants est primordial pour l'obtention d'un béton de qualité. En effet, l'usage généralisé de la vibration interne et des machines à coffrages glissants qui ne permettent pas de correction après mise en œuvre a imposé l'emploi de compositions adaptées.

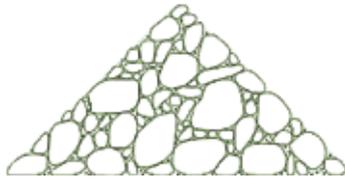
De nombreuses méthodes de calcul de la composition des bétons existent dans la littérature. Citons par exemple la loi de FERET (1890), la loi de FULLER (1907), la loi d'ABRAMS (1918), la loi de BOLOMEY (1925),... Il est cependant toujours nécessaire de les interpréter en fonction des matériaux réellement disponibles ; l'expérience a une grande importance dans ce domaine, c'est pourquoi il est recommandé de s'adresser à un laboratoire spécialisé lorsqu'un problème lié à la composition du béton se présente, ou lors de la mise en marche d'une nouvelle machine, ou encore lorsque des matériaux de caractéristiques mal connues sont utilisés.

Sans entrer dans les détails, les méthodes visent à obtenir un béton compact en enrobant l'ensemble des granulats d'une quantité optimale de pâte de ciment (figure 23 – dans ces schémas, S représente la fraction sable du béton qui contrairement à la norme NBN EN 12620 correspond aux grains du squelette inerte du béton compris entre 0 et 2 mm et G, la fraction gravillons égale aux grains compris entre 2 et D mm). Cette quantité optimale de pâte de ciment doit, en principe, être minimale dans le mélange mais doit toutefois être adaptée en fonction de l'ouvrabilité nécessaire. Moins le béton est compact, plus le volume de pâte doit être important pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée. On risque ainsi d'obtenir des bétons à forte teneur en eau et donc de mauvaise qualité. En effet, la quantité de pâte doit toujours être supérieure au défaut de compacité (à la porosité) pour obtenir une ouvrabilité donnée.

Les vides du squelette inerte composé par les gravillons et le sable constituent donc des données importantes ; certaines méthodes partent du volume de ces vides pour déterminer la quantité optimale de pâte, d'autres prennent en compte la composition granulométrique du squelette inerte pour réduire ce volume des vides au minimum.

Le principe des méthodes les plus utilisées en Europe est l'établissement de courbes granulométriques (ou de fuseaux granulométriques) en fonction du mode de mise en œuvre, des formes de l'élément à construire et du mode de serrage du béton. Les proportions des granulats sont ensuite choisies de manière à ce que la courbe granulométrique du béton épouse le plus fidèlement possible la courbe de référence ou s'intègre parfaitement dans le fuseau.

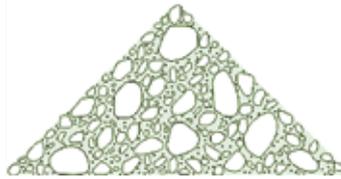
Les paragraphes ci-après donnent des courbes granulométriques de référence des squelettes inertes de différents bétons de revêtements et d'accessoires de chaussée ainsi qu'un mode opératoire pour la détermination du dosage des granulats. A noter que ces courbes de références sont valables aussi bien pour des revêtements discontinus en dalles de béton que pour des revêtements en béton armé continu. En effet, la présence ou non de joints transversaux dans le revêtement ne modifie en rien la composition du béton.



Excès de gros granulats

Rapport $\frac{S}{S+G}$ faible
= compacité faible

-> mauvaise ouvrabilité

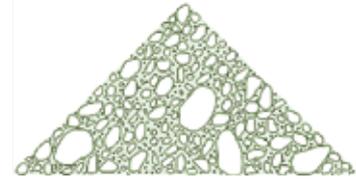


Bonnes proportions des constituants

Rapport $\frac{S}{S+G}$ optimal

= optimum de compacité

- >
- bonne ouvrabilité
 - bonne résistance
 - peu de mortier



Excès de granulats fins

Rapport $\frac{S}{S+G}$ optimal
= compacité faible

-> trop d'eau de mouillage

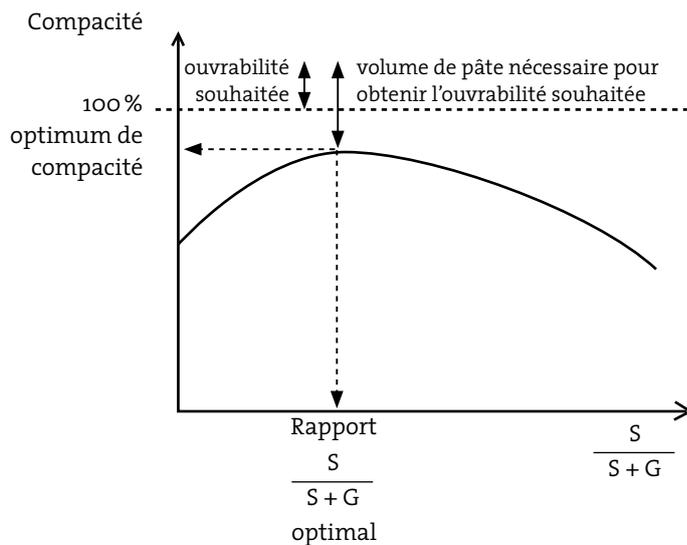


Figure 23 – Evolution de la compacité du béton en fonction des proportions des constituants. A gauche, les gravillons dominent; à droite, le sable domine et au milieu, le mélange est à son optimum de compacité

4.1. COURBES GRANULOMÉTRIQUES DE RÉFÉRENCE DES BÉTONS ROUTIERS

4.1.1. BÉTON 0/32 POUR AUTOROUTES, ROUTES RÉGIONALES ET COMMUNALES (FIGURE 24)

Le rapport pondéral entre la fraction 0/2 du sable utilisé et le squelette inerte (rapport $S/(S+G)$) se situe pour ce béton 0/32 à $\pm 26\%$. L'énergie de compactage des machines à

coffrages glissants étant assez élevée, la teneur en sable est faible. Ceci est favorable à la compacité et donc à la durabilité de ce béton étant donné que la quantité d'eau de mouillage du sable reste ainsi limitée. La courbe en pointillé sur le graphique permet d'obtenir une composition de béton (environ 150 kg/m^3 de gravillons 20/32 en moins) où l'extrusion est améliorée ainsi que le maintien en bord de dalle.

Courbe granulométrique

Béton 0/32
 Autoroutes
 Routes régionales et communales
 Traitement de surface = brossage de la surface du béton frais

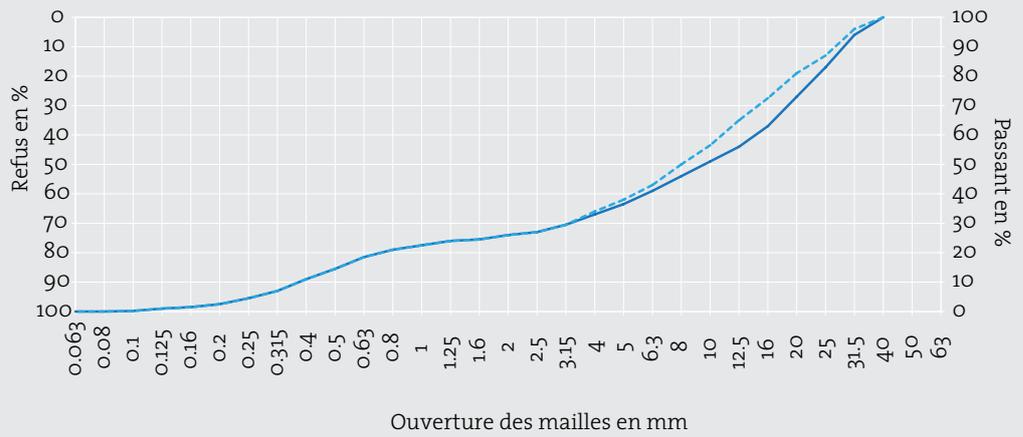


Figure 24 – Courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/32 pour autoroutes et routes régionales ou communales



Figure 25 – Réhabilitation des autoroutes E411 et E25 en province de Luxembourg au moyen d'un béton armé continu 0/32

4.1.2. BÉTON 0/20 POUR ROUTES RÉGIONALES ET COMMUNALES (FIGURE 26)

Le rapport pondéral entre la fraction 0/2 du sable utilisé et le squelette inerte (rapport $S/(S+G)$) se situe, pour ce béton 0/20, à 33 – 34 %. La teneur en sable est donc plus élevée qu'un béton 0/32 bien compact mais ceci est bien entendu dû à la diminution du calibre nominal des gravillons (20 mm au lieu de 32 mm). La quantité d'eau nécessaire à ce béton sera donc plus élevée mais de manière à toujours garantir une bonne durabilité, la teneur en ciment sera également plus élevée (375 kg/m^3 , $E/C \leq 0,50$ pour ce béton 0/20 contre 350 kg/m^3 , $E/C \leq 0,50$ pour un béton 0/32).

A remarquer également la continuité granulométrique du squelette inerte de ce béton, la quantité de gravillons compris entre 2 et 8 mm est, en effet, assez élevée (environ 15 % de la totalité du squelette inerte). Il ne s'agit toutefois pas d'un béton destiné à être dénudé chimiquement (béton silencieux). Le traitement de surface adéquat est, donc, un brossage de la surface du béton frais.

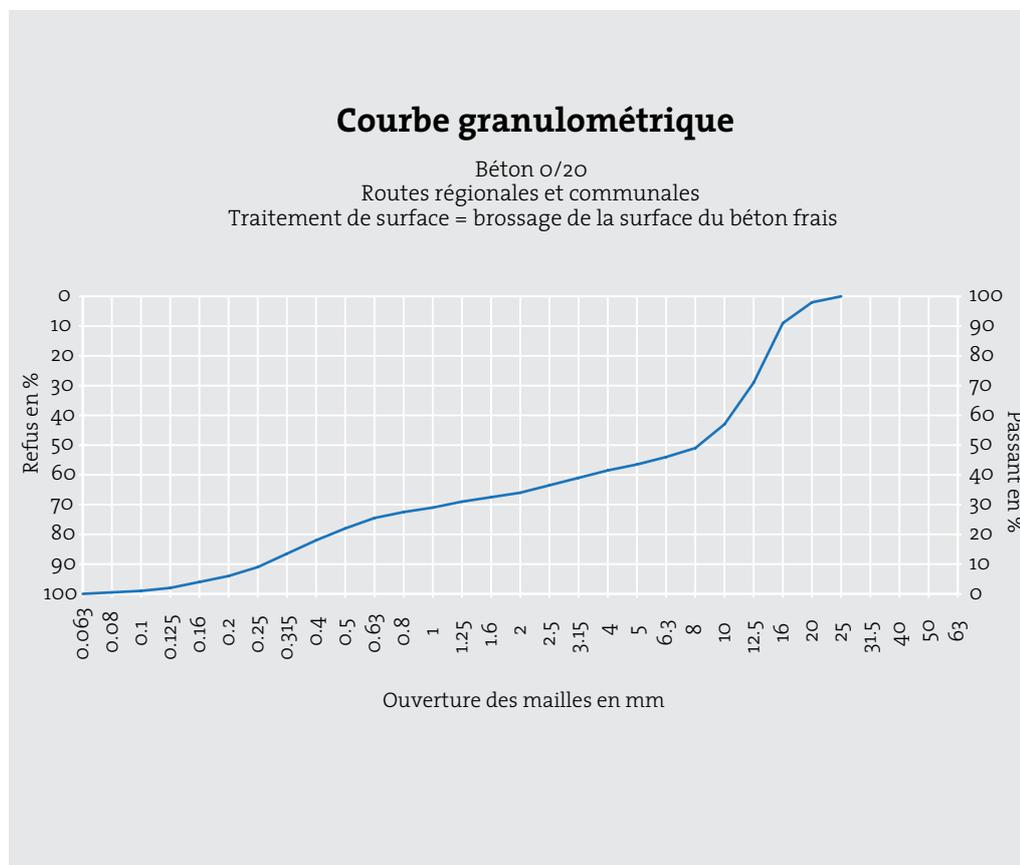


Figure 26 – Courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/20 pour routes régionales et communales



Figure 27 – Travaux de bétonnage de la N29 à Perwez. La chaussée est constituée d'un revêtement en dalles de béton goudonnées dont le traitement de surface est un broyage

Figure 28 - Si la voirie est un revêtement discontinu en dalles de béton goudonnées et où les goujons sont intégrés par vibration dans le béton, il y a lieu de ne pas opter pour un béton 0/32 mais pour un béton 0/20. En effet, ce dernier contient plus de mortier ce qui facilite la mise en place des goujons et l'obtention d'un fini de surface correct après l'insertion des goujons.



4.1.3. BÉTONS 0/32 ET 0/20 POUR ROUTES AGRICOLES ET PISTES CYCLABLES (FIGURES 30 ET 31)

Les exigences en matière de résistances mécaniques pour les bétons des routes rurales ou des pistes cyclables sont moins élevées que pour celles où le trafic est plus important, la teneur en ciment est donc aussi plus faible (celle-ci est généralement de l'ordre de 350 kg/m^3). C'est ainsi que, afin d'obtenir une teneur en mortier permettant une mise en œuvre optimale, la teneur en sable est plus élevée par rapport aux bétons 0/32 et 0/20 pour les routes régionales et communales. Le rapport pondéral entre la fraction 0/2 du sable utilisé et le squelette inerte (rapport $S/(S+G)$) se situe à $\pm 33\%$ et $\pm 37\%$ respectivement pour le béton 0/32 et le béton 0/20. Contenant plus de sable, ces bétons nécessitent

moins d'énergie de compactage et plus d'eau de mouillage. Ils seront donc moins compacts mais les voiries agricoles et les pistes cyclables sont, en général, moins exposées aux sels de déverglaçage. Toutefois, si l'épandage de sels de déverglaçage est important (sur certaines pistes cyclables par exemple), il y a lieu d'opter pour le béton dont le squelette inerte est décrit au paragraphe 4.1.2 ci-avant.

A noter, qu'il est toujours préférable d'utiliser un béton ayant le plus grand D_{max} possible. Un tel béton demande moins de pâte pour enrober tous les agrégats et sera donc de meilleure qualité. Les pistes cyclables étant généralement mise en œuvre au moyen de machine à coffrages glissants moins puissantes, un béton 0/20 est donc, préférable pour celles-ci.

En ce qui concerne le traitement de surface, les squelettes inertes de ces bétons ne sont pas adaptés à un dénudage. Il s'agit donc d'un brossage de la surface du béton frais.

