

L'INFLUENCE DU RAPPORT SABLE/CIMENT SUR LA QUALITÉ DES BÉTONS ROUTIERS

Ir CLAUDE PLOYAERT
Quality Engineer District South
INTER-BETON

Ir LUC RENS
Raadgevend ingenieur infrastructuur
FEBELCEM

Summary

Tous les participants à l'acte de bâtir ont intérêt à soigner le matériau qu'ils utilisent et à se souvenir qu'un béton routier soumis aux sels de déverglaçage n'est durable que moyennant une composition correcte dont la quantité de sable fait partie.

Les bétons routiers sont souvent considérés, par erreur, comme des bétons secs. Il s'agit en effet, de bétons consistants mais certainement pas secs en terme de teneur en eau. Le rapport E/C des bétons routiers est, comme pour de très bons bétons de structure généralement voisin de 0,45. L'aspect consistant est dû à la faible teneur en sable des bétons. Cette faible teneur en sable est primordiale pour l'obtention d'un mortier de qualité c'est-à-dire un mortier qui peut résister aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.

Cet article reviendra sur les rapports Sable/Ciment (S/C) qui doivent gouverner une composition d'un béton routier durable. Ces rapports S/C sont bien entendu fonction du diamètre maximum des granulats du béton. En effet, plus un granulat est petit, plus il a besoin de mortier pour s'enrober.

Elke deelnemer aan een bouwproces dient zorg te dragen voor de materialen die hij aanwendt en in het geval van een wegenbeton, onderhevig aan dooizouten, moet hij beseffen dat de duurzaamheid ervan afhangt van een correcte samenstelling, o.a van de hoeveelheid zand. Wegenbeton wordt vaak ten onrechte beschouwd als een droog beton. Het is inderdaad een consistent beton maar zeker niet droog op vlak van watergehalte. De W/C factor van een wegenbeton schommelt, net zoals voor een goed structuurbeton, rond de 0,45. De droge consistentie heeft te maken met het lage zandgehalte van het beton. Dit lage zandgehalte is primordiaal om een kwalitatieve mortel te bekomen die weerstaat aan vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten.

Dit artikel handelt over de verhouding Zand/Cement (Z/C) die nodig is voor een duurzaam wegenbeton. Deze verhouding Z/C is uiteraard functie van de maximum diameter van de granulaten in het beton. Er is immers meer mortel nodig om een steen te omhullen naarmate die kleiner is.

1. Introduction

La Belgique comporte un vaste réseau routier dont de nombreuses routes en béton. Il n'est pas rare de rencontrer des routes en béton de plus de 40 à 50 ans d'âge. A l'époque, la mise en œuvre du béton était réalisée entre coffrages fixes au moyen de machines circulant sur les rails du coffrage. Ensuite, les premières machines à coffrages glissants ont été utilisées, notamment sur l'E42 dont l'inauguration par Sa Majesté le Roi Baudouin a eu lieu en décembre 1972. Une grande attention était portée à la composition du béton, mais aussi au compactage, à la finition et à la protection du béton jeune contre la dessiccation. La composition de béton la plus utilisée était la composition à granulométrie continue type A des Ponts et Chaussées. Elle était constituée comme suit par mètre cube de béton en place :

- pierrailles concassées 22/40 :	750 kg/m ³
- pierrailles concassées 8/22 :	375 kg/m ³
- pierrailles concassées 2/8 :	350 kg/m ³
- sable de rivière 0/2 :	405 kg/m ³
- ciment :	400 kg/m ³
- eau :	160 l/m ³

Remarque : à l'époque, les calibres étaient établis sur passoires à trous ronds. Aujourd'hui, ils le sont sur tamis à mailles carrées ou des tôles perforées. Ainsi, un 22/40 était très proche d'un 20/32 actuel, un 8/22 d'un 6/20 et un 2/8 d'un 2/6.

