

DÉVELOPPEMENT DE MÉLANGES ET UTILISATION DU BÉTON LÉGER HAUTE PERFORMANCE DANS LE CADRE DE TRAVAUX VISANT LE REMPLACEMENT DE TABLIERS DE PONTS

Guy Mailhot, ing., M. Eng.
Glen P. Carlin, ing., FCSCE

Les Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée, Longueuil

Résumé

Des études de cas et les résultats d'essais en laboratoire réalisés pour le compte de *Les Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée* (PJCCI) en vue de développer des mélanges de béton léger haute performance (BLHP) pour le remplacement de tabliers de ponts est l'objet de cette communication.

En premier lieu, la communication expose des cas pratiques d'utilisation du béton léger aux États-Unis, pour la construction d'ouvrages d'art, dont un nombre important sont exploités en milieux marins. Également présentés sont des cas d'applications du béton léger haute performance pour la construction de ponts d'envergures principalement en Norvège, un chef de file mondial dans le domaine.

En deuxième lieu, la communication expose les résultats d'un programme d'essais visant l'élaboration de mélanges de béton léger haute performance (BLHP) et la réalisation d'essais de caractérisation des granulats et du béton durci, incluant des essais de durabilité. Ceci vise à démontrer la faisabilité de produire au Québec un BLHP avec une résistance à la compression de 50 à 55 MPa à 28 jours et ayant une masse volumique comprise entre 1 900 et 1 950 kg/m³, soit une réduction d'environ 22 % de la masse volumique par rapport à un BHP de densité normale.

La communication fait également une comparaison des résultats d'essais obtenus sur les granulats et les bétons durcis fabriqués à partir de granulats provenant de trois fournisseurs différents. Les essais décrits à cet égard concernent la caractérisation en matière de granulométrie, propreté, pourcentage de particules fracturées/plates/allongées de même que leurs résistances à l'abrasion. Pour le béton durci, les résultats relatifs à la résistance en compression des trois mélanges, leurs masses volumiques, les réseaux de vides d'air, les résistances à la pénétration des ions chlorures, les résistances aux cycles de gel et de dégel de même que les résistances à l'écaillage obtenues pour les trois mélanges sont présentés et commentés. L'ensemble des résultats obtenus est comparé aux normes appropriées du MTQ et aux normes canadiennes.

Finalement, la communication expose les avantages et inconvénients liés à l'utilisation du BLHP, notamment dans le contexte de travaux de remplacement de tablier de béton au Québec.

1. Introduction et mise en contexte

En 2001 et 2002, la Société *Les Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée* (PJCCI) a procédé au remplacement de l'ensemble du tablier du pont Jacques-Cartier au moyen de panneaux préfabriqués faits de béton haute performance qui ont été post-tensionnés dans les sens longitudinal et transversal après leurs installations sur le pont [1] [2]. Ce projet, réalisé au coût de 120 M\$ et impliquant la reconstruction de plus de 62 000 m² de tablier a nécessité l'installation de 1680 panneaux préfabriqués (principalement lors de fermetures de nuit) et représente le plus grand projet de réfection de pont jamais réalisé au Canada.

Confrontée à un projet d'une envergure comparable qui vise le remplacement du tablier du pont Honoré-Mercier (Fig. 1), la Société a entrepris une revue de la littérature scientifique et a commandé des essais en laboratoires en vue d'évaluer la faisabilité technique et l'avantage à combiner, pour le remplacement du tablier de ce pont, un béton léger à haute performance (BLHP) avec un système de panneaux préfabriqués similaires à celui utilisé pour le pont Jacques-Cartier.



Figure 1 – Pont Honoré-Mercier enjambant le fleuve et la voie-maritime du St-Laurent

Bien que la norme *CAN/CSA S6-F06 Code canadien sur le calcul des ponts routiers* prévoit des prescriptions pour le calcul des ponts incorporant un béton léger ou semi-léger et que des exigences techniques pour la conception d'ouvrages utilisant de tels matériaux existent déjà depuis plusieurs années dans les normes de conception canadiennes telles que la norme *CSA A23.3 Design of Concrete Structures*, les bétons légers ou semi-légers semblent avoir très rarement été utilisés au Québec pour la construction de nouveaux ponts ou la réfection de tablier de ponts. Toutefois, un survol sommaire par les auteurs de la littérature scientifique a permis de constater que le béton léger (lightweight aggregate concrete) a été utilisé dans la réalisation d'un grand nombre d'ouvrages aux Etats-Unis, incluant plusieurs projets d'envergures et plusieurs cas impliquant le remplacement de dalle de tablier. Aussi, les recherches bibliographiques nous apprennent que la Norvège utilise fréquemment le béton léger haute performance pour la construction de ponts dans ce pays [3].

