

Les bétons recyclés

David Gélinas
Département de génie
géologique et de géologie
Université Laval

De nos jours, il est impressionnant de constater la multitude d'ouvrages construits en béton. Plusieurs de ces ouvrages présentent un niveau de décrépitude avancé et devront éventuellement être remplacés ou réparés. Le remplacement de ces structures entraînera un engorgement des sites d'enfouissement de matériaux secs. C'est pourquoi la possibilité de recycler ce matériau de construction a été envisagée.

Le recyclage du béton consiste à produire un granulats à partir d'un béton déjà hydraté. Pour la réalisation de l'étude faisant l'objet du présent rapport, trois types de béton ont été concassés, puis tamisés pour obtenir les trois fractions granulométriques généralement utilisées dans les bétons (20-14 mm; 14-10 mm; 10-5 mm). Des essais physico-mécaniques ont été réalisés par la suite sur ces trois types de

matériaux recyclés. Grâce à ces essais, il a été possible de classer les granulats produits comme étant aptes à être employés comme granulats grossiers dans les mélanges de béton. De plus, une comparaison des propriétés physiques du granulats original et du granulats enrobé de pâte de ciment a été faite.

Pour compléter l'étude des matériaux recyclés, des cylindres de béton ont été fabriqués en utilisant les trois bétons recyclés comme granulats grossiers. Les bétons ayant atteint une maturité de 28 jours en chambre humide, des tests de compression sur les cylindres ont été réalisés, ce qui a permis d'établir la résistance en compression des nouveaux bétons.

Les résultats obtenus semblent intéressants, et c'est pourquoi des recherches plus poussées sur le sujet pourraient être envisagées.

SOMMAIRE

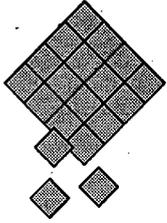
2	Introduction
2	Méthodologie
4	Essais mécaniques
10	Essais sur les bétons
11	Présentation et interprétation des résultats
11	Essais sur les granulats
15	Essais sur les nouveaux mélanges de béton de ciment
16	Conclusion
20	Références



Ce bulletin est produit par le Service de la documentation et de l'information scientifique, Direction de la coordination de la recherche et de l'information en transport, Ministère des Transports du Québec
700, boul. René-Lévesque Est, 21^e étage
Québec (Québec) G1R 5H1
Tél. : (418) 643-6039
Fax : (418) 646-2343
Recherche et coordination :
Dominique Duchesne
Conception et édition électronique :
Carole Robitaille

Dépôt légal -
Bibliothèque nationale
du Québec, 1996
ISSN 1198-1113

CANQ
TR
248
V.23



Introduction

De nos jours, il est impressionnant de constater la multitude d'ouvrages construits principalement en béton. Plusieurs de ces ouvrages présentent un niveau avancé de décrépitude; pensons simplement à certains ponts, viaducs ou trottoirs. Tous ces ouvrages devront éventuellement être remplacés ou réparés. Cependant, le remplacement de ces structures entraînera un engorgement des sites d'enfouissement de matériaux secs. C'est pourquoi la possibilité de recycler le béton de ces structures existantes a été envisagée.

Le présent rapport porte donc sur la

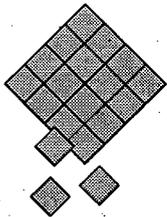
possibilité de recycler trois bétons constitués de trois granulats différents, soit un béton calcaire usuel, un béton à hautes performances dolomitique et un béton granitique ordinaire.

Pour pouvoir émettre un jugement quant à la qualité des matériaux produits à partir de ces bétons, plusieurs tests sur le comportement physico-mécanique des granulats ont été faits, de même que des tests sur les nouveaux bétons.

Les essais mécaniques retenus sont ceux permettant d'évaluer la possibilité d'employer les granulats en

question comme granulat à béton. Voici la liste des essais que les matériaux en question ont dû subir : fragmentation Los Angeles, abrasion Micro-Deval humide, durabilité au sulfate de magnésium, gel ontarien, particules plates et allongées, ainsi que densité et absorptivité.

Par la suite, au moment de la fabrication des nouveaux bétons, l'affaissement de même que le pourcentage d'air dans les bétons ont été mesurés. Un essai de compression après 28 jours de mûrissement en chambre humide a également été réalisé sur les nouveaux cylindres de béton.



Méthodologie

Généralités

Tout d'abord, une explication de ce qui est sous-entendu par le terme béton recyclé s'impose. Un béton recyclé est un béton fabriqué au moyen de granulats provenant du concassage d'un béton existant. C'est donc dire qu'il s'agit d'un mélange de pâte de ciment Portland usuel auquel la fraction grossière des granulats (de 5 à 20 mm) est remplacée par le produit d'un béton concassé (le granulat est en fait un mélange de pierre et de ciment hydraté).

Caractéristiques et provenance des matériaux utilisés

Tous les bétons utilisés pour la confection des granulats provenaient du département de génie civil de l'Université Laval et se présentaient sous forme de plaques ou de cylindres.

Le tableau 1 indique clairement les éléments de départ ayant servi à la réalisation des granulats. Il indique le type de béton, la provenance des

granulats utilisés dans le mélange, la résistance en compression testée, de même que la quantité de matériel utilisé.

Tableau 1 Tableau des matériaux utilisés dans la fabrication du granulat recyclé			
Type de béton	Provenance des granulats	Résistance en compression testée	Quantité de départ
Béton calcaire standard	Carrière Verreault-Frontenac	42,5 MPa	144 kg
Béton dolomitique hautes performances	Carrière Mirabel	72 MPa	90 kg
Béton granitique standard	Carrière Bédard	55 MPa	181kg

Préparation des matériaux

RÉDUCTION DES CYLINDRES

Cette première étape de la préparation des matériaux avait pour but de casser les cylindres et les plaques de béton en morceaux d'environ 6 cm de diamètre, afin de rendre possible un premier concassage. C'est donc au moyen d'une masse à béton que les plaques et les cylindres ont été grossièrement cassés.

CONCASSAGE

Le concassage des matériaux a été effectué en deux étapes. Un premier concassage a été réalisé au moyen d'un concasseur à mâchoires. Ce concasseur a permis de réduire les matériaux de 6 cm de diamètre à 2,5 cm de diamètre.

Une fois le concassage primaire effectué, un concassage secondaire a été réalisé au moyen, encore une fois, d'un concasseur à mâchoires, mais cette fois de plus petite dimension. Ce concasseur a permis de réduire les matériaux ayant un diamètre inférieur à 2,5 cm. C'est ce

deuxième concassage qui a permis d'obtenir les granulats nécessaires à la réalisation du projet (la granulométrie après les deux concassages se situait entre 0 et 20 mm).

TAMISAGE

Le tamisage des matériaux a été effectué au moyen d'un tamiseur mécanique de type Gilson. Cette séparation des matériaux a permis d'obtenir les trois fractions granulométriques généralement utilisées dans les bétons, soit : 20-14 mm, 14-10 mm et 10-5 mm. Une partie des granulats ainsi produits a servi à la réalisation d'un nouveau béton; le reste a été réservé pour la réalisation des essais physico-mécaniques.