De par la qualité du béton qui en résulte, ces revêtements présentent une résistance mécanique et une résistance à l'usure très élevées. La résistance à la compression minimale imposée était de 60 N/mm² à 56 jours. Il est à remarquer que ces bétons résistent très bien aux sels de déverglaçage malgré l'absence d'un adjuvant entraîneur d'air. Ceci est dû à la qualité de la pâte (faible teneur en eau, haute teneur en ciment) et à la faible quantité de sable. A l'époque, les Cahiers des Charges-types imposaient pour la composition des bétons routiers un rapport sable/ciment (S/C) compris entre 1,0 et 1,5. Aujourd'hui, afin d'améliorer le confort acoustique des revêtements en béton, bon nombre de compositions sont de granulométrie plus fine. La quantité de sable y est donc beaucoup plus importante (généralement 600 kg/m³ de sable de rivière pour un béton 0/20 mm et plus encore lorsque le Dmax diminue). L'utilisation d'un entraîneur d'air dans ces bétons est absolument nécessaire.

2. Teneur en sable des bétons pour revêtements et accessoires de chaussée (compositions actuelles)

Sans entrer dans les détails, les méthodes de calcul de composition des bétons routiers visent à obtenir un béton compact en enrobant l'ensemble des granulats d'une quantité

optimale de pâte de ciment (illustration 1 – 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.

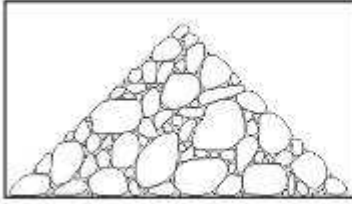
Les vides du squelette inerte composé par les gravillons et le sable constituent donc des données importantes ; certaines méthodes partent du volume de ces vides pour déterminer la quantité optimale de pâte, d'autres prennent en compte la composition granulométrique du squelette inerte pour réduire ce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

Ci-après, sont donnés des courbes granulométriques de référence des squelettes inerts de différents bétons de revêtements et d'accessoires de chaussée.

2.1. Courbes granulométriques de référence des bétons routiers 0/32 pour autoroutes, routes régionales et communales (illustration 2)

Le rapport pondéral entre la fraction 0/2 du sable utilisé et le squelette (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.

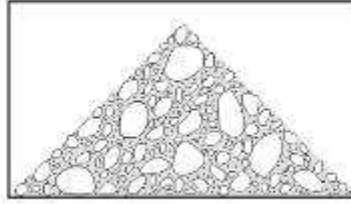


Excès de gros granulats

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

= compacité faible

→ mauvaise ouvrabilité

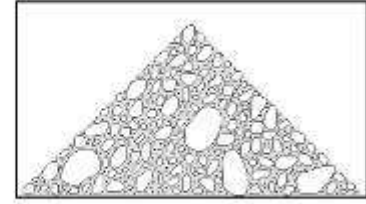


Bonnes proportions des constituants

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

= optimum de compacité

→ • bonne ouvrabilité
• bonne résistance
• peu de mortier



Excès de granulats fins

Rapport $\frac{S}{S+G}$ élevé

= compacité faible

→ trop d'eau de mouillage

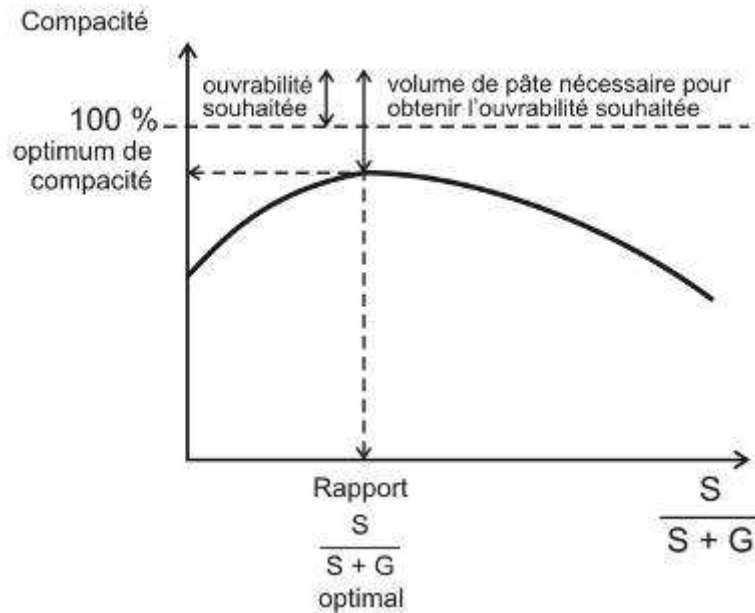


Illustration 1 : évolution de la compacité du béton en fonction des proportions des constituants. A gauche, les gravillons dominent ; à droite, le sable domine et au milieu, le mélange est à son optimum de compacité