Au niveau canadien, l'existence de quelques grands ouvrages incorporant des granulats légers construits et exploités au Canada est significative. Ces premières constatations ont mené PJCCI à conclure qu'un examen plus détaillé de la technologie du BLHP comprenant l'identification de sources potentielles de granulats légers, l'évaluation des implications financières et la mise sur pied d'un programme destiné à développer des mélanges et à entreprendre des essais pour déterminer la résistance, la durabilité et la masse volumique de divers mélanges de béton incorporant des granulats légers était opportun et souhaitable.

2. Utilisation du béton léger pour les ponts et ouvrages en milieu marin

2.1 Étude de la firme T.Y Lin International

Une revue technologique exhaustive portant sur la conception, la construction, l'entretien et la durabilité d'ouvrages d'art construits avec des bétons légers a été réalisée par la firme d'ingénieurs conseil T.Y. Lin International pour le compte du Federal Highways Administration des États-Unis.

La revue technologique portait entre autres sur l'historique d'utilisation des bétons légers, les caractéristiques intrinsèques et la fabrication des granulats légers, le « state-of-the-art » de ce matériau pour la construction de ponts aux États-Unis, au Canada et en Europe. Aussi, les avantages et les inconvénients associés à l'utilisation de bétons constitués de gros granulats légers et de granulats fins de faible masse volumique de même que les particularités techniques associées à la construction d'ouvrages en béton léger précontraint ont été traités.

Bien que cette revue technologique soit quelque peu périmée, le rapport d'étude présente néanmoins des données intéressantes de même que plusieurs recommandations pertinentes à l'égard de l'utilisation de ce matériau. Entre autres, le rapport d'étude souligne qu'en date de 1984, plus de 400 ponts avaient été construits aux États-Unis au moyen d'un béton léger avec un sommet de son utilisation vers le milieu des années cinquante. Des ouvrages recensés par les auteurs de l'étude, environ 55 % des ouvrages comportaient une dalle en béton léger supportée par une superstructure en acier.

Par ailleurs, l'étude de T.Y. Lin International fait référence à un sondage réalisé en 1960 auprès d'ingénieurs concepteurs de ponts et de gestionnaires d'infrastructures routières selon lequel le béton léger avait été utilisé pour la construction d'un nombre restreint de ponts au Canada, soit sept en Colombie-Britannique, trois en Ontario et un en Alberta. Aussi, les auteurs de l'étude ont souligné le fait qu'à leur connaissance, aucun pont ne semblait avoir été construit au Canada avec ce matériau entre 1960 et 1980, apparemment en raison d'un problème d'approvisionnement en granulats légers de qualité appropriés.

2.2 Expérience norvégienne en matière d'ouvrages incorporant un béton léger haute performance

La Norvège est sans contredit, un chef de file mondialement reconnu en ce qui a trait à l'utilisation du béton léger haute performance pour la construction de ponts et d'ouvrages exploités en milieu marin. Les recherches norvégiennes de même que l'expérience pratique acquise par ce pays sont étroitement liées à la construction de plate-forme de forage ainsi que l'exploration pétrolière en générale.

Tel que rapporté par Fidjestol [7], à chaque année la Norvège construit un ou deux ponts incorporant un béton léger haute performance. Quelques-uns des projets les plus significatifs réalisés dans ce pays sont identifiés au Tableau 1 ci-après (voir les ouvrages A, B, D et G). Aussi, les résultats de recherches scientifiques ainsi que les caractérisations effectuées sur des ouvrages en construction et en services permettent à Fidjestol d'affirmer que le béton léger est au

moins aussi résistant à la pénétration des ions chlorés qu'un béton de densité normale confectionné avec un même rapport eau-liant.



Figure 2 – Pont Stolma en Norvège utilisant un béton léger

2. 3 Le « Expanded Shale, Clay and Slate Institute »

Dans le but de promouvoir l'utilisation des granulats légers pour la construction de ponts et d'ouvrages exploités en milieu marin, l'« Expanded Shale, Clay and Slate Institute » dispose d'une publication intitulée « Building Bridges and Marine Structures with Structural Lightweight Aggregate Concrete » [6] et un complément à ce document regroupant des données techniques concernant plusieurs ouvrages construits avec un béton léger. Ces documents soulignent seize ponts d'envergures construits aux États-Unis, trois ponts et une plate-forme de forage « off-shore » en Norvège, et quatre ouvrages canadienne dont le Tarsuit Caisson Retained Island (Mer de Beaufort/1981), le CIDS Island Drilling System (Mer de Beaufort/1984), les Powell River Ships (Déroit de Georgie, C.B./1920-1945) et la plate-forme de forage Hibernia (Terre Neuve/1996). Tous ces projets ont eu recours à une utilisation importante de granulats légers.