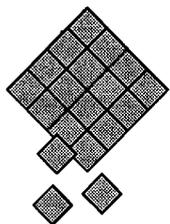
POURCENTAGE DE RÉCUPÉRATION ET ESTIMATION VISUELLE DES MATÉRIAUX PRODUITS

Le pourcentage de récupération des matériaux, une fois le concassage et le tamisage effectués, est de l'ordre de 90 %, ce qui est très satisfaisant. Il faut cependant prendre en considération le fait que l'étape de concassage a eu lieu en laboratoire au moyen de concasseurs à mâchoires, et que ce type de concasseur a la propriété de produire peu de particules fines.

Le matériau recyclé produit se présente sous trois formes distinctes :

- 1- granulat enrobé de pâte de ciment
- 2- granulat sans pâte de ciment
- 3- pâte de ciment sans granulat

Le béton granitique a produit en majeure partie des granulats enrobés de pâte de ciment. On estime visuellement que la pâte de ciment peut représenter jusqu'à 40 % de la composition d'une particule. Le béton calcaire, pour sa part, est celui ayant produit le plus de granulats sans pâte de ciment. L'estimation visuelle donne en moyenne de 5 % à 10 % de pâte de ciment autour de la pierre calcaire. En ce qui a trait au béton dolomitique, les granulats produits se situent entre les deux précédents, mais plus près du béton granitique que du béton calcaire.



Essais mécaniques

Essais de résistance à l'attrition au moyen de l'appareil Micro-Deval dans des conditions humides

PRINCIPE DE L'ESSAI

Provoquer une attrition en milieu humide par le frottement des granulats entre eux sous une charge abrasive constituée de billes d'acier afin d'en déterminer le coefficient d'usure. L'essai renseigne donc sur la résistance à l'usure des granulats. La masse de la charge abrasive, de même que la composition granulométrique du granulat, qui sont deux paramètres nécessaires à la réalisation de l'essai, doivent satisfaire aux exigences du tableau 2.

MODE OPÉRATOIRE

Un échantillon de 500 g de granulat sec et propre est requis.

- Tremper l'échantillon dans 250 cm³ d'eau pour une durée de 24 heures ± 4 heures, puis bien l'égoutter.
- Introduire dans une jarre¹ la charge abrasive selon le grade, l'échantillon de granulats préparé et 2,5 litres d'eau. Fixer le couvercle de manière étanche.
- Mettre la jarre en rotation pour une durée de 2 heures à 100 tours par minute ± 5 tours par minute.

Ouverture des tamis		Masse de la fraction				
Passant	Retenu	Grade				
		A	B	C	D	E
20 mm	14 mm	500 g	250 g			
14 mm	10 mm		250 g	500 g	250 g	
10 mm	5 mm				250 g	500 g
Charge abrasive en g (± 5 g)		5 300	5 000	4 425	2 500	2 000

- Une fois le cycle de rotation terminé, déverser le contenu de la jarre sur trois tamis superposés : 10 mm, 5 mm et 1,25 mm. Prendre soin de bien récupérer tout le contenu de la jarre. Procéder au lavage des particules retenues jusqu'à obtention d'eau claire. Retirer toutes les charges abrasives au moyen d'un aimant.
- Sécher à l'étuve les particules ayant été retenues sur les trois

tamis, à la température de 110 °C ± 5 °C, jusqu'à obtention d'une masse constante. Par la suite, peser ces particules afin d'en déterminer la masse.

CALCUL

Le coefficient de perte à l'usure Micro-Deval est le pourcentage de particules passant le tamis de 1,25 mm et se calcule de la manière suivante :

$$\text{coefficient de perte à l'attrition Micro-Deval} = \frac{(500 \text{ g} - \text{masse finale})}{500 \text{ g}} \times 100$$

¹ Jarre cylindrique normalisée de 170 mm de longueur et de 210 mm de diamètre.

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Dans le cas présent, l'essai a été réalisé sur un granulat de grade B, soit sur 250 g de granulats de chacune des classes granulométriques suivantes : 20-14 mm et 14-10 mm; ce matériau était accompagné d'une charge abrasive de 5 000 g. Le tableau 3 présente les prises d'essai.

Détermination du pourcentage des particules plates et des particules allongées

PRINCIPE DE L'ESSAI

Particules plates

Une particule est dite plate lorsque sa dimension la plus petite, soit son épaisseur (E), est inférieure aux $\frac{3}{5}$ de sa dimension moyenne (G)².

$$0,6 \geq \frac{E}{G}$$

Particules allongées

Une particule est dite allongée lorsque sa dimension la plus grande, soit sa longueur (L), est supérieure aux $\frac{9}{5}$ de sa dimension moyenne (G)².

$$1,8 \leq \frac{L}{G}$$

Nature du granulat	Ouverture des tamis		Masse de la prise d'essai	Masse de la charge abrasive
	Passant	Retenu		
Béton calcaire	20,0 mm	14,0 mm	250 g	5 000 g
	14,0 mm	10,0 mm	250 g	
Béton dolomitique	20,0 mm	14,0 mm	250 g	5 000 g
	14,0 mm	10,0 mm	250 g	
Béton granitique	20,0 mm	14,0 mm	250 g	5 000 g
	14,0 mm	10,0 mm	250 g	

Particules plates et allongées

Une particule est dite plate et allongée lorsqu'elle présente les caractéristiques décrites aux paragraphes portant sur les particules plates et sur les particules allongées.

MODE OPÉRATOIRE

Particules plates

- Sur chacune des fractions granulométriques du matériel présenté au tableau 4, prélever un minimum de 100 particules, puis en déterminer la masse.
- Sur chaque prise d'essai, au moyen de la mesure d'épaisseur appropriée, classer une à une comme particules plates les particules ayant passé à travers la fente associée à son calibre.
- Déterminer la masse des particules classées comme étant plates, puis exprimer cette masse en pourcentage par rapport à la prise d'essai initiale.

Particules allongées

- Sur chacune des fractions granulométriques du matériel présenté au tableau 4, prélever un minimum de 100 particules, puis en déterminer la masse.
- Sur chaque prise d'essai, au moyen de la mesure de longueur appropriée, classer une à une comme particules allongées les particules qui, sur leur plus grande dimension, ne traversent pas les tiges correspondant à leur calibre.
- Déterminer la masse des particules classées comme étant allongées, puis exprimer cette masse en pourcentage par rapport à la prise d'essai initiale.

² G : Dimension moyenne équivalent à la moyenne entre la plus petite ouverture du tamis dans lequel les particules passent et l'ouverture de celui sur lequel elles sont retenues.