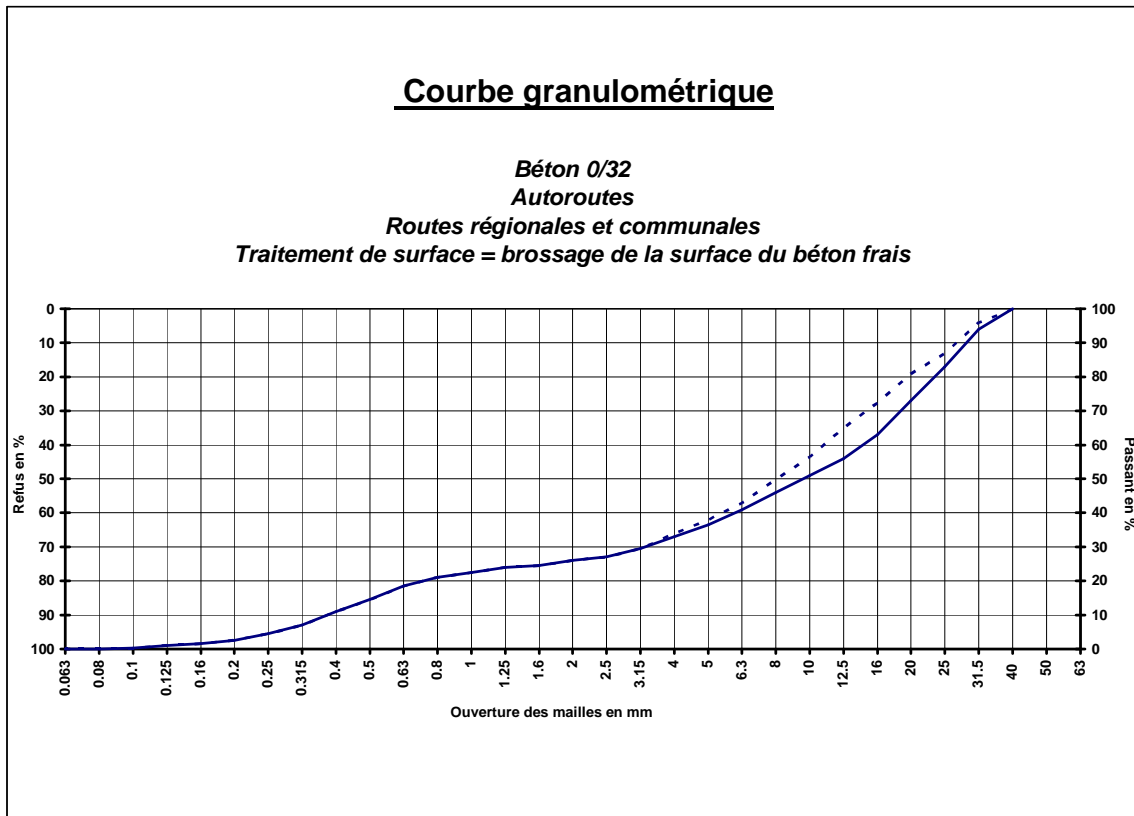


Illustration 2 : courbe de référence du squelette inerte d'un béton 0/32 pour autoroutes et routes régionales ou communales

2.2. Courbes granulométriques de référence des bétons 0/20 pour routes régionales et communales (illustration 3)

Le rapport pondéral entre la fraction 0/2 du sable utilisé et le squelette (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).

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.