La plate-forme de forage Hibernia est d'un intérêt particulier en raison de ses caractéristiques hors du commun, dont notamment :

- la base gravitaire de la plate-forme de forage Hibernia représente la plus importante utilisation de béton léger à haute résistance à avoir été réalisée en Amérique du Nord. Au moment où la production fût maximale, environ 1 100 m³ de béton ont été produits par jour pendant une période de 60 jours;
- l'ouvrage est exposé à des conditions d'exploitations sévères en raison de son implantation dans un milieu marin et de son exposition à des charges de glace. À cet égard, l'ouvrage a été conçu pour être exploité sans entretien durant 30 ans;
- un béton haute résistance incorporant des granulats légers avec une résistance en compression de 80 MPa a été fabriqué en remplaçant 50 % des granulats de densité normale par des granulats légers de type schiste expansé ce qui a permis de réduire

d'environ 10 % la masse volumique du béton tout en conservant des propriétés mécaniques comparables à un BHP standard;

- des essais sur les mélanges développés spécifiquement pour ce projet et visant la résistance en compression et en traction, l'établissement du module élastique, le coefficient de Poisson, l'établissement des courbes de contraintes-déformations, les essais sur la perméabilité et la résistance à la pénétration des ions chlorés de même qu'à la résistance au niveau du gel et du dégel ont été réalisés. L'ensemble de ces essais ont été effectués afin de démontrer que les critères de conception en matière de résistance et de durabilité pouvaient être satisfaites.

Tableau 1 – Exemples d'ouvrages incorporant un béton léger

<p>A – Pont Raftsundet, Raftsundet Sound, Norvège, 1998 [6] Caractéristiques: quatre travées continues, poutre caisson coulée en place avec précontraint par post-tension, travées de 86, 202, 298 et 125 m. La portion centrale (224 m de long) de la travée principale a été réalisée au moyen d'un BLHP. Béton : 60 MPa (Essais sur cubes à 28 jrs. Masse volumique : 2012 kg/m³, béton pompé, qtée. de ciment : 430 kg/m³. Granulats de type schiste expansé.</p>
<p>B – Pont Rungsundet , Norvège, vers 1998 [6] Caractéristiques: trois travées composées d'une poutre caisson et érigées par balancement en cantilever d'une longueur totale de 311 m. L'utilisation d'un granulats légers a permis des économies de l'ordre de 7 % à 15 % comparé à la conception initiale. La travée centrale a pu être augmentée de 172 m à 190 m. Granulats de type schiste expansé.</p>
<p>C – Pont Strawberry Mansion, Philadelphie, 1998 Caractéristiques: Reconstruction d'un tablier de pont au moyen d'un caillebotis galvanisé et rempli de béton léger haute performance modifié au latex. Granulats de type schiste expansé.</p>
<p>D – Pont Stolma, Norvège, 1998 [7]. Caractéristiques: Poutre caisson précontraint par post-tension d'une longueur de 467 m avec une travée principale de 301 m. Une portion de 184 m de la travée principale a été construite utilisant un béton léger à haute résistance. En 2003, l'ouvrage détenait le record mondial pour un ouvrage érigé par la méthode du balancement en cantilever. Béton : 70.4 MPa (Cube à 28 jrs). Masse volumique: 1940 kg/m³. Ciment avec fumée de silice: 455 kg/m³. Granulats de type argile expansé. Voir Fig. 2.</p>
<p>E - Hibernia offshore oil platform, St. John's Newfoundland, 1996 [6]. Voir section 2.3 de la présente communication.</p>
<p>F – Pont Neuse River [6]. Caractéristiques: Pont majeur (voies navigables) avec échangeur. Dalle construite au moyen d'un béton léger et supportée par des poutres de type AASHTO d'une masse volumique normale. Béton: 31 MPa. w/cm de 0,42. Masse volumique séchée à l'air de 1842 kg/m³. Granulats de type schiste expansé.</p>
<p>G – Pont Nordhordland, Norvège [7]. Caractéristiques: Pont à hauban avec dégagement pour la navigation et pont flottant avec une longueur totale de 1615 m. La travée principale d'une portée de 163 m et les pontons pour les travées flottantes d'une longueur de 1246 m ont incorporés un BLHP. Le pont à hauban comprend un béton de 55 MPa (cube) ayant une masse volumique de 1900 kg/m³. Ciment avec fumée de silice: 465 kg/m³. Le pont flottant a utilisé un béton léger de 55 MPa avec une masse volumique de 1900 +/-50 kg/m³. Ciment avec fumée de silice : 443 kg/m³.</p>
<p>H – Pont Virginia Dare Caractéristiques : pont d'une longueur de 8,4 km, soit le plus long pont en Caroline et l'un des plus long de la côte est des États-Unis. Coût de construction très faible, soit de 91 M\$ seulement. Environ 25,000 tonnes de granulats légers ont été utilisés.</p>
<p>I – Pont Potomac River, Sandy Hook, Maryland. Caractéristiques: Dalle de tablier exposée. La moyenne de 78 essais de contrôle a indiqué une résistance en compression de 36,8 MPa vs la valeur spécifiée de 27,6 MPa avec un coefficient de variation de 8 %. Granulats de type shale expansé.</p>
<p>J – Pont Keybridge Superstructure, Baltimore, Maryland. Caractéristiques: Tablier avec un béton léger de 33,3 MPa et un écart type de 3.0 MPa. Masse volumique du béton à l'état frais de 1794 kg/m³ et après séchage de 1730 kg/m³. Granulats de type shale expansé.</p>
<p>K – Autres projets: Pont Tappan Zee (NY), Pont Queensborough (NY), Pont Coronado (Californie), Pont Cooper River (ouvrage original/Caroline du sud), Pont William Preston Lane (Baie de Chesapeake, Maryland), Pont Brooklyn (NY), Pont Oakland Bay Bridge (Californie), Pont Woodrow Wilson Memorial (Virginie), Pont Tacoma Narrows (Washington), Pont Shelby Creek Bridge (Kentucky).</p>