Tableau 4 Tableau des exigences relatives à la réalisation de l'essai sur les particules plates et allongées						
Fraction		Dimension moyenne (G)	Dimensions			
Matériau passant le tamis de	Matériau retenu sur le tamis de		Calibre - épaisseur (0,6 * G)=E		Calibre - longueur (1,8 * G)=L	
63,0 mm	50,0 mm	56,50 mm	33,9	0,3 mm		
50,0 mm	37,5 mm	43,75 mm	26,3	0,3 mm	78,8	0,3 mm
37,5 mm	28,0 mm	32,75 mm	19,7	0,3 mm	59,0	0,3 mm
28,0 mm	20,0 mm	24,00 mm	14,4	0,15 mm	43,2	0,3 mm
20,0 mm	14,0 mm	17,00 mm	10,2	0,15 mm	30,6	0,3 mm
14,0 mm	10,0 mm	12,00 mm	7,2	0,10 mm	21,6	0,2 mm
10,0 mm	6,3 mm	8,15 mm	4,9	0,10 mm	14,7	0,2 mm

CALCUL

Lorsqu'une masse initiale totale d'une fraction granulométrique du matériel est employée, la masse totale des particules plates et des particules allongées est retenue, telle quelle.

Le pourcentage des particules plates et des particules allongées est le rapport, en pourcentage, entre la somme des masses exprimées précédemment et la somme des masses initiales totales de chaque fraction granulométrique.

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Pour la détermination du pourcentage de particules plates et de particules allongées, les trois fractions granulométriques et les masses de prises d'essais employées sont présentées au tableau 5.

$$\% \text{ particules plates} = \frac{\sum \text{masses des particules plates}}{\sum \text{masses des prises d'essai de chaque granulométrie}} \times 100$$

$$\% \text{ particules allongées} = \frac{\sum \text{masses des particules allongées}}{\sum \text{masses des prises d'essai de chaque granulométrie}} \times 100$$

Tableau 5 Tableau des prises d'essais relatives à la réalisation de l'essai des particules plates et allongées			
Nature du granulat	Ouverture des tamis		Masse de la prise d'essai
	Passant	Retenu	
Béton calcaire	20,0 mm	14,0 mm	721,0 g
	14,0 mm	10,0 mm	350,0 g
	10,0 mm	6,3 mm	129,0 g
Béton dolomitique	20,0 mm	14,0 mm	750,0 g
	14,0 mm	10,0 mm	420,0 g
	10,0 mm	6,3 mm	114,0 g
Béton granitique	20,0 mm	14,0 mm	670,0 g
	14,0 mm	10,0 mm	441,0 g
	10,0 mm	6,3 mm	130,0 g

Détermination de la résistance à la fragmentation au moyen de l'appareil Los Angeles

PRINCIPE DE L'ESSAI

L'essai fait intervenir la résistance à la fragmentation causée par l'impact avec les boulets, de même que la résistance à l'usure créée par frottements réciproques entre les boulets et les particules. Cet essai renseigne donc sur la ténacité (fragmentation) et la dureté (usure) des granulats.

Le nombre de boulets de même que la composition granulométrique du matériel doivent satisfaire aux exigences présentées au tableau 6.

MODE OPÉRATOIRE

- Placer la prise d'essai de même que la charge abrasive adéquate dans l'appareil Los Angeles. Fixer le couvercle solidement, puis démarrer l'appareil pour que le matériau contenu dans le tambour effectue un cycle de rotation de 500 tours à une vitesse comprise entre 30 tours/minute et 33 tours/minute.
- Une fois le cycle terminé, récupérer du cylindre tout le matériel soumis à l'essai. Enlever les boulets, puis procéder à une première séparation, par tamisage mécanique, au moyen d'un tamis dont l'ouverture est de 1,70 mm.
- Peser et noter la masse finale de la partie du granulat ayant été retenue sur le tamis de 1,70 mm.

Tableau 6
Tableau des exigences relatives à la réalisation de l'essai Los Angeles

Ouverture des tamis		Masse de la fraction retenue			
Passant	Retenu	Grade			
		A	B	C	D
40,0 mm	28,0 mm	1 250 g ± 25 g			
28,0 mm	20,0 mm	1 250 g ± 25 g			
20,0 mm	14,0 mm	1 250 g ± 10 g	2 500 g ± 10 g		
14,0 mm	10,0 mm	1 250 g ± 10 g	2 500 g ± 10 g		
10,0 mm	6,3 mm			2 500 g ± 10 g	
6,3 mm	5,0 mm			2 500 g ± 10 g	
5,0 mm	2,5 mm				5 000 g ± 10 g
Nombre de tours		500	500	500	500
Masse pour essai		5 000 g ± 10 g	5 000 g ± 10 g	5 000 g ± 10 g	5 000 g ± 10 g
Nombre de boulets		12	11	8	6
Masse de la charge abrasive		5 000 g ± 25 g	4 584 g ± 25 g	3 330 g ± 20 g	2 500 g ± 15 g

CALCUL

La résistance à l'abrasion au moyen de l'appareil Los Angeles est le pourcentage de particules passant le tamis de 1,70 mm.

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Dans le cas présent, l'essai a été réalisé sur un matériau de grade B, soit sur 2500 g de granulats de chacune des classes granulométriques suivantes : 20-14 mm et 14-10 mm; ce matériau était accompagné d'une charge abrasive de 4566 g. Le tableau 7 présente les prises d'essai.

$$\% \text{ d'abrasion Los Angeles} = \frac{(\text{masse de prise d'essai} - \text{masse finale})}{\text{masse de la prise d'essai}} \times 100$$

Tableau 7
Tableau des prises d'essai relatives à la réalisation de l'essai Los Angeles

Nature du granulat	Ouverture des tamis		Masse de la prise d'essai	Masse de la charge abrasive
	Passant	Retenu		
Béton calcaire	20,0 mm	14,0 mm	2 500 g	4 566 g
	14,0 mm	10,0 mm	2 500 g	
Béton dolomitique	20,0 mm	14,0 mm	2 500 g	4 566 g
	14,0 mm	10,0 mm	2 500 g	
Béton granitique	20,0 mm	14,0 mm	2 500 g	4 566 g
	14,0 mm	10,0 mm	2 500 g	

Détermination de la résistance à la désagrégation au moyen d'une solution de sulfate de magnésium (MgSO₄)

PRINCIPE DE L'ESSAI

L'essai permet d'évaluer la résistance d'un granulat à l'action des agents atmosphériques. Cet essai ne mesure donc pas seulement le comportement du matériau sous l'action du sel, comme plusieurs le pensent, mais la durabilité globale du granulat sous l'action de plusieurs éléments.

Les conditions atmosphériques sont simulées par des cycles successifs de trempage du granulat dans une solution de MgSO₄, puis de séchage à l'étuve. C'est la perte de masse que subit le matériau qui indique sa résistance.

La prise d'essai pour la réalisation de cet essai doit satisfaire aux exigences indiquées au tableau 8.

MODE OPÉRATOIRE

- Immersion complète de la prise d'essai dans un bain contenant une solution de sulfate de magnésium à une température de 21 °C ± 1 °C pour une période d'au moins 16 heures (mais d'au plus 18 heures). La solution doit recouvrir le granulat d'au moins 10 mm.
- Au terme de la période d'immersion, sortir la prise d'essai de la solution, laisser égoutter pendant 15 minutes ± 5 minutes.
- Sécher à température spécifique de 110 °C ± 5 °C dans une étuve jusqu'à masse constante pour une période approximative de 8 heures.
- Répéter les opérations précédentes jusqu'à l'obtention du nombre de cycles désirés.