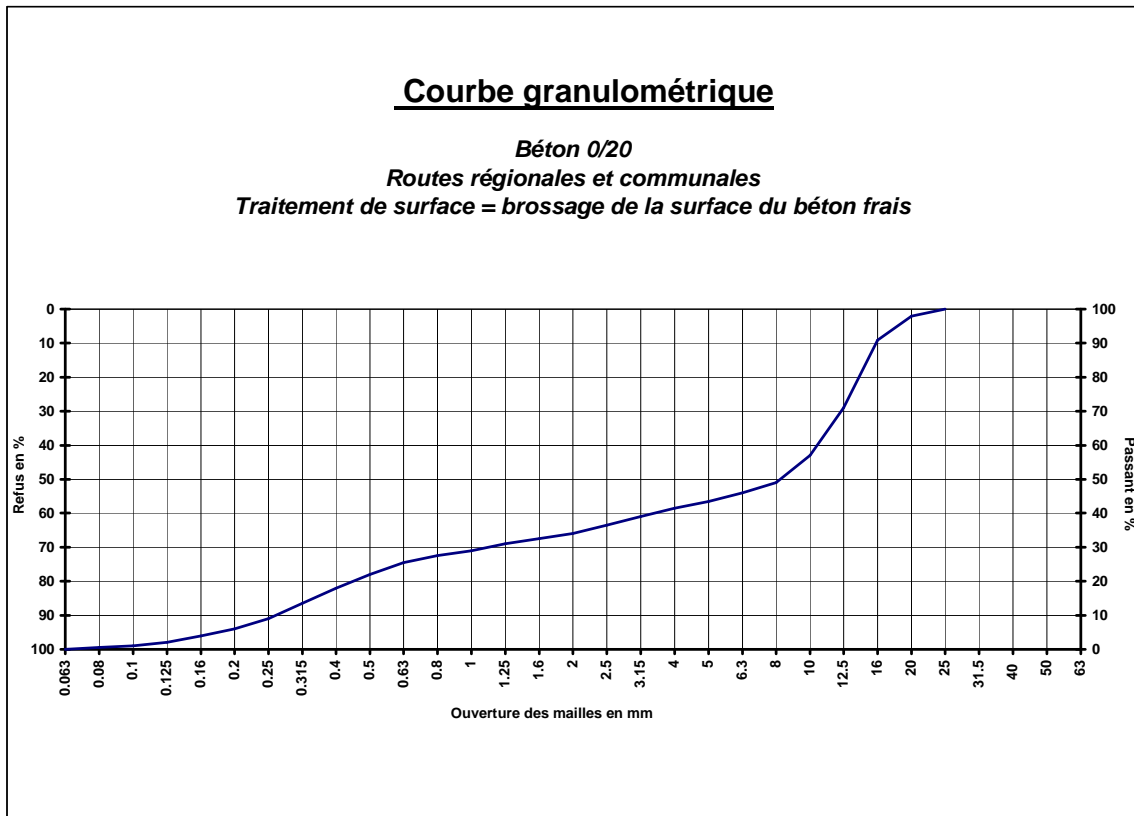


Illustration 3 : courbe de référence du squelette d'un béton 0/20 pour routes régionales et communales

2.3. Courbes granulométriques de référence des béton silencieux 0/20, 0/14, 0/6 (illustration 4)

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.

En diminuant le D_{max} du granulat (bétons 0/14 et 0/6), la teneur en sable 0/2 augmente par rapport au béton 0/20. Ceci a pour effet d'augmenter la demande en eau du squelette inerte du béton. La teneur en ciment du mélange doit donc également être augmentée.