Figure 29 –
Bétonnage d'une route de remembrement agricole à Fexhe-le-Haut-Clocher



Courbe granulométrique

Béton 0/32
Routes agricoles
Traitement de surface = brossage de la surface du béton frais

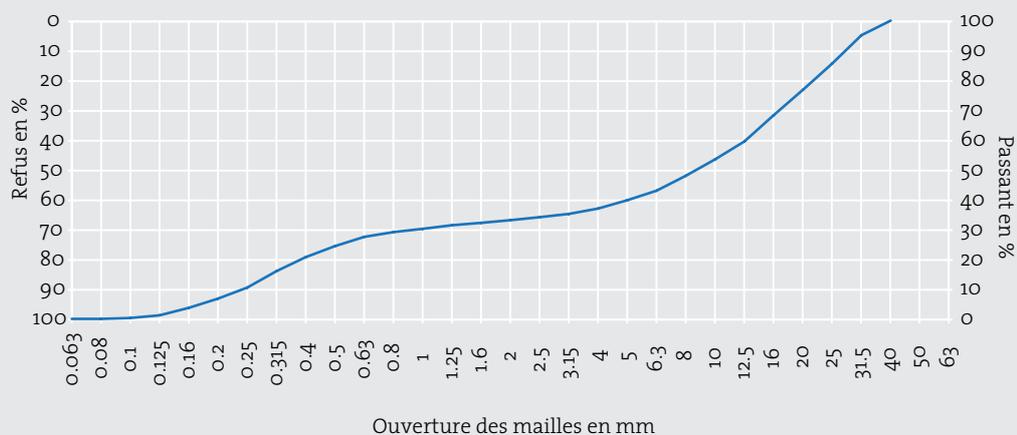
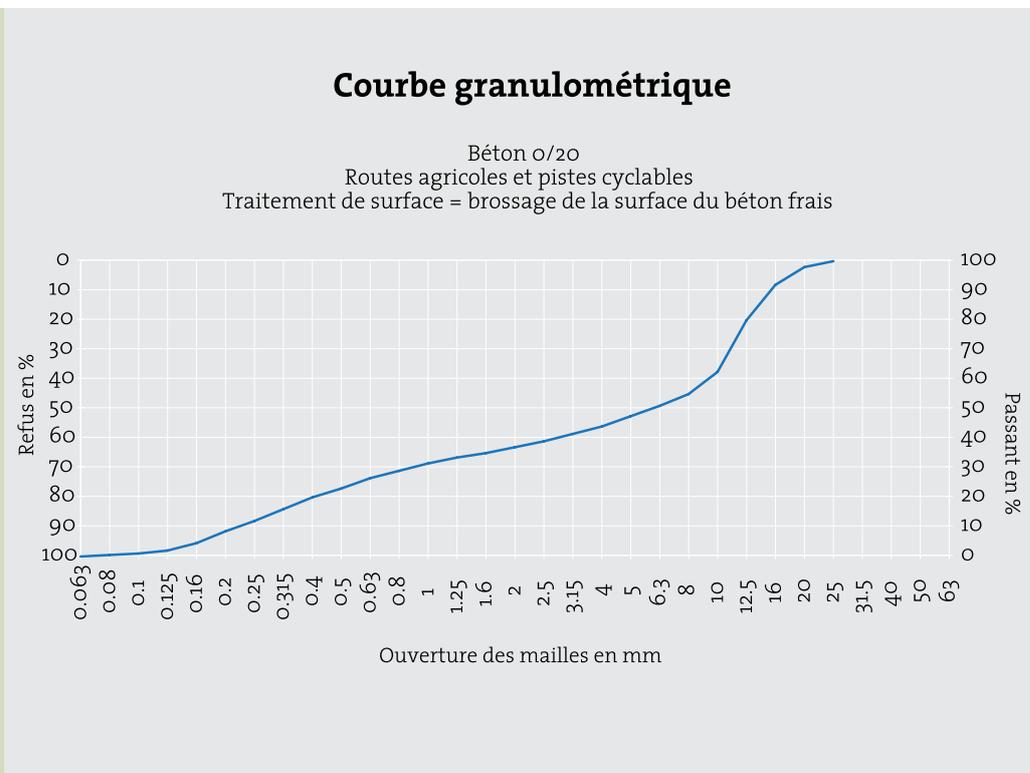


Figure 30 – Courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/32 pour routes agricoles

Figure 31 - Courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/20 pour routes agricoles et pistes cyclables



4.1.4. BÉTONS SILENCIEUX 0/20, 0/14, 0/10 ET 0/6 (FIGURES 32 À 35)

Le rapport pondéral entre la fraction 0/2 du sable utilisé et le squelette inerte (rapport $S/(S+G)$) se situe, pour le béton 0/20, à 33 – 34%. La teneur en sable est donc identique à celle d'un béton 0/20 classique. La différence réside dans la grande quantité de gravillons compris entre 4 et 6 mm ou entre 4 et 8 mm, respectivement 20 et 25 % de la totalité du squelette inerte du béton. Ainsi, après dénudage de la surface du béton, une bonne macro-texture (une surface bien remplie de petits gravillons) est obtenue ce qui est favorable pour le confort de roulement comme nous avons pu le voir au chapitre 3.

En diminuant le D_{max} du granulat (bétons 0/14, 0/10 et 0/6), la teneur en sable 0/2 augmente par rapport au béton 0/20. Ceci a pour effet, comme expliqué précédemment, d'augmenter la demande en eau.

A remarquer que tous ces bétons sont quasiment discontinus puisque la fraction 2/4 est pour ainsi dire nulle. En fait, en tant que sable, il vaut mieux éviter un sable ayant des grains entre 2 et 4 mm et en tant que gravillon, il y a lieu de privilégier un gravillon 4/6 à la place d'un gravillon 2/6. Ce faisant, la fraction des grains du béton comprise entre 2 et 4 mm n'est pas surdosée ce qui est favorable pour la macro texture et l'aspect du béton.

Courbe granulométrique

Béton 0/20
 Autoroutes
 Routes régionales et communales
 Béton silencieux
 Traitement de surface = dénudage de la surface du béton

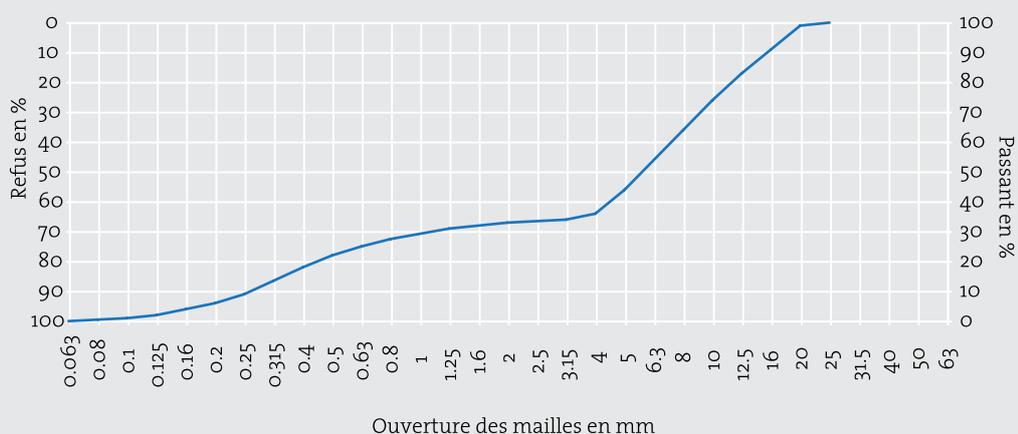


Figure 32 – Courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/20 pour revêtement silencieux

Les courbes en traits continus de ces graphiques sont obtenues au départ d'un sable de rivière gros (sable 0/2 avec un module de finesse supérieur à 2,4). La courbe en trait discontinu du béton 0/14 (figure 33) montre un cas pratique où le sable uniquement disponible à la centrale à béton était un sable de rivière 0/1 à grains moyens (module de finesse égal à 2,1). Afin de pouvoir utiliser ce sable tel quel, la fraction sable du béton a été réduite au minimum et la fraction 2/6 a

fortement été augmentée. La composition de ce béton est donnée au tableau 15.

Cet exemple nous prouve que toutes ces courbes doivent être analysées au cas par cas en fonction des matériaux disponibles et en fonction des moyens de mise en œuvre. Le tableau 16 donne quelques exemples de composition de bétons fins silencieux ainsi que les aspects obtenus.

TABLEAU 15 – COMPOSITION ET ASPECT D'UN BÉTON SILENCIEUX 0/14 MIS EN ŒUVRE À WANZE EN 2006 (CHEMIN DE HÜCCORGNE À WARNANT)

Concassé de grès 6/14:	38,1% soit 685 kg/m ³
Concassé de grès 2/6:	31,7% soit 570 kg/m ³
Sable de rivière 0/1:	30,2% soit 545 kg/m ³
Ciment CEM III/A 42,5 N LA:	400 kg/m ³
E/C ≤ 0,45	
Plastifiant et entraîneur d'air	



Figure 33 – En trait continu, la courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/14 pour revêtement silencieux

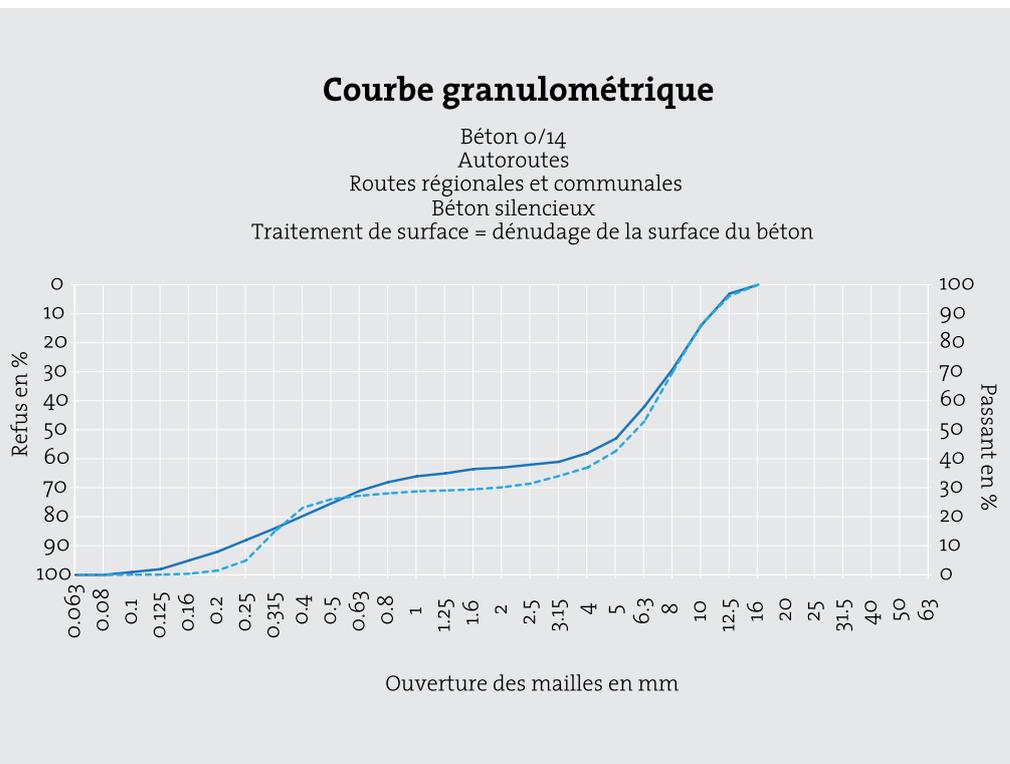
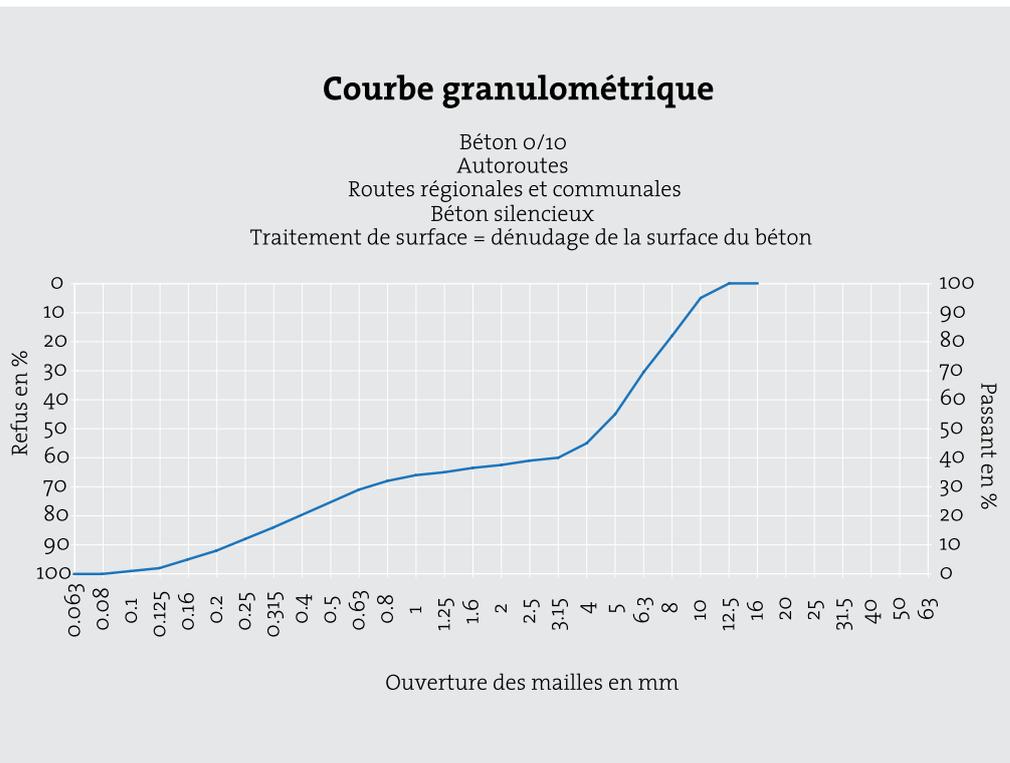


Figure 34 – Courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/10 pour revêtement silencieux



Courbe granulométrique

Béton 0/6
Autoroutes
Routes régionales et communales
Béton silencieux
Traitement de surface = dénudage de la surface du béton

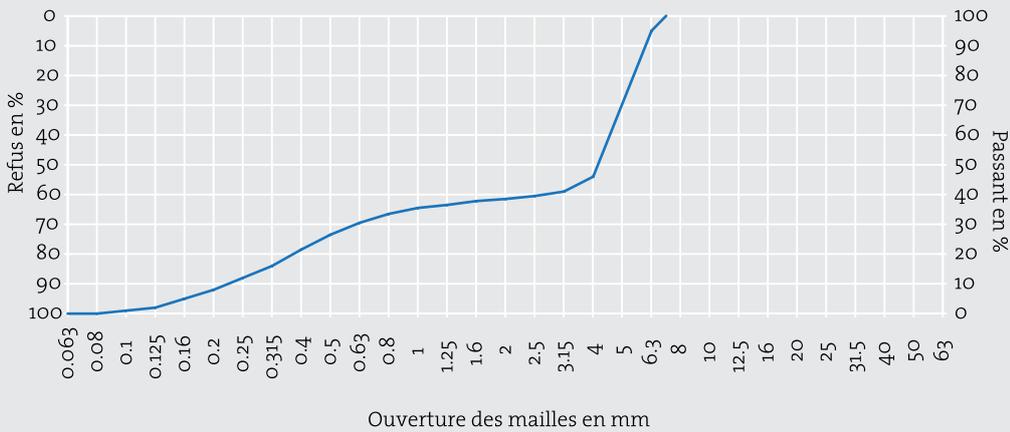


Figure 35 – Courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/6 pour revêtement silencieux

4.1.5. BÉTONS 0/20 ET 0/32 POUR ACCESSOIRES DE CHAUSSEE (FIGURES 36 ET 37)

Les bétons d'accessoires de chaussée coulés en place sont généralement mis en œuvre au moyen de machines à coffrages glissants dont la puissance de vibration est inférieure à celle des machines pour revêtements. Afin d'améliorer l'ouvrabilité et la tenue au démoulage et afin d'obtenir un bon fini de surface, les compositions adoptées contiennent, généralement, plus de sable. Le rapport pondéral entre la fraction 0/2 et la totalité du squelette inerte (rapport $S/(S+G)$) se situe, pour le béton destiné à la construction de barrières de sécurité, à plus ou moins 40 % (figure 36). La teneur en sable est donc d'environ 7 % plus élevée qu'un béton de revêtement 0/20. En général, deux sables sont utilisés dans la fabrication des bétons pour barrières de sécurité : un sable fin (par exemple un sable de sablière 0/1) et un sable gros de rivière. Ces deux sables sont, en général, mélangés dans les proportions suivantes : environ 20 % pour le sable fin et environ 80 % pour le sable gros. Il n'en est pas de même pour les bétons destinés à la fabrication de

bordures ou de filets d'eau (figure 37). En effet, ces éléments sont fortement sollicités par des eaux chargées de sels de déverglaçage. Il est donc conseillé de ne pas augmenter fortement la teneur en sable afin d'assurer la durabilité de ces éléments.