2. 3 Les études commandées par le US Army Corps of Engineers

Le US Army Corps of Engineers a récemment commandé une revue exhaustive de la technologie du béton léger, notamment en rapport à la construction d'ouvrage flottant en milieu marin [8]. L'objectif du rapport d'étude était de présenter des informations scientifiques sur les propriétés du béton léger à haute résistance afin de permettre aux concepteurs d'ouvrages d'exploiter ce matériel d'une manière efficace et avec assurances.

Le rapport découlant de l'étude (d'une centaine de pages) explique en détail les propriétés mécaniques des granulats légers de même que les caractéristiques et le comportement structural des bétons légers. Les aspects de durabilité, de mise en place de même que les aspects économiques sont traités. Un expert canadien, le Dr. Theodore Bremner, est co-auteur du rapport d'étude qui est disponible sur le site du ESCSI (www.escsi.org).

3. Développement de mélanges et essais visant la production de BLHP au Québec

L'objectif du programme d'essais commandé par la Société consistait à élaborer des formules de mélanges de béton à haute performance contenant des granulats légers et à évaluer les propriétés de durabilité de ces bétons dans le but de démontrer la faisabilité de produire un BLHP ayant une résistance en compression de l'ordre de 50 à 55 MPa à 28 jours qui serait doté d'une masse volumique inférieure à 1 950 kg/m³. D'une importance égale à celle accordée à la résistance, le programme d'essais avait aussi comme but d'établir les caractéristiques intrinsèques des granulats et les caractéristiques des mélanges en termes de durabilité du béton à l'état durci.

Les paramètres de base utilisés pour encadrer la formulation des mélanges ont été ciblés en fonction des concepts préliminaires proposés comme système pour le remplacement du tablier du pont Honoré-Mercier de même que les propriétés du béton et les critères de conception retenues pour le projet de remplacement du tablier du pont Jacques-Cartier.

Aucune source de granulats légers n'a été identifiée au Québec pour l'approvisionnement et la production de BLHP. Toutefois, une revue de diverses communications techniques a permis d'identifier un granulats léger fabriqué par l'expansion d'un schiste qui est produit par la compagnie *Carolina Stalite Company, Salisbury* située en Caroline du Nord (Granulat « A »). Ce granulats a été ciblé comme candidat potentiel compte tenu de l'utilisation du granulats en question pour les ponts Raftsundet et Rungsundet en Norvège de même que pour la plate-forme de forage Hibernia (voir Tableau 1).

Un granulats léger obtenu par l'expansion d'un shale qui est produit par la compagnie *Norlite Corporation* de Cohoes New York (Granulat « B ») a également été identifié comme candidat potentiellement intéressant en raison de la proximité du site d'approvisionnement de la région de Montréal de même que l'utilisation de ce granulats pour plusieurs projets de ponts construits dans la région de l'est des États-Unis. Une recherche limitée par le biais d'Internet n'a permis d'identifier qu'un seul fournisseur canadien de granulats léger (Granulat « C »).

Quatre mélanges ont été confectionnés et évalués à partir d'essais en laboratoire, soit un mélange servant de référence utilisant un granulat de densité normale et les trois autres confectionnés à partir des granulats légers identifiés précédemment.