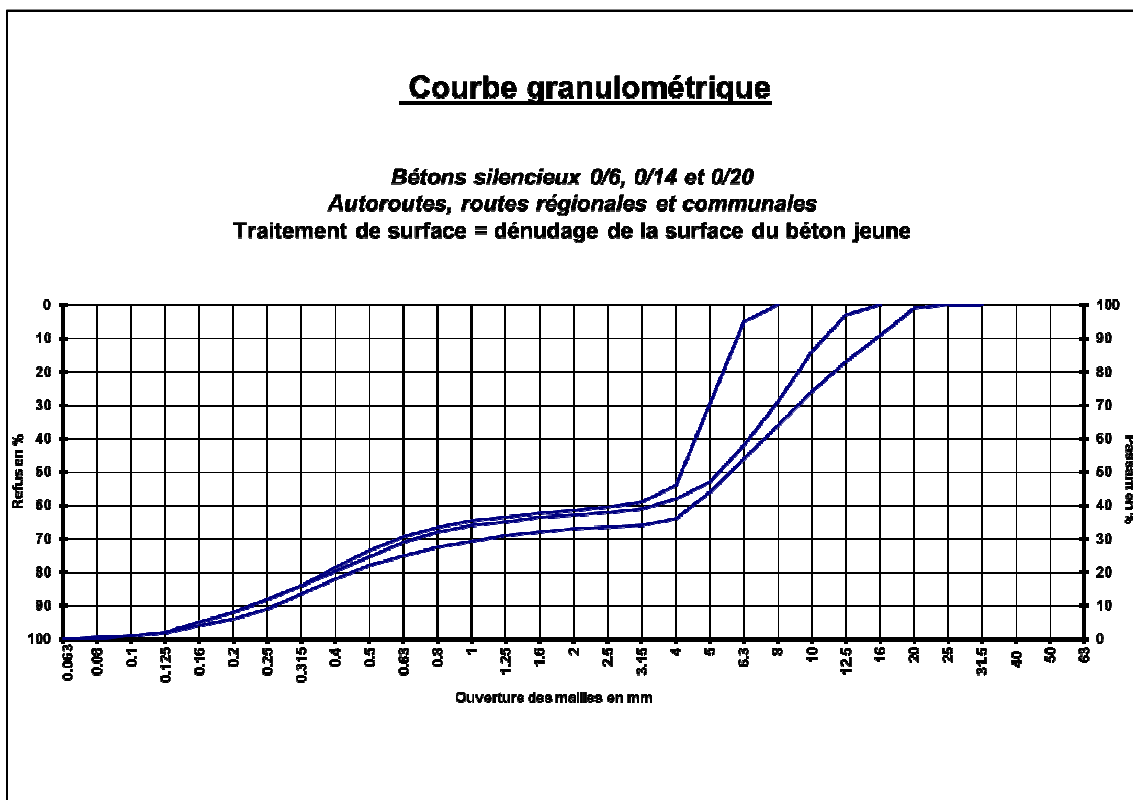


Illustration 4 : courbes de référence du squelette inerte des bétons 0/20, 0/14 et 0/6 pour revêtements silencieux

2.4. Bétons 0/20 et 0/32 pour accessoires de chaussée (illustration 5)

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 %. 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.

A noter que les barrières de sécurité sont quelques fois mises en œuvre avec un béton dont le D_{max} est de 32 mm (courbe en trait discontinu au niveau de l'illustration 5). 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.