A noter que les barrières de sécurité sont quelques fois mises en œuvre avec un béton dont le D_{max} est de 32 mm. Néanmoins, il ne s'agit pas d'un vrai béton 0/32 puisque la seule différence avec le béton 0/20 réside dans le fait que 150 à 200 kg/m³ de gravillons 8/20 sont remplacés par une quantité équivalente de gravillons 20/32. A remarquer également la parfaite continuité granulométrique du squelette inerte de ces bétons.

La durabilité des accessoires de chaussée aux sels de déverglaçage est bien entendu fortement dépendante du rapport E/C du béton et plus particulièrement de la teneur en ciment. Ainsi, il est conseillé de ne pas descendre en dessous de 375 kg de ciment par m³ de béton. De plus un entraîneur d'air est aussi obligatoire pour ces bétons.

TABLEAU 16 – EXEMPLES DE COMPOSITION DE BÉTONS FINS SILENCIEUX

A10/E40 à Ternat – Mise en œuvre en 2002 – Béton o/20

Concassé porphyre 14/20 :	270 kg/m ³
Concassé porphyre 6/14 :	590 kg/m ³
Concassé porphyre 4/6 :	345 kg/m ³
Sable de rivière 0/4 :	440 kg/m ³
Sable de rivière 0/1 :	150 kg/m ³
Ciment CEM III/A 42,5 N LA :	405 kg/m ³
Eau totale :	175 l/m ³
Plastifiant et entraîneur d'air	
Total :	≅ 2375 kg/m ³



Drève de Lorraine à Uccle – Mise en œuvre en 2003 – Béton o/14

Concassé porphyre 6/14 :	770 kg/m ³
Concassé porphyre 4/6 :	300 kg/m ³
Sable de rivière 0/4 :	450 kg/m ³
Sable de mer 0/1 :	250 kg/m ³
Ciment CEM III/A 42,5 N LA :	400 kg/m ³
Eau totale :	180 l/m ³
Plastifiant et entraîneur d'air	
Total :	≅ 2350 kg/m ³



Chaussée de Wavre à Wanze – Mise en œuvre en 2009 – Béton o/14

Gravier concassé 6/14 :	620 kg/m ³
Gravier concassé 2/6 :	560 kg/m ³
Sable de rivière 0/2 :	580 kg/m ³
Ciment CEM III/A 42,5 N LA :	375 kg/m ³
Pigment brun :	7,5 kg/m ³
Eau totale :	180 à 200 l/m ³
Plastifiant et entraîneur d'air	
Total :	≅ 2335 kg/m ³



N49/E34 à Zwijndrecht – Mise en œuvre en 2008 – Béton o/6

Concassé porphyre 2/6 :	1015 kg/m ³
Sable de mer 0/4 :	470 kg/m ³
Sable de mer 0/1 :	200 kg/m ³
Ciment CEM III/A 42,5 N LA :	425 kg/m ³
Eau totale :	190 l/m ³
Plastifiant et entraîneur d'air	
Total :	≅ 2300 kg/m ³



Avenue du Port à Bruxelles – Etude de laboratoire – Béton o/6

Mélange gravier et grès concassés 4/6 :	1060 kg/m ³
Sable de rivière 0/2 :	625 kg/m ³
Ciment CEM III/A 42,5 N LA :	425 kg/m ³
Pigment brun :	17 kg/m ³
Eau totale :	200 l/m ³
Plastifiant et entraîneur d'air	
Total :	≅ 2330 kg/m ³



Courbe granulométrique

Bétons 0/20 et 0/32
Barrières de sécurité

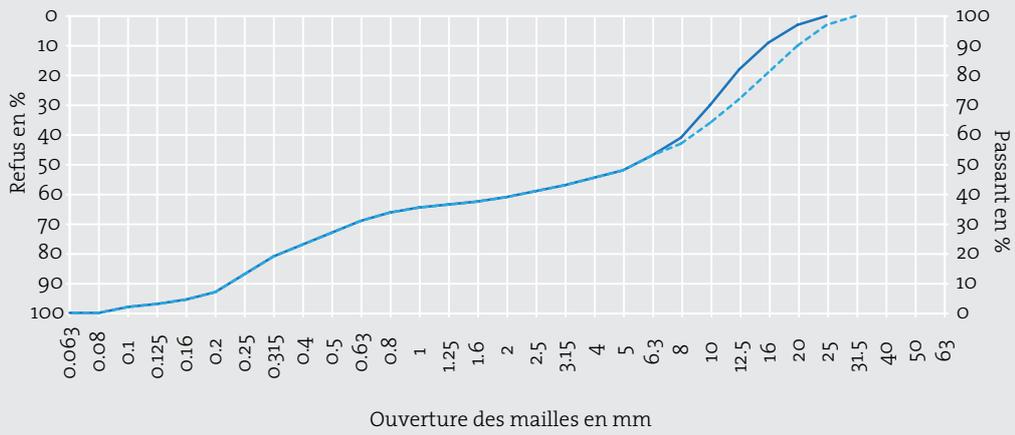


Figure 36 – Courbe de référence des squelettes inertes des bétons 0/20 et 0/32 pour barrières de sécurité

Courbe granulométrique

Béton 0/20
Bordures, filets d'eau

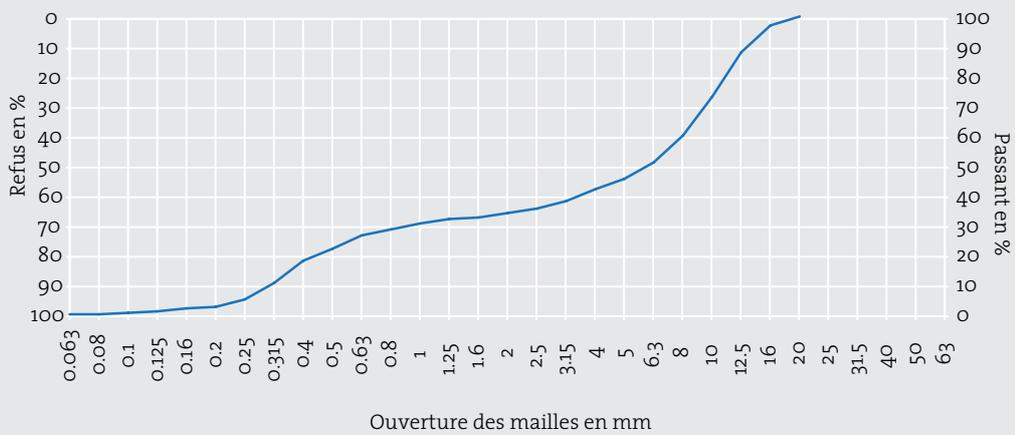


Figure 37 – Courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/20 pour bordures ou filets d'eau



Figure 38 – Bétonnage
d'une barrière de
sécurité (profil STEP)
sur la N49/E34 en 2007



4.2. MÉTHODE PRATIQUE POUR LA DÉTERMINATION DU DOSAGE DES GRANULATS : LA MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS

4.2.1. PRINCIPE

La méthode des moindres carrés permet de déterminer le dosage d'un nombre quelconque de matières, par approximation de la courbe granulométrique résultant d'une courbe granulométrique idéale donnée. La méthode s'applique à des courbes idéales pour le squelette solide (ciment compris) ou bien à des courbes idéales pour le squelette inerte. Ci-après, c'est uniquement le calcul du squelette inerte qui sera considéré.

La méthode des moindres carrés est basée sur l'idée que les carrés des écarts entre l'ordonnée de la courbe du mélange réel et l'ordonnée de la courbe idéale soient réduits au minimum. Vu que le nombre d'inconnues est illimité, la méthode des moindres carrés est absolument générale.

→ Considérons dans un premier temps, le cas où il n'y a que deux matières inertes.

Appelons y_{n1} l'ordonnée de la courbe granulométrique du matériau 1 pour l'abscisse n ; de même y_{n2} pour le matériau 2.

L'ordonnée résultante obtenue par mélange des deux matières inertes dans les proportions s_1 et s_2 (en volume) vaut :

$$y_{n1} s_1 + y_{n2} s_2$$

avec $s_1 + s_2 = 1$

Si y_{ni} désigne l'ordonnée de la courbe idéale pour le squelette inerte, l'écart E_n entre l'ordonnée du mélange réel et l'ordonnée idéale sera de :

$$E_n = y_{n1} s_1 + y_{n2} s_2 - y_{ni}$$

$$\Leftrightarrow E_n = y_{n1} s_1 + y_{n2} (1 - s_1) - y_{ni}$$

$$\Leftrightarrow E_n = a_{n1} s_1 - a_n$$

avec :

$$a_{n1} = y_{n1} - y_{n2}$$

$$a_n = y_{ni} - y_{n2}$$

Nous allons déterminer s_1 d'une telle façon que la somme des carrés des écarts soit minimum :

$$\Rightarrow \sum E_n^2 = \sum (a_{n1} s_1 - a_n)^2 \text{ soit minimum.}$$

La valeur minimale est obtenue en calculant la dérivée de cette fonction et en l'assimilant à 0. Donc :

$$\frac{\delta \left[\sum (a_{n1} s_1 - a_n)^2 \right]}{\delta s_1} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\delta}{\delta s_1} \sum (a_{n1}^2 s_1^2 - 2 a_{n1} a_n s_1 + a_n^2) = 0$$

$$\Leftrightarrow \sum (2 a_{n1}^2 s_1 - 2 a_{n1} a_n) = 0$$

$$\Leftrightarrow s_1 = \frac{\sum a_{n1} a_n}{\sum a_{n1}^2}$$

ayant s_1 , nous avons s_2 par la relation $s_2 = 1 - s_1$

→ Cas où il y a trois matières inertes à mélanger.

Nous avons $s_1 + s_2 + s_3 = 1$ (ou $s_3 = 1 - s_1 - s_2$)

$$\begin{aligned} E_n &= y_{n1}s_1 + y_{n2}s_2 + y_{n3}s_3 - y_{ni} \\ \Leftrightarrow E_n &= y_{n1}s_1 + y_{n2}s_2 + y_{n3}(1 - s_1 - s_2) - y_{ni} \\ \Leftrightarrow E_n &= (y_{n1} - y_{n3})s_1 + (y_{n2} - y_{n3})s_2 + y_{n3} - y_{ni} \end{aligned}$$

La somme des carrés des écarts est alors :

$$\begin{aligned} \sum E_n^2 &= \sum \left[(y_{n3} - y_{ni})^2 + 2(y_{n1} - y_{n3})(y_{n3} - y_{ni})s_1 \right. \\ &\quad + 2(y_{n2} - y_{n3})(y_{n3} - y_{ni})s_2 \\ &\quad + 2(y_{n1} - y_{n3})(y_{n2} - y_{n3})s_1s_2 \\ &\quad \left. + (y_{n1} - y_{n3})^2 s_1^2 + (y_{n2} - y_{n3})^2 s_2^2 \right] \end{aligned}$$

s_1 et s_2 sont déterminés par les équations suivantes :

$$\frac{\delta \sum E_n^2}{\delta s_1} = 0 \text{ et } \frac{\delta \sum E_n^2}{\delta s_2} = 0$$

soit

$$2 \sum (y_{n1} - y_{n3})(y_{n3} - y_{ni}) + 2 \sum (y_{n1} - y_{n3})(y_{n2} - y_{n3})s_2 + 2 \sum (y_{n1} - y_{n3})^2 s_1 = 0$$

et

$$2 \sum (y_{n2} - y_{n3})(y_{n3} - y_{ni}) + 2 \sum (y_{n1} - y_{n3})(y_{n2} - y_{n3})s_1 + 2 \sum (y_{n2} - y_{n3})^2 s_2 = 0$$

$$\Leftrightarrow s_1 \sum a_{n1}^2 + s_2 \sum a_{n1} a_{n2} = \sum a_{n1} a_n \text{ et } s_1 \sum a_{n1} a_{n2} + s_2 \sum a_{n2}^2 = \sum a_{n2} a_n$$

$$\begin{aligned} \text{avec } a_{n1} &= y_{n1} - y_{n3} \\ a_{n2} &= y_{n2} - y_{n3} \\ a_n &= y_{ni} - y_{n3} \end{aligned}$$

Ce système permet de déterminer les valeurs de s_1 et s_2 .

L'équation $s_3 = 1 - s_1 - s_2$ donne alors la valeur de s_3 .

L'élaboration purement mathématique de cette méthode aboutit donc à un système de x équations pour x calibres utilisés. Si de nombreux calibres doivent être combinés, le travail de calcul augmente énormément et l'utilisation de l'outil informatique est donc recommandée.

4.2.2. EXEMPLE DE CALCUL

Soit à calculer la composition d'un béton o/32 pour autoroute, les granulométries des matériaux et du squelette inerte du béton de référence sont données au tableau 17. Les exigences en matière de teneur en ciment et de E/C sont (voir tableau 1) :

- teneur en ciment = 400 kg/m³;
- E/C = 0,45 soit teneur en eau efficace = 180 kg/m³;
- il n'y a pas d'air entraîné.

Comme suite au raisonnement développé en 4.2.1., le système d'équations à résoudre est :

$$\begin{aligned}
 s_1 + s_2 + s_3 + s_4 &= 1 \\
 s_1 \sum a_{n1} a_{n1} + s_2 \sum a_{n1} a_{n2} + s_3 \sum a_{n1} a_{n3} &= \sum a_{n1} a_n \\
 s_1 \sum a_{n1} a_{n2} + s_2 \sum a_{n2} a_{n2} + s_3 \sum a_{n2} a_{n3} &= \sum a_{n2} a_n \\
 s_1 \sum a_{n1} a_{n3} + s_2 \sum a_{n1} a_{n3} + s_3 \sum a_{n3} a_{n3} &= \sum a_{n3} a_n
 \end{aligned}$$

avec

$$\begin{aligned}
 a_{n1} &= y_{n1} - y_{n4} \\
 a_{n2} &= y_{n2} - y_{n4} \\
 a_{n4} &= y_{n3} - y_{n4} \\
 a_n &= y_{ni} - y_{n4}
 \end{aligned}$$

s_1, s_2, s_3 et s_4 étant respectivement les dosages en volume du sable 0/2, du gravillon de grès 2/6, du grès 6/20 et du grès 20/32.

Le calcul des a_{n1}, a_{n2}, a_{n3} et a_n ainsi que les calculs de la somme de leurs produits sont donnés au tableau 18.