3.1 Caractéristiques intrinsèques des granulats et résultats d'essais

Les essais de caractérisation des gros granulats ont été effectués sur les granulats légers provenant des trois fournisseurs (Stalite, Norlite et le fournisseur canadien) selon les normes et procédures d'essais suivantes :

- Analyse granulométrique selon la norme CSA A23.2-2A ;
- Détermination de la teneur en particules fines passant le tamis 80 µm selon la norme CSA A23.2-5A;
- Détermination du pourcentage de particules fracturées selon la norme LC 21-100;
- Détermination du pourcentage de particules « plates » et « allongées » selon la norme LC 21-265;
- Détermination de la capacité de rétention d'eau des granulats selon un essai développé par le laboratoire d'essais Technisol Inc.;
- Détermination de la résistance à l'abrasion au moyen de l'appareil Los Angeles selon la norme LC 21-400.

Les résultats des essais sont présentés au Tableau 2. Tel qu'indique ce tableau, ni les granulats fournis par la compagnie Stalite ni ceux fournis par la compagnie Norlite satisfont strictement aux normes québécoises en matière de granulométrie et de pourcentage de particules fines. Toutefois, cette déviation par rapport aux exigences de la norme n'est pas inhérente au matériau et peut être corrigée lors des opérations de concassage, de tamisage et de lavage.

Aussi, les normes québécoises sont d'une certaine façon mal adaptées aux granulats légers car la littérature scientifique fait état des ajustements à appliquer aux normes pour tenir compte de la distorsion des résultats due au fait que les particules fines, contenant peu ou pas de vides, affichent une masse volumique supérieure à celle des gros granulats contenant un plus grand pourcentage de vides. Ainsi, pour une même proportion en volume de particules vides, la proportion en poids de ces particules fines sera plus importante. Par ailleurs, en ce qui a trait au pourcentage de particules fines inférieures à 80 µm, la norme ASTM C330-5 stipule que dans le cas des granulats légers, la présence de particules fines inférieures à 75 µm n'est pas nuisible et peut même être bénéfique due au fait que ces particules fines peuvent être légèrement pozzolanique.

Il convient de noter qu'aucun des granulats légers ne rencontre les exigences des normes canadiennes et québécoises en ce qui a trait à la limite supérieure de 35 % fixée pour la résistance à l'abrasion. Cependant, la non-conformité du granulat Stalite est marginale avec une perte de masse de 35,9 % à l'essai d'abrasion Los Angeles en regard d'une limite maximale fixée normalement à 50 % mais réduite à 35 % lorsque le granulat est utilisé pour la construction de chaussées en béton ou d'autres surfaces exposées à une usure importante. Au Québec, la grande majorité des tabliers de ponts sont recouvertes d'une membrane d'étanchéité et d'un enrobé

bitumineux, comme prévu pour le pont Honoré-Mercier ce qui rend acceptable les résultats obtenus.

Tableau 2 – Caractérisation du gros granulat et procédure d’essai

Normes	Caractéristique et procédure d’essai sur le gros granulat	Stalite Granulat A	Norlite Granulat B	Canadian Granulat C
NQ 2560-114-IV/2002-Tableau 1	Analyses granulométriques selon la norme CSA A23.2-2A	✗	✗	✓
NQ 2560-114-IV/2002-Tableau 3	Détermination de la teneur en particules fines passant le tamis 80 µm selon la norme CSA A23.2-5A	✗ (Note 1)	✗ (Note 1)	✓
NQ 2560-114-IV/2002-Tableau 2 NQ 2560-114-I/2002-Tableau 3	Détermination du pourcentage de particules fracturées selon la norme LC 21-100. Gros granulats de catégorie « B » pour les BHP	✓	✓	✗
NQ 2560-114-IV/2002-Tableau 2 NQ 2560-110-I/2002-Tableau 3	Détermination du pourcentage de particules allongées selon la norme LC 21-265	✓	✓	✓
NQ 2560-114-IV/2002-Tableau 2 NQ 2560-114-I/2002-Tableau 3	Détermination du pourcentage de particules « plates » selon la norme LC 21-265	✓	✓	✓
NQ 2560-114-IV/2002-Tableau 2 NQ 2560-114-I/2002-	Détermination de la résistance à l’abrasion au moyen de l’appareil Los Angeles selon la norme LC 21-400	✗	✗	✗
	Pourcentage de la perte de masse du gros granulat	35,9 %	46,2 %	41,1 %

✓ Rencontre les exigences des normes du Québec

✗ Ne rencontre pas les normes du Québec

Note 1: La norme ASTM C330-5 indique « pyro-processed lightweight aggregate particles finer than 75 µm are not deleterious and may be moderately pozzolanic ».