Ouverture des tamis		Masse de la fraction granulométrique
Passant	Retenu	
10,0 mm	5,0 mm	300 g ± 5 g
20,0 mm dont : 20,0 mm 14,0 mm	10,0 mm 14,0 mm 10,0 mm	1 000 g ± 10 g 670 g ± 10 g 330 g ± 5 g
40,0 mm dont : 40,0 mm 28,0 mm	20,0 mm 28,0 mm 20,0 mm	1 500 g ± 50 g 1 000 g ± 50 g 500 g ± 30 g
80,0 mm dont : 80,0 mm 56,0 mm	40,0 mm 56,0 mm 40,0 mm	5 000 g ± 300 g 3 000 g ± 300 g 2 00 g ± 200 g
112,0 mm	80,0 mm	7 000 g ± 1 000 g

- Après avoir complété le dernier cycle, laisser refroidir le granulat, puis le laver afin d'éliminer toute trace de sulfate de magnésium.

- Une fois le sulfate de magnésium complètement éliminé, sécher la prise d'essai à l'étuve jusqu'à masse constante.

- Tamiser chaque fraction du granulat au moyen du tamis spécifié à cette effet selon la prise d'essai. Les ouvertures de tamis requises sont présentées au tableau 9.

- Peser le matériau retenu sur le tamis puis noter cette masse finale.

CALCUL

La désagrégation au sulfate de magnésium est exprimée par un pourcentage de perte calculé de la façon suivante :

$$\text{désagrégation MgSO}_4 = \frac{(\text{masse de prise d'essai} - \text{masse finale})}{\text{masse de prise d'essai}}$$

Fraction du granulat considérée	Ouverture des tamis
De 80,0 mm à 40,0 mm	31,5 mm
De 40,0 mm à 20,0 mm	16,0 mm
De 20,0 mm à 10,0 mm	8,0 mm
De 10,0 mm à 5,0 mm	4,0 mm

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Pour la réalisation de l'essai, seule la fraction granulométrique comprise entre 20 mm et 10 mm a été retenue. Les prises d'essai ont subi cinq cycles complets d'immersion et de séchage. Le tableau 10 illustre les prises d'essai.

Essai de gel et de dégel des gros granulats immergés dans une solution de chlorure de sodium 3 % (gel ontarien)

PRINCIPE DE L'ESSAI

L'essai de gel ontarien permet de déterminer la résistance des granulats à des cycles répétés de gel-dégel. Cet essai présente toutefois une caractéristique particulière, soit l'immersion de l'échantillon dans une solution de chlorure de sodium avant de procéder aux cycles de gel-dégel.

La prise d'essai nécessaire à la réalisation de cet essai doit satisfaire aux conditions présentées au tableau 11.

Ouverture des tamis		Masse de la prise d'essai
Passant	Retenu	
20,0 mm	14,0 mm	1 250 g
14,0 mm	10,0 mm	1 000 g
10,0 mm	5,0 mm	500 g

Nature du granulat	Ouverture des tamis		Masse de la prise d'essai
	Passant	Retenu	
Béton calcaire	20,0 mm	14,0 mm	670 g
	14,0 mm	10,0 mm	330 g
Béton dolomitique	20,0 mm	14,0 mm	670 g
	14,0 mm	10,0 mm	330 g
Béton granitique	20,0 mm	14,0 mm	670 g
	14,0 mm	10,0 mm	330 g

MODE OPÉRATOIRE

- Immersion des granulats dans une solution de chlorure de sodium à 3 % pour une durée de 24 heures.
- Placer par la suite chacune des fractions granulométriques dans un récipient étanche résistant à de grands écarts de température (un pot Masson est idéal). Prendre soin de laisser une petite quantité de solution de NaCl dans le récipient (environ 1 cm) pour assurer une humidité relative de 100 %.
- Mettre les récipients contenant la prise d'essai en chambre thermique pour cinq cycles consécutifs de gel-dégel³.
- Lorsque tous les cycles sont terminés, laver le granulat puis le sécher à l'étuve jusqu'à masse constante.
- Tamiser le granulat sec sur le tamis original selon la granulométrie, peser le matériau retenu sur chaque tamis puis noter sa masse.

CALCUL

La résistance aux cycles de gel-dégel s'exprime en pourcentage de perte subie à l'essai.

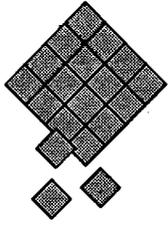
$$\% \text{ perte à l'essai} = \frac{\text{masse initiale} - \text{masse retenue sur tamis}}{\text{masse initiale}}$$

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les échantillons soumis à l'essai ont subi cinq cycles complets de gel-dégel. Le tableau 12 présente les matériaux et les fractions granulométriques retenus pour effectuer l'essai.

Nature du granulat	Ouverture des tamis		Masse de la prise d'essai
	Passant	Retenu	
Béton calcaire	20,0 mm	14,0 mm	1 250 g
	14,0 mm	10,0 mm	1 000 g
	10,0 mm	5,0 mm	500 g
Béton dolomitique	20,0 mm	14,0 mm	1 250 g
	14,0 mm	10,0 mm	1 000 g
	10,0 mm	5,0 mm	500 g
Béton granitique	20,0 mm	14,0 mm	1 250 g
	14,0 mm	10,0 mm	1 000 g
	10,0 mm	5,0 mm	500 g

³ : Un cycle complet de gel-dégel comprend 16 heures de gel à -15 °C et 8 heures de dégel à 30 °C



Essais sur les bétons

Généralités et présentation des mélanges effectués

Puisque l'étude des propriétés des nouveaux bétons n'est pas le principal objet de ce projet, seules quelques observations sur les résultats obtenus seront faites.

Les mélanges de béton de ciment effectués sont de même composition dans les trois cas; seule la nature du granulat diffère. Le mélange choisi est celui d'un béton standard (*plain concrete*). Les bétons possèdent tous le même rapport eau-ciment et ne contiennent ni air entraîné, ni adjuvants chimiques. Aux tableaux 27, 28 et 29 (Calcul du mélange de béton), on trouve tous les renseignements quant aux mélanges effectués, de même que les tests auxquels ont été soumis ces mélanges.

Essai d'affaissement au cône

Cet essai mesure la maniabilité du béton. Les devis de construction mentionnent habituellement des plages de valeurs à respecter pour le test d'affaissement. La maniabilité du béton peut être contrôlée, selon les besoins, en faisant varier le rapport eau-ciment du mélange ou, tout simplement, en utilisant des adjuvants chimiques. Le tableau 13 présente des valeurs d'affaissement couramment utilisées en fonction de l'utilisation des bétons.