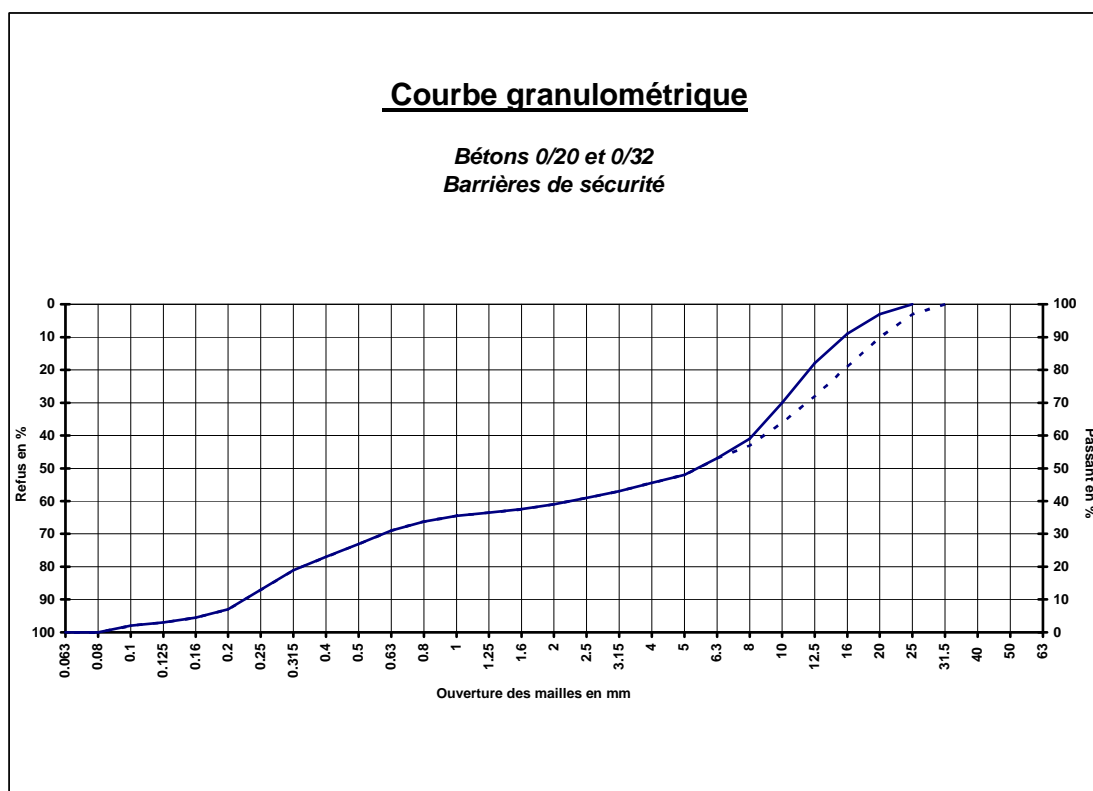


Illustration 4 : courbes de référence des squelettes inertes des bétons 0/20 et 0/32 pour barrières de sécurité

3. Rapport Sable/Ciment pour revêtements et accessoires de chaussée

Sur base des données développées ci-avant, il est possible de calculer les rapports Sable/Ciment (S/C) des différents bétons. Ces résultats sont repris au tableau 1.

Type de béton	Teneur en ciment en kg/m ³	Teneur moyenne en sable (fraction 0-2 mm) en kg/m ³	Rapport S/C moyen
0/32 sans air	400	480	1,20
	375	490	1,30
0/20 avec air	400	600	1,50
	375	600	1,60
0/14 avec air	400	650	1,60
	375	650	1,70
0/6 avec air	425	700	1,65
0/20 barrières de sécurité avec air	375	710	1,90

Tableau 1 : valeurs moyennes des rapport S/ pour les bétons routiers

Nous pouvons constater que l'ancienne imposition des Cahiers des charges-types à savoir un rapport S/C compris entre 1,0 et 1,5 est très difficile voire impossible à respecter pour les bétons possédant une faible granulométrie. Ainsi, il faut avoir à l'esprit que ces bétons sont plus sensibles à l'action du gel et des sels de déverglaçage. Dès lors, afin de garantir une bonne résistance aux cycles de gel-dégel associés à des sels de déverglaçage, les mesures en matière de composition suivante doivent absolument être respectées :

- teneur minimale en ciment : 375 kg/m³ ;
- rapport E/C ≤ 0,45 (éventuellement 0,50) et teneur en eau ≤ 180 l/m³ ;
- usage d'un entraîneur d'air dans le béton tel que la teneur en air du béton frais par rapport au D_{max} du granulat soit de :
 - minimum 3 %-v d'air pour un D_{max} de 20 ;
 - minimum 4 %-v d'air pour un D_{max} de 14 mm ;
 - minimum 5 %-v d'air pour un D_{max} de 6 mm.

De plus, la vibration du béton sera soignée et la protection contre la dessiccation aura lieu immédiatement après celle-ci. Ces conditions sont indispensables car c'est bien la peau des éléments en béton qui est sévèrement exposée aux sels fondants. Les caractéristiques de la peau sont étroitement liées à la mise en œuvre (vibration, finition de surface, mûrissement).