TABLEAU 17 - COURBES GRANULOMÉTRIQUES DES MATÉRIAUX ET DU SQUELETTE INERTE IDÉAL DU BÉTON						
Tamis (mm)	Sable 0/2 % passant	Grès 2/6 % passant	Grès 6/20 % passant	Grès 20/32 % passant	Béton idéal % passant	
0,080	1,1	0,7	0,6	0,8	0,0	
0,100	1,2	0,7	0,6	0,8	0,5	
0,125	1,4	0,7	0,6	0,8	1,0	
0,160	2,3	0,7	0,6	0,8	2,0	
0,200	4,1	0,7	0,6	0,8	2,5	
0,250	8,3	0,7	0,6	0,8	5,0	
0,315	18,3	0,7	0,6	0,8	7,5	
0,400	33,4	0,7	0,6	0,8	10,0	
0,500	45,9	0,7	0,6	0,8	13,0	
0,63	62,8	0,7	0,6	0,8	17,5	
0,8	73,1	0,7	0,6	0,8	20,0	
1	80,2	0,7	0,6	0,8	21,5	
1,25	85,5	0,7	0,6	0,8	23,0	
1,60	89,6	0,8	0,6	0,8	24,0	
2	92,0	1,2	0,6	0,8	26,0	
2,5	94,2	3,3	0,6	0,8	27,5	
3,15	96,3	12,4	0,7	0,8	30,0	
4	98,2	34,9	0,7	0,8	34,0	
5	99,6	51,1	0,9	0,8	38,0	
6,3	100,0	82,5	1,2	0,8	42,0	
8	100,0	99,5	6,5	0,8	50,0	
10	100,0	99,9	26,6	0,8	57,0	
12,5	100,0	100,0	59,0	0,9	65,0	
16	100,0	100,0	94,0	4,1	72,5	
20	100,0	100,0	100,0	27,7	80,5	
25	100,0	100,0	100,0	84,6	87,0	
28	100,0	100,0	100,0	95,0	90,0	
32	100,0	100,0	100,0	99,6	95,0	
40	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

TABLEAU 18 – CALCUL DES a_{n1} , a_{n2} , a_{n3} ET a_n ET DE LA SOMME DE LEURS PRODUITS

($a_{n1} = y_{n1} - y_{n4}$, $a_{n2} = y_{n2} - y_{n4}$, $a_{n3} = y_{n3} - y_{n4}$ et $a_n = y_{ni} - y_{n4}$)

Tamis (mm)	a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}	a_n	$a_{n1} \cdot a_{n1}$	$a_{n1} \cdot a_{n2}$	$a_{n1} \cdot a_{n3}$	$a_{n2} \cdot a_{n2}$	$a_{n2} \cdot a_{n3}$	$a_{n3} \cdot a_{n3}$	$a_n \cdot a_{n1}$	$a_n \cdot a_{n2}$	$a_n \cdot a_{n3}$
0,080	0,3	-0,1	-0,2	-0,8	0,09	-0,03	-0,06	0,01	0,02	0,04	-0,24	0,08	0,16
0,100	0,4	-0,1	-0,2	-0,3	0,16	-0,04	-0,08	0,01	0,02	0,04	-0,12	0,03	0,06
0,125	0,6	-0,1	-0,2	0,2	0,36	-0,06	-0,12	0,01	0,02	0,04	0,12	-0,02	-0,04
0,160	1,5	-0,1	-0,2	1,2	2,25	-0,15	-0,3	0,01	0,02	0,04	1,8	-0,12	-0,24
0,200	3,3	-0,1	-0,2	1,7	10,89	-0,33	-0,66	0,01	0,02	0,04	5,61	-0,17	-0,34
0,250	7,5	-0,1	-0,2	4,2	56,25	-0,75	-1,5	0,01	0,02	0,04	31,5	-0,42	-0,84
0,315	17,5	-0,1	-0,2	6,7	306,25	-1,75	-3,5	0,01	0,02	0,04	117,25	-0,67	-1,34
0,400	32,6	-0,1	-0,2	9,2	1062,76	-3,26	-6,52	0,01	0,02	0,04	299,92	-0,92	-1,84
0,500	45,1	-0,1	-0,2	12,2	2034,01	-4,51	-9,02	0,01	0,02	0,04	550,22	-1,22	-2,44
0,63	62	-0,1	-0,2	16,7	3844	-6,2	-12,4	0,01	0,02	0,04	1035,4	-1,67	-3,34
0,8	72,3	-0,1	-0,2	19,2	5227,29	-7,23	-14,46	0,01	0,02	0,04	1388,16	-1,92	-3,84
1	79,4	-0,1	-0,2	20,7	6304,36	-7,94	-15,88	0,01	0,02	0,04	1643,58	-2,07	-4,14
1,25	84,7	-0,1	-0,2	22,2	7174,09	-8,47	-16,94	0,01	0,02	0,04	1880,34	-2,22	-4,44
1,60	88,8	0	-0,2	23,2	7885,44	0	-17,76	0	0	0,04	2060,16	0	-4,64
2	91,2	0,4	-0,2	25,2	8317,44	36,48	-18,24	0,16	-0,08	0,04	2298,24	10,08	-5,04
2,5	93,4	2,5	-0,2	26,7	8723,56	233,5	-18,68	6,25	-0,5	0,04	2493,78	66,75	-5,34
3,15	95,5	11,6	-0,1	29,2	9120,25	1107,8	-9,55	134,56	-1,16	0,01	2788,6	338,72	-2,92
4	97,4	34,1	-0,1	33,2	9486,76	3321,34	-9,74	1162,81	-3,41	0,01	3233,68	1132,12	-3,32
5	98,8	50,3	0,1	37,2	9761,44	4969,64	9,88	2530,09	5,03	0,01	3675,36	1871,16	3,72
6,3	99,2	81,7	0,4	41,2	9840,64	8104,64	39,68	6674,89	32,68	0,16	4087,04	3366,04	16,48
8	99,2	98,7	5,7	49,2	9840,64	9791,04	565,44	9741,69	562,59	32,49	4880,64	4856,04	280,44
10	99,2	99,1	25,8	56,2	9840,64	9830,72	2559,36	9820,81	2556,78	665,64	5575,04	5569,42	1449,96
12,5	99,1	99,1	58,1	64,1	9820,81	9820,81	5757,71	9820,81	5757,71	3375,61	6352,31	6352,31	3724,21
16	95,9	95,9	89,9	68,4	9196,81	9196,81	8621,41	9196,81	8621,41	8082,01	6559,56	6559,56	6149,16
20	72,3	72,3	72,3	52,8	5227,29	5227,29	5227,29	5227,29	5227,29	5227,29	3817,44	3817,44	3817,44
25	15,4	15,4	15,4	2,4	237,16	237,16	237,16	237,16	237,16	237,16	36,96	36,96	36,96
28	5	5	5	-5	25	25	25	25	25	25	-25	-25	-25
32	0,4	0,4	0,4	-4,6	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	-1,84	-1,84	-1,84
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sommes	1558	665,2	269,7	612,5	133346,8	61861,67	22887,68	54578,62	23020,9	17646,2	54785,5	33938,5	15407,7

Le système de 4 équations à 4 inconnues donne ainsi, les solutions suivantes :

s_1 = % de sable 0/2 = 27,1 %
 s_2 = % de gravillons 2/6 = 21,1 %
 s_3 = % de gravillons 6/20 = 24,7 %
 s_4 = % de gravillons 20/32 = 27,1 %

Le tableau 19 et la figure 39 donnent la courbe granulométrique du béton calculé.

TABLEAU 19 - SQUELETTE INERTE CALCULÉ

Tamis (mm)	Béton calculé (%)	
	Refus	Passant
0,080	99,2	0,8
0,100	99,2	0,8
0,125	99,1	0,9
0,160	98,9	1,1
0,200	98,4	1,6
0,250	97,2	2,8
0,315	94,5	5,5
0,400	90,4	9,6
0,500	87,0	13,0
0,63	82,5	17,5
0,8	79,7	20,3
1	77,8	22,2
1,25	76,3	23,7
1,60	75,2	24,8
2	74,4	25,6
2,5	73,4	26,6
3,15	70,9	29,1
4	65,6	34,4
5	61,8	38,2
6,3	55,0	45,0
8	50,1	49,9
10	45,0	55,0
12,5	37,0	63,0
16	27,5	72,5
20	19,6	80,4
25	4,2	95,8
28	1,4	98,6
32	0,1	99,9
40	0,0	100,0

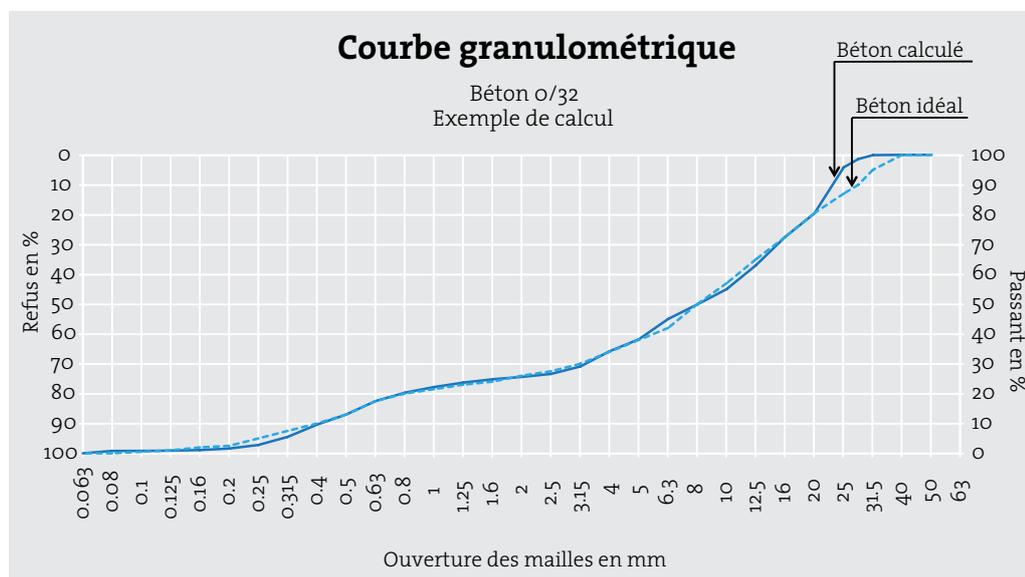


Figure 39 - Squelettes inertes idéal et calculé

Au départ des différents dosages calculés, la composition en l/m³ peut être calculée ; ensuite en multipliant les volumes absolus occupés par les différents composants du béton par leurs masses volumiques réelles, la composition en kg/m³ est obtenue.

	Volume total	=	1000 l/m ³	
-	Air occlus	=	10 l/m ³ (valeur estimée = 1%, béton sans air entraîné)	
-	Volume ciment = 400 kg/m ³ : 2,95	=	136 l/m ³	
-	Eau efficace	=	180 l/m ³ (E/C = 0,45 au maximum)	
=	Volume des inertes	=	674 l/m ³	
→	quantité de sable 0/2 :	0,271 . 674 = 183 l/m ³ . 2,65 =	485 kg/m ³	
	quantité de gravillons 2/6 :	0,211 . 674 = 142 l/m ³ . 2,69 =	382 kg/m ³	
	quantité de gravillons 6/20 :	0,247 . 674 = 166 l/m ³ . 2,69 =	447 kg/m ³	
	quantité de gravillons 20/32 :	0,271 . 674 = 183 l/m ³ . 2,69 =	492 kg/m ³	

A ces dosages, 10 l d'eau d'absorption par les granulats seront encore ajoutés ainsi qu'un plastifiant afin d'obtenir l'ouvrabilité souhaitée.

A noter qu'il y a également lieu de vérifier la demande en eau de mouillage des constituants. Cette vérification se fait selon les données du chapitre 1.2. Ces calculs conduisent à une teneur en eau proche de 160 – 165 l/m³ en fonction des hypothèses. Il y a donc moyen d'améliorer considérablement la qualité de la pâte de ciment. La composition du béton devient donc :

	volume total	=	1000 l/m ³	
-	air occlus	=	10 l/m ³ (valeur estimée = 1%, béton sans air entraîné)	
-	volume ciment = 400 kg/m ³ : 2,95	=	136 l/m ³	
-	eau efficace	=	165 l/m ³	
=	volume des inertes	=	689 l/m ³	
→	quantité de sable 0/2 :	0,271 . 689 = 187 l/m ³ . 2,65 =	496 kg/m ³	
	quantité de gravillons 2/6 :	0,211 . 689 = 145 l/m ³ . 2,69 =	390 kg/m ³	
	quantité de gravillons 6/20 :	0,247 . 689 = 170 l/m ³ . 2,69 =	457 kg/m ³	
	quantité de gravillons 20/32 :	0,271 . 689 = 187 l/m ³ . 2,69 =	503 kg/m ³	
	quantité de ciment :		400 kg/m ³	
	quantité d'eau : 165 l d'eau efficace + 10 l d'eau d'absorption =		175 l/m ³	
	total :		2421 kg/m ³	

La masse volumique humide obtenue par calcul (masse volumique théorique) de ce béton est donc de 2421 kg/m³. Cette valeur doit être comparée à la masse volumique humide réelle du béton obtenue par mesure après fabrication d'un mélange selon les directives de la norme NBN EN 12350-6.

Le rendement R de la composition peut alors être calculé :

$$R = \frac{MVH_{\text{théorique}}}{MVH_{\text{pratique}}} \times 1000$$

Si celui-ci est différent de 1000 l, les quantités des différents composants peuvent être corrigées en les divisant par la valeur du rendement obtenu. Les proportions respectives des constituants restent identiques, mais les quantités exactes par unité de volume sont calculées. La composition effective sera obtenue en divisant les masses individuelles par R.

Ainsi, si après mesure de la masse volumique, nous obtenons 2400 kg/m^3 , le rendement R de la composition est égal à :

$$R = \frac{2421}{2400} \times 1000 = 1009 \text{ l}$$

Les quantités corrigées des différents composants seront donc :

- quantité de sable 0/2 : $496 : 1009 \cdot 1000 = 492 \text{ kg/m}^3$
- quantité de gravillons 2/6 : $390 : 1009 \cdot 1000 = 387 \text{ kg/m}^3$
- quantité de gravillons 6/20 : $457 : 1009 \cdot 1000 = 453 \text{ kg/m}^3$
- quantité de gravillons 20/32 : $503 : 1009 \cdot 1000 = 499 \text{ kg/m}^3$

Théoriquement, les quantités de ciment et d'eau doivent également être corrigées mais afin de ne pas diminuer ou augmenter ces dosages, il peut être décidé de les maintenir tels quels.

5. QUELQUES APPLICATIONS SPÉCIALES DE BÉTONS ROUTIERS

A coté des différents bétons décrits au chapitre 4, il existe encore d'autres types de bétons routiers ou d'autres types d'applications. Nous pensons entre autre aux bétons colorés lavés, aux bétons imprimés, aux bétons de réparations rapides, aux bétons faisant l'usage de granulats recyclés et aux bétons secs compactés.

5.1. LES BÉTONS COLORÉS LAVÉS

Ces dernières années, un effort important a été consacré à la rénovation des espaces publics. Afin de réaliser au mieux leur intégration, l'aspect du revêtement joue un rôle important. Une technique, souvent utilisée en combinaison avec des pavages ou des dallages en pierre naturelle ou en béton, est le béton coloré lavé aussi appelé béton coloré

désactivé. Il consiste à utiliser des granulats colorés et éventuellement un pigment dans le revêtement en béton. La mise en œuvre du béton est réalisée soit en une couche, soit en deux couches frais sur frais à la machine à coffrages glissants ou manuellement entre coffrages fixes à l'aide d'une poutre vibrante et d'aiguilles vibrantes. La surface du béton est traitée par dénudage, de manière à mettre en valeur les granulats du béton.