Types de construction	Affaissement	
	Maximal	Minimal
Murs de fondation et assises armées	80 mm	20 mm
Assises, caissons et murs non armés	80 mm	20 mm
Dalles, poutres et murs armés	100 mm	50 mm
Colonnes d'édifice	100 mm	50 mm
Tablier de pont	50 mm	20 mm
Pavages	50 mm	20 mm
Trottoirs, entrées de garage et dalles sur le sol	80 mm	20 mm
Béton de masse	50 mm	0 mm

Détermination de la quantité d'air présente dans le béton frais

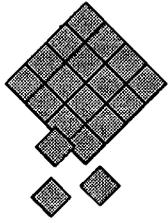
Cet essai a pour but d'établir le pourcentage d'air contenu dans le mélange de béton frais. Un béton comportant une quantité d'air adéquate se montre généralement plus résistant aux cycles de gel et de dégel ainsi qu'à l'écaillage; l'air améliore également de façon significative sa maléabilité. Cependant, un pourcentage d'air trop élevé dans le mélange aura pour effet d'en diminuer considérablement la résistance en compression. L'emploi d'agents entraîneurs d'air permet d'obtenir le niveau d'air désiré dans le béton (ordinairement une teneur de 1 % à 8 % est appréciable), sous

forme de minuscules bulles d'air uniformément distribuées.

Détermination de la résistance en compression du béton à 28 jours

Cet essai s'effectue sur des cylindres de béton de dimensions normalisées⁴. Les cylindres d'essai doivent être éprouvés à l'âge de 28 jours. Plusieurs paramètres de confection du mélange peuvent affecter la résistance en compression du béton hydraté comme, par exemple, le rapport eau-ciment, le pourcentage d'air entraîné, la liaison entre la pâte de ciment et le granulat et, finalement, l'âge du béton.

⁴ : Cylindres de 100 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur.



Présentation et interprétation des résultats



Essais sur les granulats recyclés

Présentation des résultats obtenus aux essais

Tous les essais physico-mécaniques ont été réalisés en respectant la procédure normalisée présentement en vigueur au ministère des Transports du Québec. Les résultats obtenus à la suite des différents essais pour chacun des granulats sont présentés au tableau 14.

Classification et caractéristiques des granulats

CLASSIFICATION PRÉLÉMINAIRE DES MATÉRIAUX

Quel que soit l'usage envisagé des granulats, ces derniers doivent d'abord être classifiés, comme le stipule la norme 2101 du ministère des Transports du Québec, selon les deux critères suivants :

- 1) caractéristiques intrinsèques (résistance à l'usure et aux chocs des particules);
- 2) caractéristiques de fabrication (pourcentage de fragmentation et forme des particules).

Une classe de 1 à 6 est attribuée en ce qui a trait aux propriétés intrinsèques du matériau, tandis qu'une cote variant de a à e est accordée pour les propriétés de fabrication. Les exigences relatives à cette évaluation sont présentées aux tableaux 15 et 16.

Essais	Béton calcaire	Béton dolomitique	Béton granitique
Durabilité MgSO ₄	1,73	2,89	2,44
Fragmentation Los Angeles	37,60	32,86	38,74
Attrition Micro-Deval	24,00	16,40	19,00
Absorption	4,94	4,89	4,80
Densité	2,30	2,41	2,38
Particules plates	9,53	17,39	16,44
Particules allongées	32,46	43,29	35,74
Gel ontarien	10,49	11,78	6,25

Caractéristiques	Catégories					
	1	2	3	4	5	6
Micro-Deval	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 35	≤ 40
Los Angeles ⁵	≤ 35	≤ 45	≤ 50	≤ 50	≤ 50	≤ 50
Micro-Deval + Los Angeles	≤ 40	≤ 55	≤ 70	≤ 75	≤ 80	≤ 85

Caractéristiques	Catégories				
	a	b	c	d	e
Fragmentation (%)	100	≥ 75	≥ 60	≥ 60	≥ 50
Particules plates (%)	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 30	---
Particules allongées (%)	≤ 40	≤ 40	≤ 45	≤ 50	---

⁵ : La perte maximale à l'essai Los Angeles est de 32 % pour les granulats de type calcaire ou dolomitique.

Les résultats du classement établi pour les matériaux recyclés sont présentés aux tableaux 17 et 18. La classification a été faite dans le respect des normes du ministère des Transports du Québec, au regard des essais de résistance mécanique considérés (essais Los Angeles et Micro-Deval) de même que du caractère de fabrication des granulats.

DÉTERMINATION DE LA POSSIBILITÉ D'UTILISATION DES GRANULATS DANS LES BÉTONS DE CIMENT

Les exigences relatives aux granulats servant dans la confection de béton de ciment de masse volumique normale sont évaluées selon les critères présentés au tableau 19, tirés de la norme 3101 du ministère des Transports du Québec. Ces critères d'évaluation sont basés sur les caractéristiques intrinsèques des granulats, de même que sur leur mode de fabrication, tel qu'il est mentionné précédemment à l'étape de la classification préliminaire.

Au moyen des résultats de la classification préliminaire de chacun des matériaux recyclés et des exigences relatives aux granulats pour béton de ciment, il est possible de qualifier les matériaux comme étant aptes à être employés dans les mélanges de béton de ciment. Cependant, les matériaux en cause ne peuvent être utilisés dans la fabrication de pavages.

Tableau 17
Classification des granulats selon leurs caractéristiques intrinsèques de résistance à l'usure et aux chocs

Essais	Béton calcaire	Béton dolomitique	Béton granitique
Fragmentation Los Angeles	37,60	32,86	38,74
Attrition Micro-Deval	24,00	16,40	19,00
Los Angeles + Micro-Deval	61,60	49,26	57,74
Classification (catégorie)	3	2	3

Tableau 18
Classification des granulats selon leurs caractéristiques de fragmentation et de forme

Essais	Béton calcaire	Béton dolomitique	Béton granitique
Fragmentation (%)	100,0	100,0	100,0
Particules plates (%)	9,53	17,39	16,44
Particules allongées (%)	32,46	43,29	35,74
Classification (cote)	a	c ⁶	a

Tableau 19
Exigences relatives aux granulats grossiers pour bétons de ciment

Caractéristiques	Usages possibles	
	Pavages	Autres usages ⁷
Intrinsèques (catégorie)	1	3,2 ou 1
De fabrication (cote)	b ou a	c, b ou a

⁶ : La faible cote attribuée est facilement explicable par l'emploi des concasseurs à mâchoires au moment de la fabrication des matériaux. En effet, ces derniers ont la réputation de produire un grand nombre de particules plates et allongées.

⁷ : On sous-entend par *autres usages* : les bétons de fondations, les poutres de béton, les panneaux de béton préfabriqués, les blocs pour remblai, etc.

Comparaison entre le granulat original et le granulat enrobé d'une pâte de ciment

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Comme la nature et la provenance des granulats ayant servi à la confection du premier mélange de ciment sont connues, une comparaison de performance entre celui-ci et le granulat recyclé est possible. Les tableaux 20, 21 et 22 présentent toutes les données de base nécessaires à la comparaison des matériaux.