4. Différences par rapport à un béton lavé classique

Les tableaux 2 et 3 présentent des compositions de bétons conformes aux exigences des normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001 d'une part (tableau 2) et à celles des cahiers des charges-types d'autre part (tableau 3) à l'exception du type de ciment CEM III/B qui n'est pas admis pour la confection de revêtements routiers. Mis à part quelques différences dans les paramètres analysés (rapport E/C, présence ou non d'air entraîné), les bétons des tableaux 2 et 3 se différencient fortement par leur squelette inerte. Comme expliqué ci-avant, les bétons routiers présentent un squelette granulométrique bien continu avec une teneur en sable faible (33 % de la totalité du squelette inerte pour un béton 0/20) tandis que les autres bétons présentent un squelette granulométrique nettement plus instable (quantité de gravillons 2/6 relativement faible et teneur en sable élevée, de l'ordre de 41 % de la totalité du squelette inerte). L'instabilité de ces dernières compositions est accentuée par le fait que l'ouvrabilité est importante (classe de consistance S3). Ces différents facteurs peuvent engendrer des remontées importantes de mortier et de laitance vers la couche supérieure et rendent les bétons non résistants à l'agression des cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage. En effet, bien que les teneurs en ciment CEM I 42,5 N LA ou CEM III/B 42,5 N-LH/SR LA des bétons conformes aux normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001 sont quelque peu inférieures, leurs résistances aux sels de déverglaçage n'a pas de commune mesure à celles des bétons routiers. Or, ces bétons sont bien conformes aux exigences minimales des normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001. La présence d'une teneur en air de 4,9 % ne permet même pas d'améliorer le comportement face aux sels fondants.

Type d'application		Bétons conformes aux normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001				
Type de béton		C35/45 EE4 BNA, BA et BP S3 20 mm Sans air entraîné, WAI (0,45) (E/C = 0,45)	C30/37 EE3 BA et BP S3 20 mm Sans air entraîné, WAI (0,50) (E/C = 0,50)	C30/37 EE4 BA et BP S3 20 mm Avec air entraîné, WAI (0,45)A (E/C = 0,45)	C35/45 EE4 BNA, BA et BP S3 20 mm Sans air entraîné, WAI (0,45) (E/C = 0,45)	
Gravillons concassés 14/20		352 kg/m ³	345 kg/m ³	335 kg/m ³	355 kg/m ³	
Gravillons concassés 6/14		600 kg/m ³	588 kg/m ³	570 kg/m ³	605 kg/m ³	
Gravillons concassés 2/6		150 kg/m ³	147 kg/m ³	143 kg/m ³	151 kg/m ³	
Sable de rivière 0/2		771 kg/m ³	756 kg/m ³	734 kg/m ³	778 kg/m ³	
CEM I 42,5 N LA		-	-	-	363 kg/m ³	
CEM III/B 42,5 N-LH/SR LA		362 kg/m ³	365 kg/m ³	361 kg/m ³	-	
Superplastifiant		1500 ml/m ³	-	615 ml/m ³	1610 ml/m ³	
Entraîneur d'air		-	-	345 ml/m ³	-	
Eau totale		173 l/m ³	192 l/m ³	174 l/m ³	173 l/m ³	
Essais sur béton frais	Slump	140 mm	140 mm	140 mm	140 mm	
	Teneur en air	0,9 %	0,8 %	4,9 %	1,3 %	
	Masse volumique humide	2412 kg/m ³	2392 kg/m ³	2316 kg/m ³	2427 kg/m ³	
Essais sur béton durci	Résistance à la compression	sur cubes de 15 cm à 28 jours	54,9 N/mm ²	48,3 N/mm ²	47,6 N/mm ²	60,5 N/mm ²
		sur cubes de 15 cm à 91 jours	61,4 N/mm ²	53,8 N/mm ²	49,8 N/mm ²	70,3 N/mm ²
		sur carottes (100 cm ²) à 28 jours	60,0 N/mm ²	54,9 N/mm ²	50,2 N/mm ²	69,6 N/mm ²
		sur carottes (100 cm ²) à 91 jours	-	-	-	-
	Absorption d'eau par immersion ⁽¹⁾	5,1 % - 5,1 % - 5,0 % moy : 5,1 %	5,8 % - 5,6 % - 5,7 % moy : 5,7 %	5,5 % - 5,6 % - 5,8 % moy : 5,6 %	4,7 % - 4,8 % - 4,7 % moy : 4,7 %	
	Résistance au gel, écaillages à 30 cycles ⁽²⁾	42,9 g/dm ²	51,7 g/dm ²	42,6 g/dm ²	49,8 g/dm ²	

(1) L'absorption d'eau par immersion est mesurée sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm²

(2) La résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage est mesurée à 90 jours d'âge sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm², essai selon ISO/DIS 4846.2

