Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 8 (1968)

Artikel: Béton léger considéré comme matériau porteur (technologie du béton léger, calcul des ouvrages)

Autor: Pauw, Adrian

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-8723

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Vb

Béton léger considéré comme matériau porteur (technologie du béton léger, calcul des ouvrages)

ADRIAN PAUW
Professor of Civil Engineering, University of Missouri, Columbia, Mo.

1. Introduction

C'est une importance accrue qu'on attache à la recherche d'un emploi plus rationnel des matériaux dans la construction, et ce fait, qui dans de nombreuses régions du monde s'accompagne d'une raréfaction des agrégats naturels de bonne qualité, généralise rapidement l'utilisation d'agrégats légers industriels pour le béton. Etant donné que nombre de ces agrégats permettent de fabriquer facilement un béton de qualité appropriée à son emploi dans la construction, de grandes quantités en sont actuellement mises en œuvre dans la construction en béton, et ce non seulement aux Etats-Unis mais aussi dans d'autres parties du monde. Rien qu'aux Etats-Unis et au Canada, la production annuelle d'agrégats légers industriels est proche maintenant, pour l'ensemble des sortes, de 10 millions de mètres cubes. Près de 40% de la production totale sont utilisés pour des éléments porteurs, le reste servant principalement pour la fabrication des agglomérés de béton et le béton isolant. Le taux auquel se développe l'emploi des agrégats légers dans la fabrication du béton de construction est hautement significatif. Pour les agrégats du type four rotatif, qui représentent environ 70% de la production de l'ensemble des sortes, l'utilisation qui en est faite dans le béton pour ouvrages d'art est passée de moins de 30 000 mètres cubes, en 1952, à une valeur qui dépasse aujourd'hui 3 000 000 de mètres cubes. Le béton léger a été employé dans maintes applications, parmi lesquelles des bâtiments à étages multiples tels qu'immeubles d'habitation, immeubles à usage de bureaux, garages, hôtels, etc., d'innombrables types de voiles y compris ceux de forme prismatique, des tabliers de ponts et de passages supérieurs; il l'a en

fait été dans tous les types d'ouvrages à propos desquels une réduction de poids est de nature à entraîner des économies générales. Parmi les projets importants réalisés en béton léger, citons le monumental bâtiment de la TWA au Kennedy International Airport, les tours Marina de 60 étages de Chicago et le Statler Hilton Hotel de Dallas. On se convainc ainsi de l'essor rapide qu'a connu le béton léger et qui en fait un secteur important de l'industrie du béton pour ouvrages d'art.

A l'exception du poids unitaire, les caractéristiques mécaniques du béton à agrégats légers de la qualité type construction sont tout à fait semblables à celles du béton de densité ordinaire, et l'on peut donc calculer le béton léger tant armé que précontraint selon les méthodes conventionnelles en adoptant les mêmes bases qu'à l'endroit du béton ordinaire. Il n'en reste pas moins que le béton léger possède des propriétés particulières qui diffèrent à des égards importants de celles du béton ordinaire. Pour tirer pleinement parti des potentialités de ce matériau, il est nécessaire d'étudier minutieusement ses caractéristiques propres et de prendre en considération l'effet qui en résulte sur le comportement des ouvrages.

En dépit du développement rapide de l'emploi du béton à agrégats légers, et bien que personne ne mette en doute l'expansion encore accrue qu'il est appelé à connaître dans l'avenir, le béton léger reste encore une question peu claire pour nombre d'ingénieurs, d'architectes et de constructeurs. Cet état de choses est en partie dû à la grande variété d'agrégats légers naturels et industriels qui s'offre aux utilisateurs pour fabriquer des bétons présentant une large gamme de densités et d'autres propriétés physiques. Le spectre des bétons à agrégats légers est représenté à la Fig. 1, en partant des bétons isolants qui ne pèsent pas plus de 240 kg au m^3 pour arriver aux bétons denses pour ouvrages d'art dont le poids atteint 2000 kg au m^3. Dans le présent rapport nous nous bornerons à considérer le béton léger pour ouvrages d'art dont la définition est la suivante:

Béton léger pour ouvrages d'art. Béton contenant des agrégats poreux ou soufflés, de densité 1350–2000 kg/m^3 et de résistance sur cylindre à 28 jours comprise entre 175 et 500 kg/cm^2.