Figure 40 - Revêtement avec divers bétons colorés pour un logement social à Grivegnée (Cité Demoitelle)

En matière de composition de béton, toutes les recommandations des chapitres précédents sont d'application. Étant donné que la technique de traitement de surface a pour but de mettre en valeur les granulats, leur choix est déterminant pour l'aspect recherché. Ils seront choisis en fonction de leur couleur car c'est cette dernière qui donnera au revêtement sa tonalité, sa chaleur, son aspect.

Le béton lavé s'accommode d'une grande variété de granulats pour autant que ceux-ci répondent à divers critères techniques concernant essentiellement la granularité, la forme, la propreté, la dureté et la résistance au gel. Les prescriptions relatives aux granulats sont d'application en fonction des classes de trafic auxquelles ils sont soumis (voir chapitre 2 pour plus de détail). Suivant le type d'usage, le choix se portera sur des gravillons concassés, semi-concassés ou roulés ainsi qu'éventuellement des gravillons résistant au polissage ($PSV \geq 50$).

Il faut toutefois noter que certains granulats colorés sont assez onéreux et peuvent donc grever le coût du revêtement en béton. En effet, il ne faut pas perdre de vue qu'un mètre cube de béton de revêtement possède une teneur en gravillons comprise entre 1100 et 1350 kg. Afin de remédier à ce problème, il est possible de fabriquer un béton 0/20

caractérisé par des propriétés ségrégeantes lors de la mise en œuvre et une faible granulométrie de surface. Le tableau 20 donne un exemple de composition et la figure 41, la courbe granulométrique du squelette inerte de ce béton. Cet exemple concerne un béton à base de quartz blanc 2/5 et 5/8 et d'un gravillon porphyre traditionnel 14/20. Le quartz blanc est le granulat coûteux, celui-ci a pu être remplacé par une grande partie de gravillons traditionnels de porphyre et ce tout en gardant une granulométrie fine en surface. En effet, il peut être remarqué sur la photo que la surface du béton présente un aspect avec de nombreux gravillons blancs (quartz) alors que de nombreux grains de porphyre se marquent dans la masse.

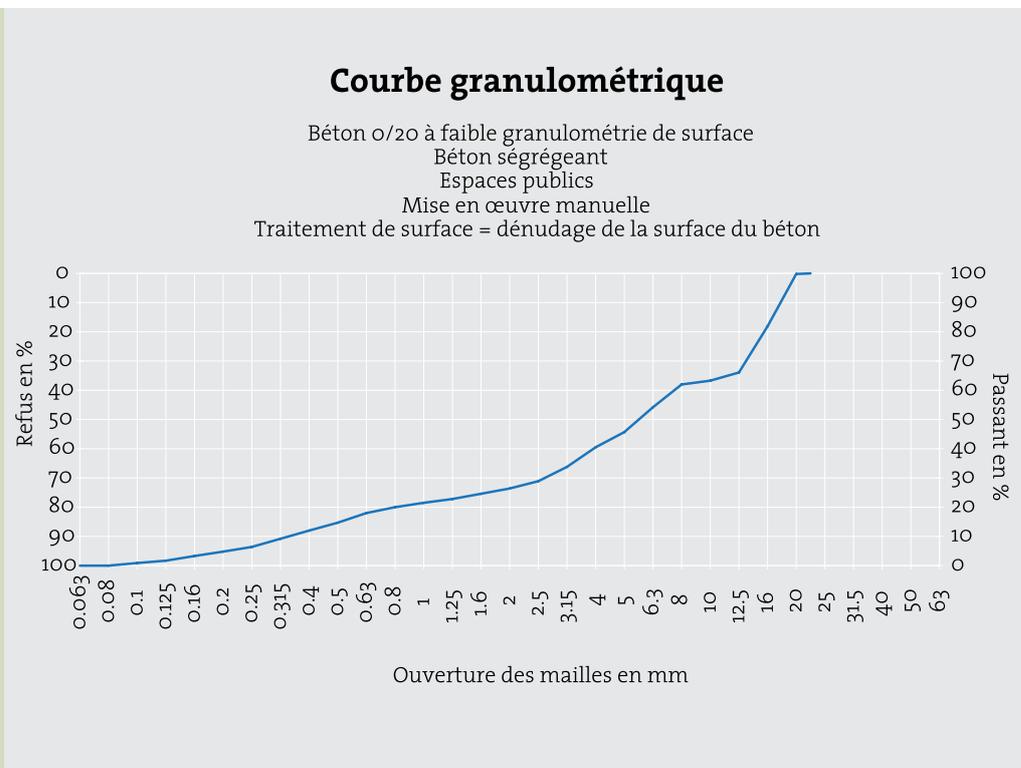
Ce béton est caractérisé par un squelette inerte discontinu : les grains dont la granulométrie est comprise entre 8 et 12 mm étant totalement absents. De plus, le rapport entre la fraction gravillons (supérieure à 2 mm) et la fraction sable (0/2) est assez important de manière à obtenir après désactivation une surface de béton présentant un maximum de gravillons. Par conséquent, ce béton ne peut pas être mis en œuvre à la machine à coffrages glissants et est réservé à des applications manuelles avec compactage du béton à l'aiguille vibrante.

TABLEAU 20 – EXEMPLE DE COMPOSITION D'UN BÉTON SÉGRÉGEANT (BÉTON 0/20 À FAIBLE GRANULOMÉTRIE DE SURFACE)

Concassé porphyre 14/20 :	660 kg/m ³
Concassé quartz 5/8 :	260 kg/m ³
Concassé quartz 2/5 :	260 kg/m ³
Sable de rivière 0/2 :	560 kg/m ³
Ciment CEM III/A 42,5 N LA :	400 kg/m ³
Eau totale :	180 l/m ³
Plastifiant et entraîneur d'air	
Total :	≅ 2320 kg/m ³



Figure 41 – Courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/20 ségrégeant



Les bétons colorés lavés sont, aujourd’hui, de plus en plus utilisés dans des aménagements piétonniers (trottoirs, chemins dans des parcs, ...) où un aspect « serré » au niveau des gravillons, en surface du revêtement, est recherché. Des gravillons de taille moyenne (D_{max} de 12 à 16 mm) sont généralement choisis. Ces bétons sont caractérisés par un squelette inerte discontinu, la fraction 2/6 étant totalement absente et le rapport entre la fraction gravillons (≥ 6 mm) et la fraction sable (0/2) est assez important (rapport gravillons/sable de l’ordre de 2) de manière à obtenir après désactivation, une surface de béton présentant un maximum de gravillons.

Il s’agit également, dans ce cas, de bétons mis en œuvre manuellement mais, contrairement au cas précédent, ils ne sont pas vibrés de manière à garder un maximum de gravillons en surface. Cette absence de vibration n’est pas gênante étant donné que ces revêtements sont généralement posés sur une épaisseur de l’ordre de 15 cm et qu’ils ne supportent aucune charge. Ces bétons sont réglés manuellement entre calepinage, tirés à la règle sans

vibration et ensuite lissés en surface. Pour faciliter la mise en œuvre, ils doivent avoir une consistance de classe S3 (affaissement au cône entre 100 et 150 mm). Il y a donc nécessité d’incorporer dans le béton un plastifiant voire un superplastifiant. Pour empêcher le produit désactivant de pénétrer dans le béton, il est absolument nécessaire d’avoir une surface lisse bien fermée. Un soin particulier doit donc être apporté au moment du lissage. La figure 42 donne la courbe granulométrique de référence pour un béton 0/12 et la figure 43, un aspect-type qui peut être obtenu.

Courbe granulométrique

Béton 0/12 coloré
Aménagements piétonniers
Mise en œuvre manuelle
Traitement de surface = dénudage de la surface du béton

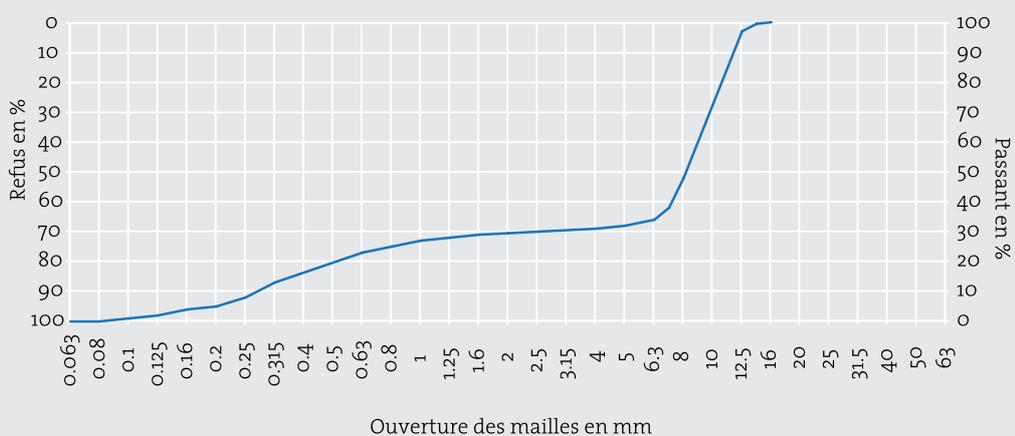


Figure 42 – Courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/12 pour aménagements piétonniers

Figure 43 – Aspect d'un béton 0/12 désactivé pour aménagements piétonniers



5.2. LES BÉTONS IMPRIMÉS

La technique du béton imprimé vise à conférer à la surface du revêtement l'aspect d'un pavage en pierre naturelle ou en béton. Elle consiste à épandre à la surface du béton frais une poudre colorante et durcissante, et à imprimer ensuite le béton au moyen de moules adéquats qui lui confèrent le motif souhaité. Cette technique est utilisée principalement en milieu urbain, et est réservée à des applications particulières, telles que les passages pour piétons, les giratoires, les dispositifs surélevés de voirie, les arrêts d'autobus,...

En matière de composition, les exigences propres aux bétons routiers doivent être respectées (teneur en ciment, rapport E/C, teneur en air, qualité des sables et des gravillons, ...). Ces bétons sont rarement mis en œuvre à la machine à coffrages glissants car dans ce cas, le béton est trop consistant et sa teneur en mortier est trop faible. L'impression du béton est alors difficile. Il s'agit donc de béton 0/20 compacté, dans la plus part des cas, à l'aide d'aiguilles vibrantes et d'une poutre vibrante. La teneur en sable (fraction 0/2) est légèrement plus élevée que celle d'un béton routier 0/20 classique tel que décrit au paragraphe 4.1.2. Elle sera de 35 à maximum 40 % de la totalité du squelette inerte du béton.



Figure 44 – Compactage d'un béton destiné à être imprimé



- | |
|---|
| 1 |
| 2 |
| 3 |
| 4 |

Figure 45 – Exemples de revêtements en béton imprimé
1 & 2 – Arrêt de bus à Tournai
3 – Place de l'Europe à Bruxelles
4 – Parvis Sainte Anne à Bruxelles

5.3. LES BÉTONS DE RÉPARATION DE REVÊTEMENTS ROUTIERS

Seules les réparations où le revêtement est remplacé sur toute son épaisseur sont traitées ici (réparation partielle d'une dalle, renouvellement d'une ou de plusieurs dalles, réparation d'un revêtement en béton armé continu). Le béton de remplacement doit répondre à une ou plusieurs des conditions suivantes :

- le béton doit être fabriqué avec des matériaux qui répondent aux exigences des bétons de routes et qui permettent d'obtenir un aspect aussi proche que possible de celui de la chaussée à réparer ;
- le béton doit être très ouvrable et le rester suffisamment longtemps pour pouvoir être mis en œuvre dans des conditions difficiles, avec des équipements de serrage limités ;
- l'interruption de la circulation doit être réduite au minimum sur des tronçons de routes supportant un trafic intense ; le durcissement rapide du béton est donc un critère important. A cet égard, il est généralement admis que la circulation peut être rétablie quand la résistance à la compression sur carottes est supérieure à 40 N/mm^2 . La résistance à la compression correspondante sur cube de 15 cm sous polystyrène expansé est de 35 N/mm^2 ;
- la résistance finale à la compression à 90 jours doit en outre répondre aux clauses du cahier des charges type d'application.

5.3.1. COMPOSITION DU BÉTON POUR DES RÉPARATIONS OÙ LA DURÉE D'INTERRUPTION DU TRAFIC N'EST PAS IMPORTANTE

Lorsque la durée d'interruption du trafic de la section réparée n'est pas une donnée importante du projet, la composition du béton de réparation choisie restera alors une composition « classique » répondant aux différents critères mentionnés dans les chapitres précédents en fonction du type de revêtement concerné.

Pour des travaux de réparation de petite taille, où l'on ne dispose que d'un équipement de serrage limité (aiguilles vibrantes et poutre vibrante), un superplastifiant sera utilisé afin d'augmenter considérablement l'ouvrabilité du béton tout en respectant les teneurs en eau voulues. Ainsi, et moyennant un béton de granulométrie parfaitement étudiée, un béton conférant à la réparation une bonne durabilité sera obtenu.

5.3.2. COMPOSITION DU BÉTON PERMETTANT DE N'INTERROMPRE LE TRAFIC QUE PENDANT UNE TRÈS COURTE DURÉE : LES BÉTONS À DURCISSEMENT RAPIDE

Le recours à des bétons spéciaux a permis, tant en Belgique qu'à l'étranger d'obtenir des résistances satisfaisantes pour la réouverture au trafic 3 jours, 2 jours voire 24 heures après la mise en place du nouveau revêtement. Cette technique est mieux connue sous son appellation internationale « (ultra) fast-track concrete paving ». Elle sera utilisée lors des travaux de réfection de routes en béton à grand trafic afin de limiter au maximum les entraves à la circulation et de manière générale pour toutes les petites réparations de revêtements en béton armé continu. En effet, dans ce dernier cas, l'utilisation d'un béton qui présente rapidement des résistances mécaniques élevées est importante. Il faut en effet que, lors de la première contraction du matériau qui suit le bétonnage (c'est-à-dire lors du premier refroidissement pendant la nuit suivant le bétonnage), les résistances à la traction du béton soient suffisantes pour reprendre les contraintes de traction horizontales. Il est admis que celles-ci sont suffisantes si la résistance à la compression du béton à 10-12 h d'âge est d'environ 20 N/mm².

Outre l'utilisation d'un béton à durcissement rapide, l'obtention à très court terme (10-12 h d'âge) de résistances mécaniques élevées sera favorisée en bétonnant le matin (idéalement vers 10-11 h) et en isolant le béton, immédiatement après la mise en œuvre, au moyen d'un matelas de polystyrène expansé de minimum 5 cm d'épaisseur (figure 46).

La teneur en ciment de ces bétons varie entre 425 et 450 kg/m³. Pour les réparations ultra-rapides, il y a lieu d'utiliser un ciment Portland (CEM I 52,5 N ou R LA ou CEM I 42,5 N ou R LA). Si on vise un durcissement de 72 heures, il est également possible d'utiliser un ciment de haut fourneau (CEM III/A 42,5 N LA) en mélange avec 20 à 25 % de ciment CEM I 42,5 ou 52,5 N ou R. Cette limitation de la quantité de ciment Portland est nécessaire afin de maintenir la teneur en alcalis dans les limites imposées. L'utilisation du ciment CEM III/A 42,5 N LA permet d'obtenir un béton plus ouvrable et donc plus facile à mettre en œuvre.