À première vue, on remarque pour les deux premiers matériaux recyclés, soit le calcaire et la dolomie, un déclassement par rapport au granulat original. Seul le granite recyclé n'a pas subi ce déclassement par rapport au matériau original. Cependant, une étude comparative plus détaillée des résultats obtenus par rapport à chacun des essais doit être effectuée. C'est ce dont traitera le prochain paragraphe.

Essai	Résultats du calcaire original de Verreault-Frontenac	Résultats du granulat calcaire recyclé
MgSO ₄	4,20 %	1,73 %
Los Angeles	24,30 %	37,60 %
Micro-Deval	17,40 %	24,00 %
Absorption	0,75 %	4,94 %
Densité	2,66 %	2,30 %
Classement	2	3

Essai	Résultats de la dolomie originale de la carrière Mirabel	Résultats du granulat dolomitique recyclé
MgSO ₄	2,16 %	2,89 %
Los Angeles	17,80 %	32,86 %
Micro-Deval	8,70 %	16,40 %
Absorption	0,65 %	4,89 %
Densité	2,77 %	2,41 %
Classement	1	2

Essai	Résultats du granite original de la carrière Bédard	Résultats du granulat granitique recyclé
MgSO ₄	3,20 %	2,44 %
Los Angeles	46,90 %	38,74 %
Micro-Deval	13,40 %	19,00 %
Absorption	0,98 %	4,80 %
Densité	2,63 %	2,38 %
Classement	3	3

INTERPRÉTATION DES ÉCARTS PAR RAPPORT AUX ESSAIS ENTRE LE MATÉRIAU RECYCLÉ ET LE GRANULAT ORIGINAL

Détermination de la résistance à la désagrégation par une solution de sulfate de magné- sium ($MgSO_4$)

Une meilleure performance est observée à l'essai de durabilité au sulfate de magnésium ($MgSO_4$) pour deux des matériaux recyclés, dont le calcaire, qui a habituellement de mauvaises performances à cet essai. Ce phénomène est explicable par la plus grande porosité des matériaux constitués en partie de pâte de ciment (le ciment étant beaucoup plus poreux qu'un granulats quelconque). Cette grande porosité permet donc aux phénomènes associés au gel d'agir⁸ dans le granulats, sans trop le désagréger. Toutefois, c'est avec réserve que cette hypothèse est présentée, car cet essai présente une très faible répétabilité⁹ et une très faible reproductivité¹⁰, ce qui pourrait faire varier grandement les résultats obtenus.

Détermination de la résistance à la fragmentation au moyen de l'appareil Los Angeles

Le calcaire recyclé de même que la dolomie recyclée ont connu une contreperformance à l'essai de résistance à la fragmentation par rapport à leur homologue original. Seul le matériau recyclé granitique a offert une meilleure performance.

Il est connu que les granites, en raison de leur composition en quartz (matériau cassant), ont généralement de mauvaises performances à l'essai Los Angeles. Il serait donc possible que le granulats granitique enrobé de pâte de ciment ait de meilleures performances à cet essai justement en raison de cette pâte de ciment qui, par sa porosité et son caractère plus spongieux, confère au granite une protection contre la fragmentation causée par les chocs.

Détermination de la résis- tance à l'attrition au moyen de l'appareil Micro-Deval en condition humide

De façon générale, les matériaux recyclés n'ont pas eu de bonnes performances au test d'attrition mécanique en milieu humide. La pâte de ciment étant beaucoup moins résistante à l'usure causée par une combinaison de frottements réciproques et de chocs modérés que le granulats original, son coefficient de perte à l'essai est plus grand. On peut donc prévoir une baisse de la résistance à l'usure et une baisse de résistance à la fatigue des nouveaux bétons de ciment.

Détermination de la densité et de l'absorption

Comme il était à prévoir, tous les granulats recyclés ont démontré une densité légèrement plus faible et une absorption beaucoup plus élevée que le granulats original. Cependant, des valeurs assez semblables ont été obtenues pour les trois matériaux.

En effet, la pâte de ciment recouvrant les granulats confère aux matériaux une plus grande porosité, une surface spécifique beaucoup plus grande de même qu'un microrelief plus important. Ces facteurs contribuent en grande partie à déterminer la capacité d'absorption d'eau du granulats. C'est pourquoi, à l'étape de l'élaboration de la nouvelle formule de béton, une grande quantité d'eau a dû être utilisée pour conserver un rapport eau-ciment de 0,45 (voir tableaux 27, 28 et 29).

La plus grande porosité de la pâte de ciment contribue également à la diminution de la densité du matériel. Cette perte de densité est toutefois proportionnelle à la quantité de pâte de ciment recouvrant le granulats.

⁸ : Lorsqu'elle gèle, l'eau subit une augmentation de volume de 9 %, occasionnant ainsi des surpressions internes dans le granulats. Cependant, la désagrégation n'est pas seulement causée par ce phénomène ; il faut aussi tenir compte des pressions hydrauliques produites par l'eau expulsée à l'occasion du dégel.

⁹ : La *répétabilité* d'un essai est l'écart entre les différents résultats obtenus lorsque cet essai est répété sur le même lot de granulats, par le même opérateur, selon la même procédure et avec le même équipement (donc dans un même laboratoire).

¹⁰ : La *reproductibilité* correspond au même écart, mais lorsque les essais sont répétés sur le même lot par des laboratoires différents. Normalement, cette erreur est supérieure à l'erreur de répétabilité.



Essais sur les nouveaux mélanges de béton de ciment

Présentation des résultats obtenus aux essais sur les bétons

Tous les essais sur les bétons ont été réalisés en respectant la procédure normalisée présentement en vigueur au ministère des Transports du Québec. Les résultats obtenus aux différents essais sur les bétons sont présentés au tableau 23.

Interprétation des résultats obtenus aux essais sur les bétons

DÉTERMINATION DE L'AFFAISSEMENT

Le tableau 24 présente les résultats sur l'affaissement obtenus sur les bétons frais. Tel qu'il a été mentionné auparavant, cet essai est un indicateur de la maniabilité du béton.

Les résultats obtenus démontrent des valeurs nettement trop élevées. Par contre, il n'est pas surprenant d'obtenir ces affaissements étant

Type de béton	Affaissement	Teneur en air	Résistance en compression
Béton calcaire recyclé	120 mm	5 %	34,7 MPa
Béton dolomitique recyclé	160 mm	1,70 %	43,7 MPa
Béton granitique recyclé	110 mm	2 %	41,2 MPa

donné les quantités d'eau utilisées dans le mélange (tableaux 27, 28 et 29). Même si les matériaux recyclés présentent une grande capacité d'absorption en raison de leur porosité et de leur surface spécifique, il semble bien qu'ils ne soient pas en mesure de le faire rapidement.

DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN AIR

Le tableau 25 présente les quantités d'air mesurées dans les mélanges de béton frais. Cette mesure a été prise seulement pour satisfaire notre curiosité, puisqu'aucun entraîneur d'air n'a été utilisé pour la fabrication

du béton, ce qui laisse sous-entendre une quantité d'air de l'ordre de 2 %.