3.2 Composition des mélanges

Le ciment utilisé pour la réalisation de tous les mélanges était un ciment portland pré-mélangé avec fumée de silice. Selon la classification de la norme CSA A3000, le ciment utilisé est de type GUB-SF.

Les mélanges sont identifiés selon le type de granulat léger utilisé dans le mélange. En ce qui a trait au mélange de référence, ce dernier est simplement identifié dans la présente communication par l'appellation « référence ». La formulation des mélanges avec granulats légers identifiés au Tableau 3 a été réalisée en s'inspirant de la norme ACI 211.2-98 Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete.

Afin de faciliter le contrôle des mélanges en laboratoire, les quantités de gros granulats indiquées dans le Tableau 3 sont présentées à l'état sec dans le cas des bétons fabriqués avec des granulats légers (pratique courante pour les bétons légers). Pour le granulat de densité normale, la quantité indiquée est à l'état SSS (pratique courante dans le domaine du béton).

En raison de la grande absorptivité des granulats légers, ces derniers doivent être préhumidifiés 72 heures avant le gâchage. Seul le granulat provenant du fournisseur « C » a été préhumidifié puisque la teneur en eau de ce dernier était faible, comparativement à son absorptivité, lors de la réception des granulats. Les autres granulats légers avaient des teneurs en eau se situant très près de leur absorptivité.

Le but de cette opération de préhumidification était de faciliter l'obtention des propriétés recherchées à l'état plastique. En effet, selon la norme ACI 211.2-98 Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete, la quantité d'eau absorbée par des granulats légers peut entraîner une perte de maniabilité dans le temps. Le fait d'avoir une teneur en eau des granulats légers près de leur absorptivité a permis d'atteindre sans difficulté les propriétés visées à l'état plastique.

Tableau 3 – Composition des mélanges

Constituants	Référence	Stalite Granulat A	Norlite Granulat B	Canadien Granulat C	Pont Jacques- Cartier
Ciment GUB-SF, kg/m ³	425	450	450	450	450
Eau, L/m ³	141	135	135	135	135
Rapport eau-liant	0,33	0,3	0,3	0,3	0,3
Sable SSS, kg/m ³	790	775	775	775	760
Gros granulat, kg/m ³	980 ¹	520 ²	475 ²	595 ²	990 ¹
Réducteur d'eau, ml/m ³	---	1 000	1 000	1 000	---
Retardateur de prise, ml		---	---	---	1 000
Superplastifiant, ml/m ³	5 360	6 000	6 000	6 000	4 500
Entraîneur d'air, ml/m ³	318	315	338	315	380

¹ : quantité de granulat à l'état saturé surface sèche (SSS)

² : quantité de granulat à l'état sec

4. Propriété du béton et résultats d'essais

Les propriétés à l'état plastique des mélanges sont présentées au Tableau 4. Les résultats démontrent qu'il est possible de produire des mélanges de béton avec granulats légers ayant des propriétés adéquates à l'état plastique.

Tableau 4 – Propriétés du béton à l'état plastique

Caractéristique	Référence	Stalite Granulat A	Norlite Granulat B	Canadien Granulat C
Affaissement, mm	170	190	160	165
Air, %	7,7	9,0	8,5	8,4
Masse volumique, kg/m ³	2 362	1 876	1 885	1 999

Tableau 5 – Résistance à la compression

Temps à l'essai	Référence	Stalite Granulat A	Norlite Granulat B	Canadien Granulat C
3 jours	43,3 MPa	50,7 MPa	38,3 MPa	39,0 MPa
7 jours	50,2 MPa	49,9 MPa	42,2 MPa	43,7 MPa
21 jours	---	57,2 MPa	45,6 MPa	56,0 MPa
28 jours	61,8 MPa	66,2 MPa	54,4 MPa	58,0 MPa

Les essais suivants ont été effectués sur le béton durci, soit:

- Résistance à la compression mesurée à 3, 7, 21 et 28 jours selon la norme CSA A23.2-9C;
- Résistance à la pénétration des ions chlorures selon la norme ASTM C1202 - Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration;
- Résistance aux cycles de gel et de dégel selon la norme ASTM C666 – Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing (procedure A);
- Résistance à l'écaillage selon la norme NQ 2621-900;
- Caractérisation du réseau des vides d'air selon la norme ASTM C457 – Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete;

Les essais de résistance à la compression ont été réalisés sur tous les mélanges de béton à 3, 7, 21 et 28 jours et conformément à la norme CSA A23.2-9C. Dès le démontage des cylindres de béton, ces derniers ont été maintenus à une température de 23°C et dans un environnement à un taux d'humidité relative de 100 % et ce, jusqu'au moment de procéder aux essais. Les résultats de ces essais sont présentés au Tableau 5, où chaque valeur représente la moyenne d'au moins deux résultats individuels. Les résultats obtenus démontrent qu'il est possible, à tout le moins en laboratoire, de produire un BLHP ayant une résistance en compression supérieure à 50 MPa et une masse volumique inférieure à 1900 kg/m³. De plus, il convient de souligner que les résultats

identifiés au Tableau 5 ont été obtenus en laboratoire du premier coup, sans tentative d'optimisation du mélange.