La granulométrie du béton sera continue, seules les fractions 2/6 et 6/20 des gravillons concassés seront utilisées. La fraction 20/32 est généralement absente afin de faciliter (ne pas alourdir) la mise en place du béton. Ainsi, le squelette inerte du béton répondra à celui de la figure 26 relatif au béton 0/20 pour les routes régionales et communales (voir paragraphe 4.1.2.).

Le rapport E/C est déterminé en fonction du délai maximal de durcissement souhaité mais doit toujours être en-dessous de 0,40. Ce faible rapport E/C a non seulement un effet positif sur le développement de la résistance, mais aussi sur la durabilité et la sensibilité à la fissuration de ce béton malgré la teneur en ciment élevée. L'ajout d'une certaine quantité de superplastifiant est nécessaire pour maintenir le rapport E/C en-dessous de 0,40 et s'effectue, en général, partiellement en centrale à béton et partiellement sur chantier dans les camions malaxeurs. Un entraîneur d'air n'est jamais utilisé dans ces bétons vu leur impact sur les résistances mécaniques d'une part et la durabilité assurée par le faible rapport E/C d'autre part.

Il convient de signaler qu'avant un chantier, il est toujours nécessaire de prévoir des essais d'orientation de manière à bien fixer les paramètres de la composition du béton permettant d'atteindre les résistances souhaitées à la température attendue. Le tableau 21 ci-après reprend des recommandations quant à la composition du béton en fonction de la température ambiante et pour des délais de restitution du revêtement au trafic de 36 et 72 heures. Des exemples de résultats obtenus sur chantier sont donnés ci-après.



Figure 46 – Afin d'accélérer le développement des résistances mécaniques à court terme, le béton de réparation est, après sa mise en œuvre, immédiatement protégé contre la dessiccation par la pulvérisation d'un produit de cure et ensuite isolé au moyen d'un matelas de polystyrène expansé de minimum 5 cm d'épaisseur

TABLEAU 21 – RECOMMANDATIONS POUR LA COMPOSITION DES BÉTONS À DURCISSEMENT RAPIDE

Délai de restitution au trafic	Température ambiante	Type de liant		
		CEM I LA 42,5 ou 52,5 N ou R	Mélange CEM III/A 42,5 N LA + 20 à 25% CEM I 42,5 R ou 52,5 R	CEM III/A 42,5 N LA
36 heures	≤ 15°C	450 kg/m ³	non recommandé	non recommandé
	> 15°C	425 kg/m ³	450 kg/m ³	non recommandé
72 heures	≤ 15°C	425 kg/m ³	450 kg/m ³	non recommandé
	> 15°C	425 kg/m ³	de 425 à 450 kg/m ³	450 kg/m ³

- Remarques :
- 450 kg/m³ de ciment est un maximum
 - dans le cas d'un mélange de ciment, soit le ciment CEM I est du type LA, soit la teneur en Na₂O éq. du mélange CEM III/A – CEM I est ≤ à 0,90 % et la teneur en laitier du mélange est supérieure à 36 %
 - le rapport E/C des bétons est toujours ≤ à 0,40

Figure 47 – Les bétons à durcissement rapide sont caractérisés par une forte cohésion de par la grande quantité de ciment en combinaison avec une faible teneur en eau (rapport E/C \leq 0,40) et l'utilisation d'un superplastifiant. Contrairement à ces photos, ces bétons nécessitent donc des moyens de mise en œuvre importants (une pelle mécanique afin de pouvoir répartir rapidement le béton, une aiguille vibrante par mètre de largeur à bétonner, une poutre vibrante puissante et de dimension supérieure à la largeur à bétonner)



Exemple n° 1 : N2 à Veltem

Réparation d'un revêtement en dalles de béton goujonnées en octobre 2005

Composition du béton

- Gravillons concassé porphyre, $D_{\max} = 20\text{mm}$;
- Ciment : 450 kg/m^3 de CEM I 52,5 R LA.

Mise en œuvre du béton

- Mise en place à la machine à coffrages glissants ;
- Traitement de surface : brossé ;
- Isolation d'une section en surface afin de favoriser le développement des résistances mécaniques et non isolation d'une autre section (il s'agissait, en fait, d'une section expérimentale).

Caractéristiques du béton

- Slump = 25 mm ;
- Vébé = $5,0\text{ s}$
- Masse volumique du béton = 2395 kg/m^3 ;
- Teneur en eau totale = 193 l/m^3 ;
- Evolution de la température par thermocouples incorporés : figure 48 ;
- Evolution des résistances à la compression : tableau 22.

Une résistance à la compression sur carotte supérieure à 40 N/mm^2 est obtenue après 24 heures d'âge. La chaussée a donc pu être réouverte rapidement à la circulation.

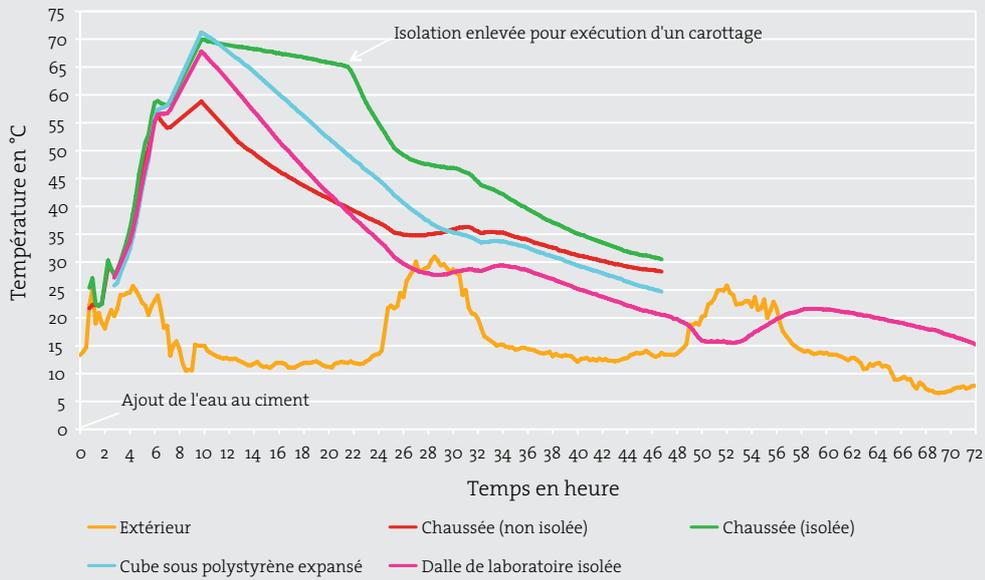


Figure 48 - Evolution de la température du béton par thermocouples incorporés

TABLEAU 22 - EVOLUTION DE LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION SUR CUBES DE 15 CM DE CÔTÉ, MOULES EN POLYSTYRÈNE EXPANSÉ ET SUR CAROTTES DE 100 CM² DE SECTION ET 10 CM DE HAUTEUR

Age du béton	Résistance à la compression (N/mm ²)			
	Cubes de 15 cm de côté sous polystyrène expansé	forées dans une dalle de laboratoire isolée	forées dans la chaussée (section non isolée)	forées dans la chaussée (section isolée)
24 heures	38,0	41,5	47,5	47,9
30 heures	39,7	42,0	/	/
7 jours	44,5	45,9	/	/
28 jours	52,0	58,8	/	/

Exemple n° 2 : Autoroute E40 Bruxelles-Liège à Waremme

Réparation d'un revêtement en béton armé continu en juillet 2006

Composition du béton

- Gravillons concassé de rivière, $D_{\max} = 20\text{ mm}$;
- Ciment : mélange CEM III/A 42,5 N LA – CEM I 52,5 N; 425 kg/m^3

Mise en œuvre du béton

- Mise en place par aiguilles vibrantes et poutre vibrante;
- Traitement de surface : brossé;
- Isolation en surface afin de favoriser le développement des résistances mécaniques.

Caractéristiques du béton

- Slump = 45 mm ;
- Masse volumique du béton = 2370 kg/m^3 ;
- Teneur en eau totale = 207 l/m^3 ;
- Evolution de la température par thermocouples incorporés : figure 49 ;
- Evolution des résistances à la compression : tableau 23.

Il peut être remarqué qu'à 10-12 heures d'âge, les résistances à la compression sur cubes de 15 cm de côté sous polystyrène expansé atteignent des valeurs élevées ($\pm 20\text{ N/mm}^2$), ce qui est essentiel lors de la réparation d'un revêtement en béton armé continu. Il faut en effet que, lors de la première contraction du matériau (c'est-à-dire lors du premier refroidissement, la nuit suivant le bétonnage), les résistances mécaniques du béton armé soient suffisantes pour reprendre les contraintes de traction horizontales.

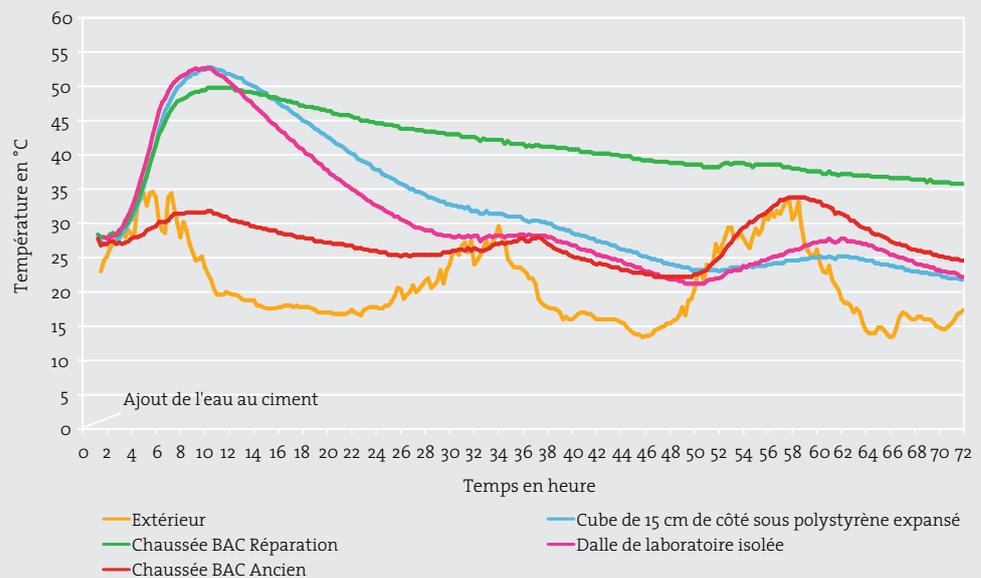


Figure 49 - Evolution de la température du béton par thermocouples incorporés

TABLEAU 23 - EVOLUTION DE LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION SUR CUBES DE 15 CM DE CÔTÉ, MOULES EN POLYSTYRÈNE EXPANSÉ ET SUR CAROTTES DE 100 CM² DE SECTION ET 10 CM DE HAUTEUR

Age du béton	Résistance à la compression (N/mm ²)	
	Cubes de 15 cm de côté sous polystyrène expansé	Carottes de 100 cm ² de section et de 10 cm de hauteur forées dans une dalle de laboratoire isolée
10 heures	19,4	/
14 heures	25,1	/
24 heures	35,0	37,4
4 jours	41,0	51,1
28 jours	56,2	64,3
91 jours	/	72,3

5.4. LES BÉTONS ROUTIERS À BASE DE GRANULATS DE BÉTON RECYCLÉS

Dans le contexte global de protection de l'environnement et de développement durable, le recyclage des matières et la valorisation des déchets doivent être encouragés. C'est ainsi que, peu à peu, des expériences d'utilisation de matières premières « secondaires » sont menées. Des revêtements en béton sont construits à partir d'un béton contenant une certaine proportion de concassés de débris de béton. Il peut s'agir de revêtements mis en œuvre par la technique dite du bicouche où, pour des questions de performances, seule la couche inférieure contiendra des granulats recyclés ou encore des revêtements de chaussées ne devant pas supporter un trafic intense (routes rurales, pistes cyclables,...).

Les recyclés de béton utilisés doivent, en principe, respecter les prescriptions relatives aux granulats naturels (voir chapitre 2) et, respecter, de plus, les prescriptions mentionnées aux tableaux 24 et 25. Il doit donc bien être question de granulats recyclés de béton et non de matériaux plus tendres comme des produits de démolition contenant des produits de maçonneries en terre cuite. Ainsi, pour la construction de chaussée en béton, le meilleur granulat recyclé à utiliser est un matériau provenant de la démolition sélective d'un ancien revêtement en béton.

En termes de teneur en eau du béton, afin de pouvoir maintenir un rapport E/C relativement faible, les sables recyclés et les gravillons de taille moyenne (gravillons 2/8 par exemple) ne doivent pas être utilisés. En effet, ceux-ci peuvent apporter beaucoup d'éléments fins de taille inférieure à 250 µm voire 63 µm et donc augmenter considérablement la demande en eau de mouillage du béton. De plus, ces sables sont concassés et non ronds.

TABLEAU 24 – RECOMMANDATIONS RELATIVES À LA COMPOSITION DES GRANULATS RECYCLÉS POUR BÉTONS ROUTIERS

Constituants	Gravillons de débris de béton	
	Prescription	Catégorie selon NBN EN 12620
Teneur en béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton (% en masse)	≥ 90	Rc ₉₀
Teneur en béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton et en granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques (% masse)	≥ 95	Rcu ₉₅
Teneur en éléments en argile cuite, en silicates de calcium ou en béton cellulaire (% en masse)	≤ 10	Rb ₁₀
Teneur en matériaux bitumineux (% en masse)	≤ 5	Ra ₅
Teneur en autres matériaux (% en masse)	≤ 0,5	XRg _{0,5}
Teneur en matériaux flottants (% en masse)	≤ 1	X ₁
Teneur en matériau flottant (cm ³ /kg)	≤ 0,2	FL _{0,2}

TABLEAU 25 – IMPOSITIONS RELATIVES AUX GRAVILLONS RECYCLÉS DESTINÉS AUX BÉTONS ROUTIERS

Caractéristique	Prescription	Catégorie selon NBN EN 12620	Remarque
Granulométrie (mm)	d ≥ 6	/	Les sables recyclés et les gravillons fins (2/8 par exemple) sont interdits car ils peuvent apporter beaucoup d'éléments fins (< 0,063 mm) et donc augmenter la demande en eau
	D ≥ 10		
Masse volumique réelle (kg/m ³)	≥ 2200	Valeur déclarée	/
Coefficient d'absorption d'eau	/	Valeur déclarée	Les coefficients d'absorption d'eau après 30 minutes et après 24 heures d'immersion doivent être donnés
Teneur en sulfates solubles dans l'eau (%)	≤ 0,2	SS _{0,2}	/
Teneur en soufre total (%)	≤ 1	S ₁	/



Figure 50 - En Belgique, une première importante application de béton à base de granulats recyclés pour la construction d'un revêtement routier a eu lieu en 2007-2008 lors du renouvellement d'une section de 3 km de la N49/E34 à hauteur de Zwijndrecht/Melsele. Il s'agit d'un revêtement bicouche en béton armé continu avec incorporation de granulats recyclés dans la couche inférieure. Dans ce cas, la totalité des gravillons 6/20 et 20/32 a été remplacée par des recyclés de béton 6/20 et 20/32 issus de la démolition sélective du revêtement existant ce qui correspond à un taux de recyclage d'environ 60 % de la totalité du squelette inerte du béton 0/32.