Deux des mélanges se sont comportés selon les prédictions. Cependant, le béton calcaire a présenté une teneur en air de 5 %, ce qui est facilement comparable à un mélange auquel un entraîneur d'air aurait été ajouté. Ce phénomène est difficilement explicable et pourrait être le fruit d'une erreur expérimentale. Par contre, si l'on part du fait que cette teneur en air est réelle, on peut donc entrevoir pour ce béton une résistance au gel accrue, mais une résistance en compression beaucoup plus faible.

Type de béton	Affaissement
Béton calcaire recyclé	120 mm
Béton dolomitique recyclé	160 mm
Béton granitique recyclé	110 mm

Type de béton	Teneur en air
Béton calcaire recyclé	5 %
Béton dolomitique recyclé	1,70 %
Béton granitique recyclé	2 %

DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION

Pour établir la résistance en compression des bétons, des essais de compression ont été réalisés sur des cylindres de béton après 28 jours de mûrissement en conditions idéales. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 26.

Les résultats obtenus au test de compression semblent être bons. Aucune donnée sur la résistance en compression à 28 jours des bétons préparés avec la pierre de carrière originale n'étant disponible, il est difficile de comparer les deux matériaux. Cependant, comme la règle de l'art mentionne qu'un béton doit avoir une résistance en com-

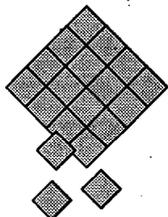
pression d'au moins 30 MPa, il est possible de qualifier les nouveaux bétons de résistants.

Cette bonne résistance peut être le résultat d'une bonne liaison entre la pâte et le granulat. En effet, comme le granulat recyclé présente un microrelief plus important et une forme beaucoup moins régulière, sa liaison avec la matrice de ciment est plus forte. De plus, les caractères mentionnés

Tableau 26
Tableau des résultats aux essais de résistance en compression à 28 jours

Type de béton	Résistance en compression	Résistance moyenne
Béton calcaire recyclé	35,2 MPa 34,7 MPa 34,1 MPa	34,7 MPa
Béton dolomitique recyclé	45,4 MPa 42,3 MPa 43,5 MPa	43,7 MPa
Béton granitique recyclé	40,2 MPa 42,6 MPa 40,8 MPa	41,2 MPa

précédemment augmentent sa surface spécifique, c'est-à-dire que le matériau recyclé présente une plus grande surface de contact.



Conclusion

La possibilité de fabriquer des granulats à béton à partir d'un béton déjà hydraté vient maintenant d'être établie. Le fait d'avoir utilisé trois bétons différents, à savoir un béton calcaire, un béton à hautes performances et un béton granitique pour la réalisation des essais a démontré qu'il n'existe pratiquement aucune différence entre les matériaux recyclés, quelle que soit leur provenance.

Les résultats obtenus à la suite des essais physico-mécaniques démontrent qu'il est possible de récupérer les bétons présentement en service afin de les recycler comme granulats grossiers dans les mélanges de bétons de ciment. Cependant, l'usage de ces nouveaux bétons doit être restreint. En raison de la faible performance à l'essai de résistance à

l'attrition au moyen de l'appareil Micro-Deval sur le matériau recyclé, les nouveaux bétons ne peuvent pour aucune considération servir à la réalisation de pavages, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur. Il ne serait également pas recommandé d'employer ces bétons à la réalisation d'ouvrages devant être soumis à des conditions de gel intense, et ce, pour deux raisons :

- 1) la grande propriété d'absorption du granulat rend nécessaire l'utilisation d'une très grande quantité d'eau à l'étape de la confection du mélange;
- 2) le granulat recyclé a présenté une faible résistance à la détérioration au cours de simulations de cycles de gel et de dégel (essai de gel ontarien).

Pour ce qui est des résistances en compression mesurées après 28 jours de mûrissement sur les cylindres de nouveaux bétons, elles se sont montrées satisfaisantes. C'est donc dire qu'un usage domestique serait tout indiqué pour ces bétons composés de matériaux recyclés.

Par ailleurs, il serait intéressant d'effectuer d'autres essais de résistance aux cycles de gel et de dégel sur les nouveaux bétons, mais en prenant soin cette fois d'entraîner de l'air à l'étape de la fabrication du mélange. Ces essais pourraient donner des indications sur l'effet de l'utilisation d'une grande quantité d'eau à l'étape de la fabrication des mélanges de béton. De plus, il serait certainement possible d'observer un effet sur l'écaillage du béton.

Une étude similaire pourrait également être faite, mais avec des bétons de départ éprouvés en compression après 28 jours de mûrissement. Les résultats en compression des deux

bétons pourraient alors être comparés.

Enfin, pour observer à long terme le comportement des bétons recyclés

dans la nouvelle pâte de ciment, il serait intéressant d'effectuer une étude sur les réactions alcalis-granulat afin d'analyser l'effet de l'ancienne pâte de ciment dans le nouveau mélange.

Tableau 27
Calcul du mélange de béton

ÉCHANTILLON : GRANITE
ESSAI : Cylindre compression (4 po)

Date : Octobre 1995

VARIABLES

Teneur en ciment :	375 kg/m ³	N ^{bre} de prismes :	0 (75 x 75 x 305)
Rapport E/C :	0,45	N ^{bre} de cylindres :	3 (100 x 200 mm)
Quantité d'alcalis :	— %	Volume de béton :	0,0047 m ³
Teneur en air :	1,5 %	ou :	0,17 pi ³
Densité (sss) pierre :	2380 kg/m ³	Type de ciment :	Cim. Québec, 10 norm.
Absorption pierre :	4,80 %	Teneur en alcalis :	0,97 % Na ₂ O eq.
Densité (sss) sable :	2680 kg/m ³	Origine du sable :	Chevalier (granitique)
Absorption sable :	0,50 %	Module de finesse :	2,65

CALCUL DES VOLUMES

Ciment :	0,12 m ³
Eau :	0,17 m ³
Pierre (60 %) :	0,42 m ³
Sable (40 %) :	0,28 m ³
Air :	0,015 m ³
Total :	1 m³

POIDS PAR m³

Ciment :	375,0 kg
Eau :	168,8 kg
Pierre :	995,6 kg
Sable :	747,4 kg
Total:	2286,8 kg/m³

QUANTITÉS THÉORIQUES

Ciment :	1,77 kg
Eau :	0,80 kg
Pierre :	4,69 kg
Sable :	3,52 kg
Total :	10,78 kg

CALCUL DES ALCALIS

Na ₂ O du ciment :	0,033 kg
Na ₂ O voulu :	#VALEUR! kg
Quantité à ajouter :	#VALEUR! kg

NaOH à utiliser : #VALEUR! g

QUANTITÉS RÉELLES

Ciment :	3,41 kg
Eau (y compris absorption):	2,00 kg
Pierre :	9,05 kg
Sable :	6,79 kg
Total (+10 kg) :	20,78 kg

DOSAGE DE A.E.A. 0 ml/kg cim.