Tableau 6 – Essais de durabilité sur le béton durci

Essai/propriété	Stalite Granulat A	Norlite Granulat B	Canadien Granulat C
Réseau des vides d'air (ASTM C 457)			
Teneur en air (%)	5,1	6,2	6,5
Facteur d'espacement \bar{L} (μm)	137	139	164
Surface volumique α (mm^{-1})	33,7	28,3	26,7
Résistance à la pénétration des ions chlorés (ASTM C 1202)/Charge passée (Coulombs)	380 (très basse)	692 (très basse)	840 (très basse)
Résistance au gel et dégel (ASTM C 666)			
Nombre de cycles	300	300	79 (échec)
Allongement $\mu\text{m}/\text{m}$	230	390	éprouvettes brisées
Facteur de durabilité %	100	94	0
Essais d'écaillage en présence de sel déglacant (NQ-2621-900)			
Perte de masse kg/m^2	0,074	0,127	0,537
Cote	0 (aucun écaillage significatif observé)	1A (écaillage très léger du mortier – absence de cratères (« popouts »))	4 (combinaison de gros granulats éclatés avec mortier de surface écaillé)

Les essais portant sur la durabilité des mélanges sont présentés au Tableau 6. Ces essais démontrent que les bétons produits au moyen de granulats légers provenant d'une source ayant une feuille de route éprouvée (les granulats Stalite et Norlite) ont bien performés tandis que le mélange produit à partir d'une source d'approvisionnement canadienne a très mal performé en terme de durabilité, notamment au niveau de la résistance aux cycles de gel et dégel et de l'écaillage.

5. Avantages/inconvénients et implications financières

5.1 Inconvénients

L'absence d'une source au Québec pour l'approvisionnement de granulats léger de qualité qui convient à la production de BLHP est un inconvénient majeur pour cette technologie du béton. Un deuxième inconvénient important est l'augmentation du coût d'un béton comportant des granulats légers tel que décrit ci-après. Aussi, le fait que certains paramètres associés au calcul

de la résistance structurale doivent être ajustés à la baisse selon les normes de conception courante est également un inconvénient. Finalement, le manque de connaissance et de familiarité dans l'industrie locale de la construction à l'égard du béton léger est un facteur qui peut diminuer l'intérêt au Québec pour ce type de béton.

5.2 Avantages

D'un point de vue matériel, la littérature scientifique sur le sujet de même que la documentation publiée par le ESCSI [6] font ressortir les principaux avantages suivants:

- i) une meilleure compatibilité mécanique entre le module élastique des granulats légers et celui du mortier et de la matrice du béton (i.e. $E_{\text{granulat}} / E_{\text{matrice}} \approx 1$);
- ii) une amélioration de la zone de contact et des conditions aux interfaces pâte-granulats;
- iii) une hydratation accrue de la pâte de ciment en raison de l'eau qui est absorbée par les granulats et qui est libérée graduellement lors de la période de mûrissement du béton et ceci, sans impact négatif en ce qui a trait au rapport eau-liant;
- iv) les bénéfices d'un mûrissement interne du béton combiné à une meilleure homogénéité des BLHP qui ont pour effet de minimiser les microfissurations dans le béton dues aux variations thermiques et hydriques au jeune âge.

La littérature scientifique fait également état des avantages du béton léger comme matériau de réparation et/ou dans la réalisation de chape de béton, où lesdits avantages sont attribués à une diminution et une relaxation des contraintes développées à l'interface entre le béton de réparation et le béton d'origine due au module élastique plus faible et les déformations plus importantes du béton léger sous chargement constant [9].

En terme de comportement structural, l'avantage le plus important pour BLHP provient d'une réduction de la masse volumique d'environ 22 % pour un béton ayant une résistance en compression de 50 à 55 MPa. Cette diminution de la masse volumique peut facilement mener à des économies substantielles au niveau des coûts des armatures, des aciers de précontraint, des torons de post-tension et les coûts des fondations. Pour les ouvrages composés d'éléments préfabriqués, des économies importantes peuvent être générées en raison d'une réduction des coûts de manutention et de transport de ces composants. Le comportement sismique d'un ouvrage peut également être amélioré en raison d'une diminution des charges permanentes et d'une réduction de la rigidité des membrures.