Lors de la mise au point de la composition et de la fabrication du béton, une attention particulière doit être apportée au fait que les concassés de béton présentent, généralement, une porosité beaucoup plus importante que les granulats naturels. Celle-ci aura donc, d'une part, une influence considérable sur la teneur en eau totale du béton et d'autre part, sur l'absorption d'eau par immersion de celui-ci. Néanmoins, il a été constaté que l'augmentation de l'absorption d'eau par immersion des bétons à base de gravillons de béton concassé n'a pas pour conséquence d'influencer négativement leur comportement au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.

L'utilisation de gravillons recyclés conduit également à une petite chute des résistances à la compression. Des études ont néanmoins montré que la résistance à la traction des bétons à base de granulats recyclés est beaucoup moins influencée que la résistance à la compression. Ceci peut s'expliquer par la très bonne adhérence entre le nouveau mortier durci et l'ancien béton de bonne qualité.

Des exemples de résultats sont donnés ci-après. Il s'agit d'une étude de laboratoire qui concerne la fabrication d'un béton routier 0/32 pour une voirie communale : jusqu'à 37% (quantité exprimée en volume de la totalité du squelette inerte du béton) de gravillons recyclés 2/20 ont été utilisés. Les quantités de gravillons sont calculées comme suit :

$$\frac{R}{100} (G_{20/32} + G_{6/20} + G_{2/6} + S_{0/4}) = Bc$$

Avec:

- R, la quantité de gravillons recyclés à introduire en % du volume total du squelette inerte du béton;
- $G_{20/32}$, la quantité de gravillons concassés de grès 20/32 du béton témoin en l/m^3 ;
- $G_{6/20}$, la quantité de gravillons concassés de grès 6/20 du béton témoin en l/m^3 ;
- $G_{2/6}$, la quantité de gravillons concassés de grès 2/6 du béton témoin en l/m^3 ;
- $S_{0/4}$, la quantité de sable de rivière 0/4 du béton témoin en l/m^3 ;
- Bc, la quantité de gravillons de béton concassé à introduire en l/m^3 .

La quantité de gravillons recyclés à peser est obtenue en multipliant Bc par 2,320 (masse volumique réelle du béton concassé).

Les quantités de concassés de grès remplacées par des gravillons recyclés sont calculées par les relations suivantes. A noter que seules les fractions 2/6 et 6/20 sont remplacées puisque le gravillon recyclé est lui-même un matériau dont la granulométrie s'étend de 2 à 20 mm.

$$\text{Quantité de grès 6/20 remplacée par des concassés de béton en } l/m^3 = G_{6/20} \cdot \frac{Bc}{G_{6/20} + G_{2/6}}$$

et :

$$\text{Quantité de grès 2/6 remplacée par des concassés de béton en } l/m^3 = G_{2/6} \cdot \frac{Bc}{G_{6/20} + G_{2/6}}$$



Figure 51 – Les produits issus de la démolition sélective de revêtements en béton sont recyclables. Le moteur économique mais aussi la pression environnementale plaident aujourd'hui pour une utilisation plus noble qu'uniquement en fondation

TABLEAU 26 – EXEMPLES DE COMPOSITION DE BÉTON ROUTIER 0/32 CONTENANT DES GRAVILLONS RECYCLÉS

Matériaux	Concassé de grès		Béton concassé				Sable de rivière			
	Masse volumique réelle : 2690 kg/m ³ Coefficient d'absorption d'eau par immersion après 24 heures : 0,8 %		Masse volumique réelle : 2320 kg/m ³ Coefficient d'absorption d'eau par immersion après 30 minutes : 5,8 % Coefficient d'absorption d'eau par immersion après 24 heures : 6,0 %				Masse volumique réelle : 2650 kg/m ³			
Composition	Témoin	20 % vol. de recyclés 6/20		26 % vol. de recyclés 2/20		29 % vol. de recyclés 2/20		37 % vol. de recyclés 2/20		
	enl/m ³	enkg/m ³	enl/m ³	enkg/m ³	enl/m ³	enkg/m ³	enl/m ³	enkg/m ³	enl/m ³	enkg/m ³
Concassé de grès 20/32	240	645	238	640	236	635	234	630	232	625
Concassé de grès 6/20	138	370	0	0	41	110	30	80	0	0
Concassé de grès 2/6	117	315	115	310	35	95	25	65	0	0
Béton concassé 2/20	-	-	-	-	179 (26%)	415	200 (29%)	465	255 (37%)	590
Béton concassé 6/20	-	-	138 (20%)	320	-	-	-	-	-	-
Sable de rivière 0/4	194	515	194	515	192	510	191	505	189	500
Ciment CEM III/A 42,5 N LA		375		375		375		375		375
Eau efficace		160		155		150		155		150
Eau absorbée par les granulats		10		20		25		25		35
Eau totale		170		175		175		180		185
Plastifiant		0,75		0,75		0,56		0,75		0,74
Entraîneur d'air		0,38		1,12		1,67		1,79		2,41
Total		2391		2337		2316		2302		2278
Consistance										
Slump (mm)	35		35		40		50		55	
Temps Vébé (s)	4,5		4,0		4,0		4,0		3,0	
Teneur en air (%-v)										
	3,3		3,3		3,0		3,5		3,4	
Résistance à la compression (N/mm²) sur carottes (S = 100 cm² - h = 10 cm)										
à 7 jours	47,6		39,8		43,7		37,3		33,2	
à 28 jours	64,1		55,4		58,2		50,0		47,3	
à 91 jours	69,5		63,6		61,7		55,3		53,8	
Absorption d'eau par immersion (%) sur tranche (S = 100 cm² - h = 4,5 cm)										
	5,9		6,8		7,0		7,7		7,6	
Pertes au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage (g/dm²) après 30 cycles										
	11,6		12,6		12,6		16,0		8,9	

Figure 52 – Voirie agricole en béton sec compacté à Diepenbeek



5.5. LES BÉTONS SECS COMPACTÉS

Outre l'usage en couche de fondation, les bétons secs compactés (BSC) peuvent aussi être employés comme revêtement routier, dans le cas de routes agricoles ou forestières par exemple. Il s'agit en fait d'hybrides entre les bétons maigres de fondation et les bétons riches de revêtement. En effet, les bétons secs compactés sont des bétons mis en place pratiquement de la même manière que les bétons maigres de fondation, mais ils possèdent une teneur en ciment supérieure (minimum 200 kg/m^3) et un calibre de granulat limité à 20 mm. Les résistances mécaniques obtenues sur ce genre de béton sont donc plus proches des bétons riches de revêtement que des bétons de fondation. De plus, ils offrent l'avantage déterminant d'une mise en service presque immédiate grâce à la stabilité de leur squelette granulaire après compactage.

La tendance générale consiste à limiter la dimension maximale des granulats à 20 mm et même parfois moins, avec le triple objectif d'éviter la ségrégation, de rendre le malaxage, la mise en œuvre et le compactage plus faciles, et d'améliorer l'uni de surface.

Les gravillons doivent être de préférence concassés avec une dimension maximale admise de 20 mm. Ils sont conformes aux impositions du tableau 11. Dans le cas de gravillons recyclés, ils sont, de plus, conformes aux tableaux 24 et 25. Toutefois, en ce qui concerne la granulométrie, la dimension minimale admise est égale à 2 mm ($d \geq 2 \text{ mm}$).

Les sables utilisés sont des sables naturels comme pour les bétons riches de revêtement. Les sables de concassage lavés peuvent, toutefois, très bien convenir. La teneur en fines des sables doit être limitée à maximum 10%. Les sables issus du recyclage de produits de démolition ne sont pas admis.

Les figures 53 et 54 reprennent les limites des fuseaux granulométriques recommandés, et ce pour deux dimensions maximales différentes du squelette inerte : respectivement 16 mm et 20 mm. Une courbe granulométrique proche de la courbe supérieure du fuseau correspond à un béton un peu plus ouvrable destiné à être mis en œuvre à la finisseuse. En cas de compactage intense au moyen de rouleaux vibrants ou à pneus, il faut préférer une composition dont la courbe granulométrique est plus proche de la courbe inférieure du fuseau.

Pour satisfaire aux exigences de résistance à la compression, la quantité de ciment est de minimum 200 ou 250 kg/m³ respectivement pour des bétons secs compactés de résistance à la compression moyenne de 20 N/mm² (BSC 20) et de 30 N/mm² (BSC 30) mesurées sur carottes de 100 cm² à 90 jours d'âge. Un ajout de cendres volantes est autorisé afin d'améliorer l'ouvrabilité et de diminuer le risque de fissuration. Cet ajout est limité à un maximum de 5 % de la masse sèche du squelette inerte. Il est, cependant, toujours nécessaire de prévoir des joints de retrait (non scellés), dont l'entre-distance est d'au maximum 5 voire 4 mètres.

TABLEAU 27 - RÉSISTANCES À LA COMPRESSION MINIMALES RECOMMANDÉES POUR LES BÉTONS SECS COMPACTÉS

Type de béton	BSC 20	BSC 30
Résistance à la compression moyenne minimum (N/mm ²)	20	30
Résistance à la compression individuelle minimum (N/mm ²)	15	25

Courbe granulométrique

Béton sec compacté 0/16

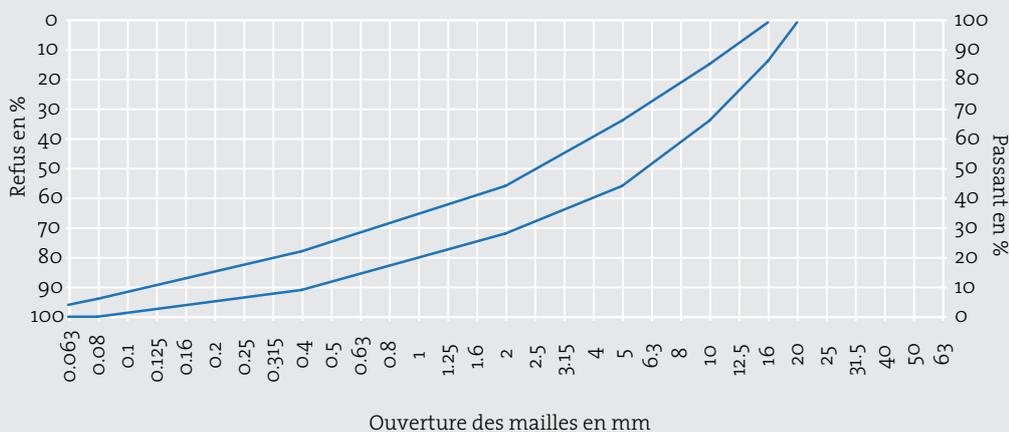
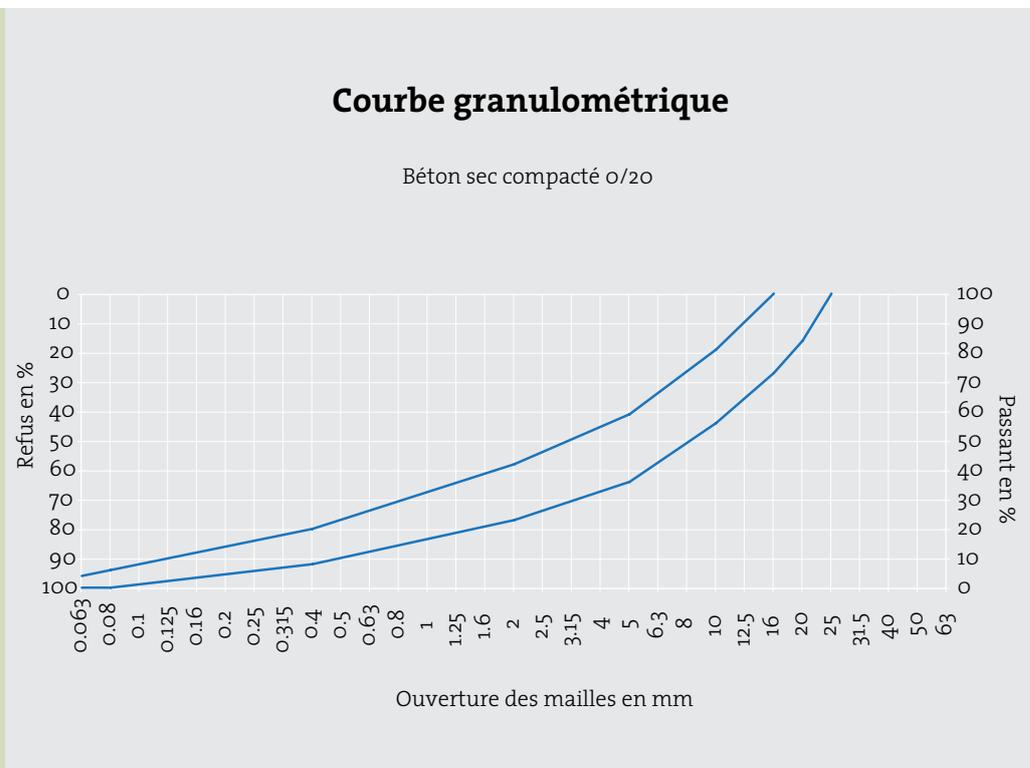


Figure 53 - Fuseau granulométrique du béton sec compacté 0/16

Figure 54 - Fuseau granulométrique du béton sec compacté 0/20



La teneur en eau idéale est déterminée à partir d'un essai Proctor modifié; elle est généralement comprise entre 4 et 7% de la masse des matériaux secs. Cette très faible teneur en eau permet d'obtenir des masses volumiques et des résistances à la compression très élevées à partir du moment où le béton est correctement mis en œuvre. Il doit être mis en œuvre en une seule couche à la niveleuse ou au finisseur. Il est conseillé d'utiliser du matériel permettant d'assurer un bon précompactage du mélange. Ainsi, des finisseurs munis d'un système à double dameur ou encore des machines à coffrages glissants munies de puissantes plaques vibrantes sont utilisées. Le compactage doit être intense de manière à atteindre une masse volumique sèche supérieure à 97% de l'optimum Proctor modifié. Il est recommandé d'utiliser un compacteur vibrant à jante lisse dont la charge linéaire est d'au moins 30 kg/cm en combinaison avec un rouleau à pneu d'une masse d'au moins 2,7 tonnes par pneu.

Le tableau 28 donne, à titre d'exemple, des résultats obtenus sur éprouvettes Proctor modifié. Il s'agit d'un béton à base de granulats calcaires dont le squelette inerte entre dans le fuseau 0/20 présenté ci-avant. Les résultats montrent bien qu'il est très important de maîtriser la teneur en eau, de manière à garantir des résistances élevées.