A.E.A. à utiliser : 0,00 ml

EAU ABSORBÉE

Pierre :	0,434 kg
Sable :	0,034 kg

DISTRIBUTION DE LA PIERRE

Pierre 5-10 mm (1/3) :	3,01 kg
Pierre 10-14 mm (1/3) :	3,01 kg
Pierre 14-20 mm (1/3) :	3,01 kg
Total :	9,04 kg

RÉSULTATS

Date de coulée :	19-10-95
Opérateurs :	J.F. et D.G.
Affaissement :	110 mm
Teneur en air :	2 %
Masse volumique :	2305 kg/m ³

Tableau 28
Calcul du mélange de béton

ÉCHANTILLON : DOLOMIE
ESSAI : Cylindre compression (4 po)

Date : Octobre 1995

VARIABLES

Teneur en ciment :	375 kg/m ³	N ^{bre} de prismes :	0 (75 x 75 x 305)
Rapport E/C :	0,45	N ^{bre} de cylindres :	3 (100 x 200 mm)
Quantité d'alcalis :	— %	Volume de béton :	0,0047 m ³
Teneur en air :	1,5 %	ou :	0,17 pi ³
Densité (sss) pierre :	2410 kg/m ³	Type de ciment :	Cim. Québec, 10 norm.
Absorption pierre :	4,90 %	Teneur en alcalis :	0,97 % Na ₂ O eq.
Densité (sss) sable :	2680 kg/m ³	Origine du sable :	Chevalier (granitique)
Absorption sable :	0,50 %	Module de finesse :	2,65

CALCUL DES VOLUMES

Ciment :	0,12 m ³
Eau :	0,17 m ³
Pierre (60 %) :	0,42 m ³
Sable (40 %) :	0,28 m ³
Air :	0,015 m ³
Total :	1 m³

POIDS PAR m³

Ciment :	375,0 kg
Eau :	168,8 kg
Pierre :	1008,2 kg
Sable :	747,4 kg
Total :	2299,3 kg/m³

QUANTITÉS THÉORIQUES

Ciment :	1,77 kg
Eau :	0,80 kg
Pierre :	4,75 kg
Sable :	3,52 kg
Total :	10,84 kg

CALCUL DES ALCALIS

Na ₂ O du ciment	0,033 kg
Na ₂ O voulu	#VALEUR! kg
Quantité à ajouter	#VALEUR! kg
NaOH à utiliser :	#VALEUR! g

QUANTITÉS RÉELLES

Ciment :	3,40 kg
Eau (y compris absorption):	2,01 kg
Pierre :	9,14 kg
Sable :	6,77 kg
Total (+10 kg) :	20,84 kg

DOSAGE DE A.E.A.

A.E.A. à utiliser :	0 ml/kg cim. 0,00 ml
---------------------	--------------------------------

EAU ABSORBÉE

Pierre :	0,448 kg
Sable :	0,034 kg

DISTRIBUTION DE LA PIERRE

Pierre 5-10 mm (1/3) :	3,04 kg
Pierre 10-14 mm (1/3) :	3,04 kg
Pierre 14-20 mm (1/3) :	3,04 kg
Total :	9,13 kg

RÉSULTATS

Date de coulée :	19-10-95
Opérateurs :	J.F. et D.G.
Affaissement :	160 mm
Teneur en air :	1,7 %
Masse volumique :	2310 kg/m ³

Tableau 29
Calcul du mélange de béton

ÉCHANTILLON : CALCAIRE
ESSAI : Cylindre compression (4 po)

Date : Octobre 1995

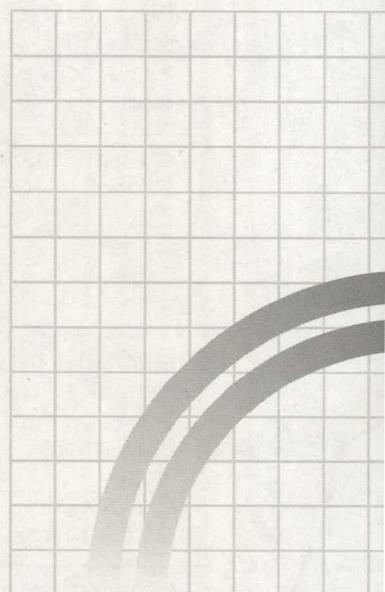
VARIABLES			
Teneur en ciment :	375 kg/m ³	N ^{bre} de prismes :	0 (75 x 75 x 305)
Rapport E/C :	0,45	N ^{bre} de cylindres :	3 (100 x 200 mm)
Quantité d'alcalis :	— %	Volume de béton :	0,0047 m ³
Teneur en air :	1,5 %	ou :	0,17 pi ³
Densité (sss) pierre :	2300 kg/m ³	Type de ciment :	Cim. Québec, 10 norm.
Absorption pierre :	4,90 %	Teneur en alcalis :	0,97 % Na ₂ O eq.
Densité (sss) sable :	2680 kg/m ³	Origine du sable :	Chevalier (granitique)
Absorption sable :	0,50 %	Module de finesse :	2,65
CALCUL DES VOLUMES		POIDS PAR m³	
Ciment :	0,12 m ³	Ciment :	375,0 kg
Eau :	0,17 m ³	Eau :	168,8 kg
Pierre (60 %) :	0,42 m ³	Pierre :	962,1 kg
Sable (40 %) :	0,28 m ³	Sable :	747,4 kg
Air :	0,015 m ³		
Total :	1 m³	Total :	2253,3 kg/m³
QUANTITÉS THÉORIQUES		CALCUL DES ALCALIS	
Ciment :	1,77 kg	Na ₂ O du ciment :	0,033 kg
Eau :	0,80 kg	Na ₂ O voulu :	#VALEUR! kg
Pierre :	4,53 kg	Quantité à ajouter :	#VALEUR! kg
Sable :	3,52 kg		
Total :	10,62 kg	NaOH à utiliser :	#VALEUR! g
QUANTITÉS RÉELLES		DOSAGE DE A.E.A.	
Ciment :	3,43 kg	A.E.A. à utiliser :	0,00 ml
Eau (y compris absorption) :	2,01 kg		
Pierre :	8,80 kg	EAU ABSORBÉE	
Sable :	6,84 kg	Pierre :	0,431 kg
Total (+10 kg) :	20,62 kg	Sable :	0,034 kg
DISTRIBUTION DE LA PIERRE		RÉSULTATS	
Pierre 5-10 mm (1/3) :	2,93 kg	Date de coulée :	19-10-95
Pierre 10-14 mm (1/3) :	2,93 kg	Opérateurs :	J.F. et D.G.
Pierre 14-20 mm (1/3) :	2,93 kg	Affaissement :	120 mm
Total :	8,80 kg	Teneur en air :	5 % ?
		Masse volumique :	2207 kg/m ³

RÉFÉRENCES

Essais concernant le béton, Association canadienne de normalisation, 1994, 390 p.

BÉRUBÉ, Marc-André. Notes du cours de Technologie des granulats GGL-18832, septembre 1994, 301 p.

KOSMATKA, Steven H., PANARESE, William C., ALLEN, Gerald E. et CUMMING, Stanley. *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, Association canadienne du ciment Portland, cinquième édition métrique canadienne, 1991, 213 p.



MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 093 392



Transports
Québec