5.3 Implications financières

Au Québec, le coût d'un béton haute performance à densité normale est de l'ordre de 130 \$/m³ (ce coût peut varier en fonction du lieu de livraison et du volume désiré). Pour la production du BLHP utilisant les deux granulats de source américaine identifiés dans cette communication, le même coût serait de l'ordre de 168 \$/m³, représentant un coût supplémentaire de 29 %. Pour le remplacement d'un tablier comme celui du pont Honoré-Mercier ou du pont Jacques-Cartier, le béton proprement dit peut représenter une partie relativement faible du coût total d'un projet. L'augmentation au niveau du coût du béton peut être atténuée rapidement par une réduction substantielle des quantités d'armatures, une diminution des coûts de transport et de manutention

occasionnée soit par une réduction du poids des panneaux ou par une réduction du nombre total de panneaux en utilisant des panneaux de plus grandes dimensions.

Pour un ouvrage existant, il peut y avoir une réduction importante des coûts associés au renforcement de l'ouvrage et/ou au coût d'entretien de l'ouvrage en raison d'une diminution de la charge permanente (charge morte) ce qui permet de maintenir une réserve de capacité portante.

Il est intéressant de noter que dans le cas du pont Rungsundet, l'utilisation d'un granulat léger produit par la compagnie Stalite aux États-Unis et transporté jusqu'en Norvège a tout de même permis une réduction d'environ 7 à 15 % du coût global du projet due au fait que la travée centrale du pont a pu être augmentée de 172 m à 190 m (voir projet B au Tableau 1).

6. Conclusions

Les essais réalisés et décrits dans le cadre de cette communication ont permis de démontrer qu'il est possible de fabriquer des bétons légers ayant une résistance en compression supérieure à 50 MPa à 28 jours et une masse volumique inférieure à 1950 kg/m³. De plus, ces bétons possèdent des propriétés à l'état plastique appropriés à la mise en place du béton.

Les essais réalisés sur les mélanges ont aussi confirmé que le béton produit au moyen de deux types de granulats légers ayant une bonne feuille de route, est durable et peut être approprié pour la construction et/ou le remplacement de tabliers de pont au Québec. Toutefois, compte tenu des résultats très faibles obtenus à l'égard du gel et dégel pour un des trois types de granulats légers mis à l'essai, il est recommandé que tout type de granulat léger soit validé au moyen d'essais, particulièrement afin de confirmer le comportement adéquat du granulat en terme de gel et dégel.

7. Remerciements

Les auteurs tiennent à souligner la contribution de M. Alain Soucy de la firme Technisol Inc. de même que M. Éric Ouellet de la firme Service d'Expertise en Matériaux Inc. pour leur participation à la formulation des mélanges et pour la réalisation des essais en laboratoire. Les auteurs tiennent aussi à remercier les représentants des entreprises Stalite et Norlite d'avoir fourni les granulats légers et d'avoir autorisé la publication des résultats identifiés dans la présente communication.

8. Références

1. Carlin, Glen P. et Mailhot, Guy, Jacques Cartier Bridge Re-decking Project, Transportation Association of Canada, Proceedings of the 2003 Annual Conference, septembre 2003.
2. Mailhot, Guy et Zaki, Adel, Deck Reconstruction of Jacques Cartier Bridge Using Precast Prestressed High Performance Concrete Panels, PCI Journal, Precast/Prestressed Concrete Institute, Vol. 48, No 5, septembre-octobre 2003.
3. Brown III, W.R., Larsen, Torbjorn J. et Holm, Thomas A., Long-Term Service Performance of Lightweight Concrete Bridge Structures, Reprint from International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, juin 1995.
4. T.Y. Lin International, Criteria for Designing Lightweight Concrete Bridges, Federal Highway Administration, Report No. FHWA/RD-85/045, Spring Field, Virginia, août 1985.
5. Ries, John P. et Holm, Thomas A., éditeurs, High-Performance Structural Lightweight Concrete, ACI International, Special Publication SP-218, Farmington Hills, Michigan, 2004.
6. Expanded Shale, Clay and Slate Institute (ESCSI), Building Bridges and Marine Structures with Structural Lightweight Aggregate Concrete, Publication No. 4700, Salt Lake City, Utah, février 2001.
7. Fidjestol, Per., High Performance Lightweight Concrete Bridges – Norwegian Background & Experience, International Symposium on High Performance Concrete, Floride, 2003.
8. Holm, Thomas A. et Bremner, Theodore W., State-of-the-Art Report on High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments, août 2000.
9. Shink, Mélanie et Pleau, Richard, Les bétons légers à haute performance: des matériaux, adaptés à la problématique de la réparation des ouvrages d'art, Recueil des communications du 9^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, mai 2002.