Tableau 2 : exemples de composition de bétons, influence de plusieurs paramètres sur la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage, cas de bétons conformes aux normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001

Type d'application		Bétons routiers						
Type de béton		D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,50 Sans air entraîné	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,45 Sans air entraîné	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,45 Avec air entraîné	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,50 Sans air entraîné	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,45 Sans air entraîné	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ E/C ≤ 0,45 Avec air entraîné	
Gravillons concassés 14/20		387 kg/m ³	389 kg/m ³	376 kg/m ³	394 kg/m ³	394 kg/m ³	381 kg/m ³	
Gravillons concassés 6/14		626 kg/m ³	630 kg/m ³	608 kg/m ³	638 kg/m ³	637 kg/m ³	616 kg/m ³	
Gravillons concassés 2/6		243 kg/m ³	245 kg/m ³	237 kg/m ³	247 kg/m ³	248 kg/m ³	239 kg/m ³	
Sable de rivière 0/2		613 kg/m ³	617 kg/m ³	595 kg/m ³	625 kg/m ³	624 kg/m ³	603 kg/m ³	
CEM I 42,5 N LA		-	-	-	375 kg/m ³	376 kg/m ³	379 kg/m ³	
CEM III/B 42,5 N-LH/SR LA		377 kg/m ³	374 kg/m ³	379 kg/m ³	-	-	-	
Plastifiant		-	2300 ml/m ³	195 ml/m ³	-	480 ml/m ³	-	
Entraîneur d'air		-	-	1130 ml/m ³	-	-	450 ml/m ³	
Eau totale		184 l/m ³	169 l/m ³	171 l/m ³	175 l/m ³	170 l/m ³	171 l/m ³	
Essais sur béton frais	Slump	40 mm	35 mm	40 mm	25 mm	25 mm	45 mm	
	Teneur en air	0,7 %	1,3 %	3,6 %	1,0 %	1,2 %	3,4 %	
	Masse volumique humide	2430 kg/m ³	2425 kg/m ³	2367 kg/m ³	2454 kg/m ³	2449 kg/m ³	2389 kg/m ³	
Essais sur béton durci	Résistance à la compression	sur cubes de 15 cm à 28 jours	-	-	-	-	-	
		sur cubes de 15 cm à 91 jours	-	-	-	-	-	
		sur carottes (100 cm ²) à 28 jours	59,0 N/mm ²	65,0 N/mm ²	52,8 N/mm ²	69,5 N/mm ²	66,6 N/mm ²	60,0 N/mm ²
		sur carottes (100 cm ²) à 91 jours	70,7 N/mm ²	74,4 N/mm ²	61,2 N/mm ²	82,2 N/mm ²	77,7 N/mm ²	69,2 N/mm ²
	Absorption d'eau par immersion ⁽³⁾	6,3 %	5,7 %	6,3 %	5,3 %	5,1 %	5,6 %	
	Résistance au gel, écaillages à 30 cycles ⁽⁴⁾	16,5 g/dm ²	13,1 g/dm ²	9,0 g/dm ²	11,7 g/dm ²	11,4 g/dm ²	6,5 g/dm ²	

(3) L'absorption d'eau par immersion est mesurée sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm²

(4) La résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage est mesurée à 90 jours d'âge sur tranches découpées à la surface supérieure de carottes de 100 cm², essai selon ISO/DIS 4846.2

Tableau 3 : exemples de composition de bétons, influence de plusieurs paramètres sur la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage, cas de bétons routiers

5. Conclusions

Nous retiendrons que la teneur en sable relativement élevée des bétons est un facteur très préjudiciable à leur résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants et il est par conséquent important de limiter le dosage en sable au maximum. Pour une teneur en ciment ou en pâte donnée, une quantité de grains de sable plus élevée dilue la pâte de ciment dans la fraction mortier du béton et rend celui-ci moins résistant aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.

6. Références bibliographiques

- Ployaert C. Vers une composition optimale des bétons routiers. FEBELCEM, 2010
- Ployaert C. Concevoir des ouvrages en béton résistant au gel-dégel et aux sels de déverglaçage. Bulletin T-4, FEBELCEM, 2012.

* * *