TABLEAU 28 – EXEMPLE DE COMPOSITIONS ET DE PERFORMANCES MÉCANIQUES DE BÉTONS SECS COMPACTÉS

Composition des bétons (kg/m³)						
Concassé calcaire 8/20		835			815	
Concassé calcaire 2/8		520			510	
Sable de concassage calcaire lavé 0/2		730			710	
Ciment CEM III/A 42,5 N LA		200			240	
Masse volumique sèche		2285			2275	
Essai Proctor modifié, compactage à différentes teneurs en eau	Eau (%)	MVS (kg/m ³)	R'c à 7 jours (N/mm ²)	Eau (%)	MVS (kg/m ³)	R'c à 7 jours (N/mm ²)
Détermination de la masse volumique sèche (MVS) et de la résistance à la compression (R'c)	1,8	2190	5,1	1,6	2170	5,1
	3,6	2200	12,1	3,2	2195	12,2
	4,2	2235	22,2	4,1	2235	24,5
	5,2	2285	24,6	4,7	2270	34,1
	7,1	2255	21,6	7,1	2225	29,6

CONCLUSIONS

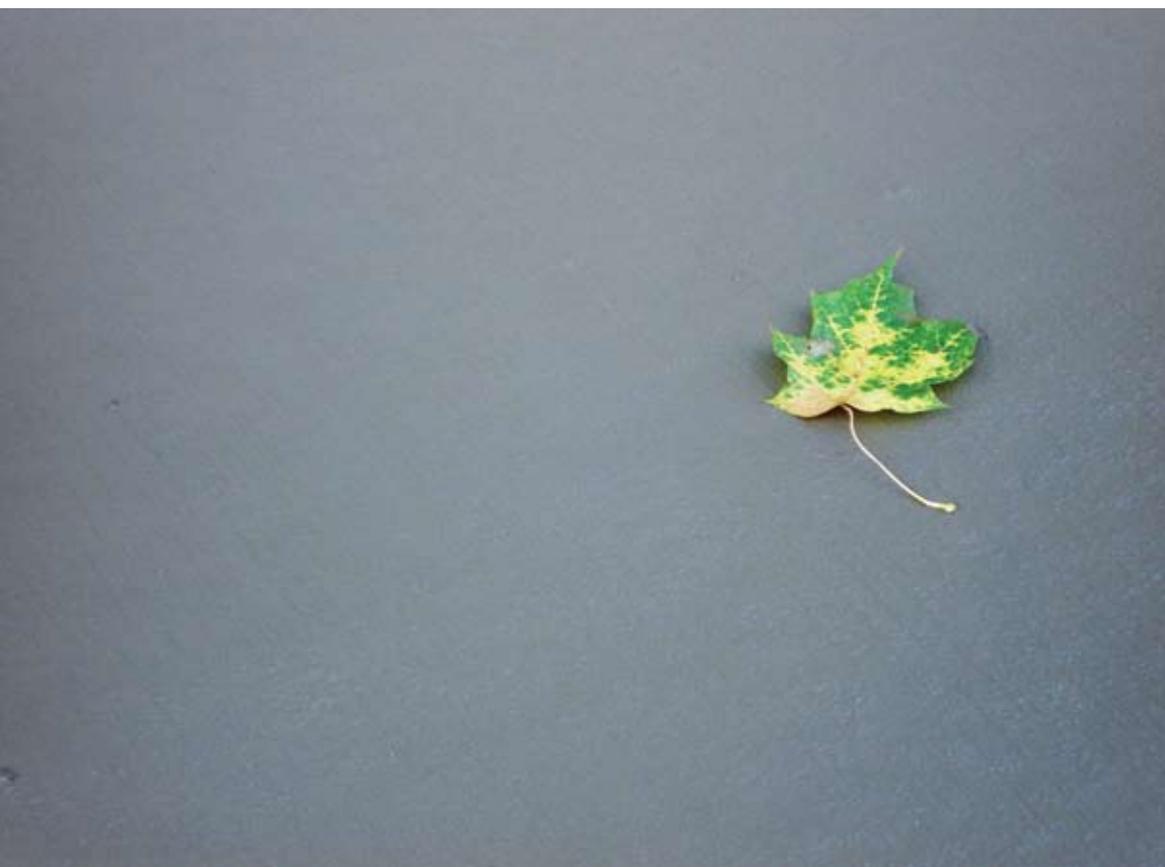
En ce qui concerne la composition d'un béton routier, les principaux aspects conditionnant sa qualité sont les suivants :

- le choix de matériaux de qualité, en particulier un bon sable de rivière ;
- et l'adoption d'une composition de béton présentant un minimum de vides, c'est-à-dire une bonne proportion des constituants, une quantité aussi faible que possible de sable et la limitation de la teneur en eau et du rapport E/C.

Le calcul du dosage des différents constituants peut se faire par la méthode des moindres carrés mais au départ d'une bonne courbe de référence bien adaptée aux moyens de mise en œuvre (e.a. la puissance des machines de mise en œuvre).

De la même manière que pour tous les matériaux, les règles de l'art pour la mise en œuvre doivent être respectées afin de garantir l'obtention du résultat recherché. La qualité des bétons durcis, en particulier leur durabilité de surface, est complètement dépendante de la protection du béton frais contre l'évaporation afin d'éviter une dessiccation fatale. Cette cure doit être appliquée aussi vite que possible après la pose. En aucun cas, la protection ne peut être reportée comme cela se constate malheureusement parfois sur chantier.

Le respect de ces règles simples permet la réalisation de bétons routiers durables et de routes en béton sécurisantes et confortables.



Le choix de matériaux de qualité combiné à une composition de béton correctement étudiée participent au développement de constructions durables

RÉFÉRENCES NORMATIVES UTILES

1. GRANULATS

NBN EN 12620 - Granulats pour béton

NBN 589-209 – Essais des sables de construction – Essai à l'acide chlorhydrique

NBN EN 932-1 - Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 1: Méthodes d'échantillonnage

NBN EN 932-2 - Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 2: Méthode de réduction d'un échantillon de laboratoire

NBN EN 933-1 - Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1: Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage

NBN EN 933-3 - Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 3: Détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement

NBN EN 933-5 - Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 5: Détermination du pourcentage de surface cassée dans les gravillons

NBN EN 933-7 - Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 7: Détermination de la teneur en éléments coquilliers – Pourcentage des coquilliers dans les gravillons

NBN EN 933-8 - Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 8: Évaluation des fines - Équivalent de sable

NBN EN 933-9 - Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 9: Évaluation des fines - Essai au bleu de méthylène

NBN EN 1097-1 - Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 1: Détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval)

NBN EN 1097-2 - Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2: Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation (Los Angeles)

NBN EN 1097-6 - Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et de l'absorption d'eau

NBN EN 1097-8 - Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 8: Détermination du coefficient de polissage accéléré

NBN EN 1367-1 - Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats – Partie 1: Détermination de la résistance au gel/dégel

NBN EN 1744-1 - Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 1: Analyse chimique

2. CIMENTS

NBN EN 197-1 - Ciment – Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

NBN B12-109 - Ciments - Ciments à teneur limitée en alcalis

3. EAU

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

4. ADJUVANTS

NBN EN 934-2 - Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 2 : Adjuvants pour béton – Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage

5. PIGMENTS

NBN EN 12878 - Pigments de coloration des matériaux de construction à base de ciment et/ou de chaux - Spécifications et méthodes d'essai (+ AC)

6. BÉTON

NBN EN 206-1 - Béton – Partie 1: Spécification, performances, production et conformité (+A1 et A2)

NBN B 15-001 - Supplément à la NBN EN 206-1 – Béton-Spécification, performances, production et conformité

NBN EN 12350-1 - Essais pour béton frais - Partie 1: Prélèvement

NBN EN 12350-2 - Essais pour béton frais - Partie 2: Essai d'affaissement

NBN EN 12350-3 - Essais pour béton frais - Partie 3: Essai Vébé

NBN EN 12350-6 - Essai pour béton frais - Partie 6: Masse volumique

NBN EN 12350-7 - Essais pour béton frais - Partie 7: Teneur en air - Méthode de la compressibilité

NBN EN 12390-1 - Essai pour béton durci - Partie 1: Forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules (+AC)

NBN EN 12390-2 - Essai pour béton durci - Partie 2: Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance

NBN EN 12390-3 - Essais pour béton durci - Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes

NBN EN 12390-7 - Essai pour béton durci - Partie 7: Masse volumique du béton durci

NBN B 15-215 - Essais des bétons - Absorption d'eau par immersion

NBN EN 480-11 - Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Méthodes d'essai - Partie 11: Détermination des caractéristiques des vides d'air dans le béton durci

ISO/DIS 4846.2 – Béton – Détermination de la résistance à l'écaillage des surfaces soumises à des agents chimiques dégivrants

CEN/TS 12390-9 – Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance - Scaling

7. REVÊTEMENTS EN BÉTON

CME 52.05 - Résistance à la compression simple sur carottes de béton de ciment prélevées in situ

CME 53.12 - Teneur en eau du béton frais

CME 53.13 - Absorption d'eau (sur la tranche supérieure d'une carotte de béton)

NBN EN 13036-1 - Caractéristiques de surface des routes et aéroports - Méthodes d'essai - Partie 1: Mesurage de la profondeur de macro texture de la surface d'un revêtement à l'aide d'une technique volumétrique à la tache

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. GROUPEMENT BELGE DU BÉTON

Technologie du béton, édition 2006.

2. NEVILLE ADAM M.

Propriétés des bétons
Editions Eyrolles, 2000

3. CENTRE DE RECHERCHES ROUTIÈRES

Code de bonne pratique pour l'exécution des revêtements en béton, Recommandations.
R 75/05, 2005.

4. CENTRE DE RECHERCHES ROUTIÈRES

Code de bonne pratique pour l'utilisation des entraîneurs d'air dans les bétons routiers, Application, formulation et contrôle, Recommandations.
R 73/02, 2002.

5. MINISTÈRE DE LA RÉGION WALLONNE, MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT ET DES TRANSPORTS.

Cahier des Charges-type RW 99 : 2004.

6. SERVICE PUBLIC DE WALLONIE.

Circulaire régionale DGO1-66-09-01 01/07/2009
Cahier des Charges-type RW99 - Mises à jour - Chapitre G. – Revêtements.
2009.

7. MINISTERIE VAN DE VLAAMSE GEMEENSCHAP.

Standaardbestek 250 voor de wegenbouw, versie 2.1, 2006.

8. MINISTÈRE DE LA RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALES, ADMINISTRATION DE L'ÉQUIPEMENT ET DES DÉPLACEMENTS.

Cahier des Charges type 2000.

9. LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES.

Construire en béton – L'essentiel sur les matériaux
2002.

10. DUTRON R.

Une méthode de détermination du dosage rationnel des bétons.
Groupement Professionnel des Fabricants de Ciment Portland Artificiel de Belgique, Bulletin technique n° 39, 1945.

11. DEBROUX R ET DUMONT R.

Twin-layer continuously reinforced concrete pavement on the N511 at Estaimpuis (Belgium): an investigation of the optimization of surface characteristics.
Walloon Ministry of Equipment and Transport (MET), Mons, Belgium,
8th International Conference on Concrete Pavements,
Colorado Springs, Colorado, August 2005.

12. ONFIELD J-N.

Déviation de Saint-Pierre-la-Cour – Une section expérimentale de béton à faible granulométrie de surface.
Route Actualité, n° 146, septembre 2005.

13. SOMMER H.,

Recycling of concrete for the reconstruction of the concrete pavement of the motorway Vienna-Salzburg.

7ème Symposium International des Routes en Béton.

Vienne, Octobre 1994

14. JASIENSKI A., PLOYAERT C., DEBLIRE J., BOLETTE R.,

Study of concrete crushed stone for the construction of an industrial road in Ouffet

8ème Symposium International des Routes en Béton.

Lisbonne, Septembre 1998.

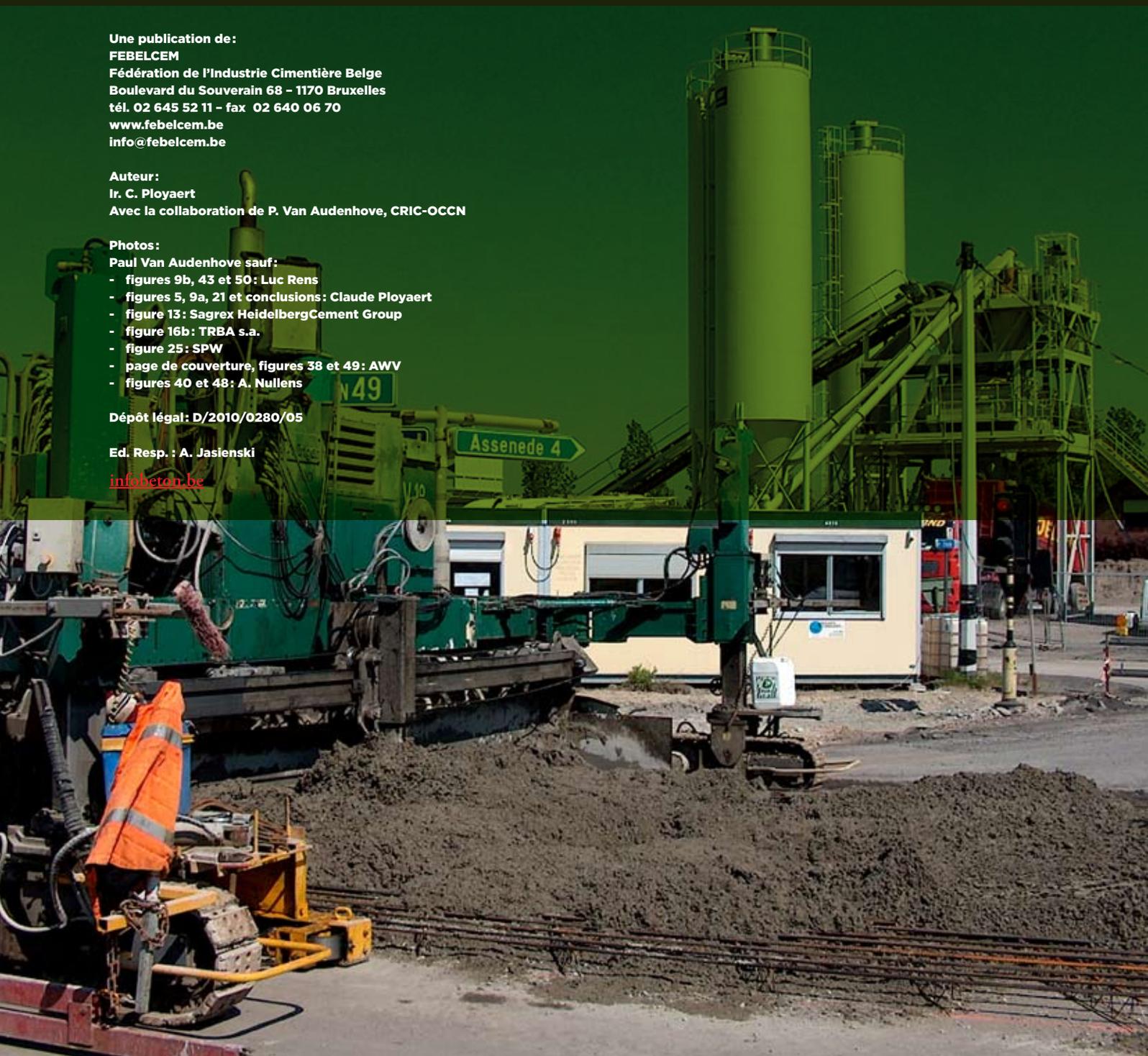
15. PLOYAERT C.

Les fondations routières liées au ciment, Qualités et applications.

Fédération de l'Industrie Cimentière, Dossier ciment, bulletin n° 33, 2004.



Groupement Belge du Béton



Une publication de:

FEBELCEM

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

Auteur:

Ir. C. Ployaert

Avec la collaboration de P. Van Audenhove, CRIC-OCCN

Photos:

Paul Van Audenhove sauf:

- figures 9b, 43 et 50: Luc Rens
- figures 5, 9a, 21 et conclusions: Claude Ployaert
- figure 13: Sagrex HeidelbergCement Group
- figure 16b: TRBA s.a.
- figure 25: SPW
- page de couverture, figures 38 et 49: AWV
- figures 40 et 48: A. Nullens

Dépôt légal: D/2010/0280/05

Ed. Resp. : A. Jasienski

infobeton.be