Aux fins de comparaison, donnons la définition du béton conventionnel pour ouvrages d'art:

Béton pour ouvrages d'art de densité normale. Béton contenant des agrégats naturels de gravier, sable ou pierres concassées, de densité nominale égale à 2400 kg/m^3 et de résistance sur cylindre à 28 jours comprise entre 175 et 500 kg/cm^2.

2. Agrégats légers destinés au béton pour ouvrages d'art

La production d'un béton léger de construction est liée à l'existence d'agrégats légers de haute qualité. En se reportant à nouveau à la Fig. 1, on peut voir

à l'extrémité supérieure de l'échelle qu'il existe plusieurs sortes d'agrégats pour fabriquer les bétons pour ouvrages d'art. Chacun de ces matériaux ne peut toutefois être employé pour produire des bétons à haute résistance sans qu'on ait à ajouter des matériaux naturels et/ou à prévoir des teneurs en ciment très élevées. Les agrégats naturels de cette catégorie: ponce, tuf et scories volcaniques, sont des matériaux légers qu'on trouve généralement dans les sédiments volcaniques. Mélangés à du sable naturel, certains de ces matériaux peuvent permettre la fabrication de bétons d'assez bonne qualité, mais il est difficile d'obtenir des résistances élevées et elles exigent de très fortes teneurs en ciment.

Les matériaux bruts employés dans la fabrication commerciale des agrégats légers de construction sont soit des matériaux qu'on trouve à l'état naturel tels que certains schistes, argiles et ardoises, soit des produits secondaires provenant d'autres opérations industrielles tels que le laitier des hauts fourneaux, les cendres volantes de la combustion du coke ou du charbon dans les centrales thermiques. Les mâchefers, bien que largement utilisés dans la fabrication des agglomérés de béton, ont des propriétés insuffisantes et variables eu égard à leur mise en œuvre dans la fabrication du béton, et l'on n'a généralement pas recours à eux en tant qu'agrégats légers de construction.

Rien qu'aux Etats-Unis, il y a en ce moment au moins cent usines produisant des agrégats légers de construction. Soixante d'entre elles environ travaillent selon le système du four rotatif. Ce procédé consiste à chauffer des argiles, ardoises et schistes bruts dans des fours rotatifs pour les faire gonfler sous des conditions contrôlées. Les quarante autres usines se répartissent à peu près également entre installations de frittage et installations de laitier soufflé de hauts fourneaux. Dans l'opération de frittage, on mélange argile, schiste, ardoise ou cendres volantes à l'état brut avec un combustible pulvérisé pour ensuite brûler le mélange et le faire gonfler, sous contrôle, sur une grille mobile. Le laitier soufflé s'obtient en soumettant le laitier de haut-fourneau fondu à des jets d'eau, de vapeur et/ou d'air sous des conditions contrôlées.

Au cours de ces opérations, l'expansion se produit du fait de la formation de cavernes au sein de l'agrégat, et ce, soit 1. par formation de gaz tels que SO_2 ou CO_2 qui gonflent les constituants minéraux plastiques, soit 2. par élimination des matériaux combustibles par combustion, ou soit enfin 3. par formation de vapeur contenue dans les éléments minéraux. Le produit ainsi obtenu est un agrégat cellulaire léger comportant des alvéoles dont la plus grande dimension peut être d'ordre microscopique ou atteindre plusieurs millimètres, selon le procédé de fabrication employé et le matériau brut utilisé. L'agrégat de construction idéal qu'on pourrait obtenir aurait une structure alvéolaire en nid d'abeilles constituée par des interstices de dimensions moyennes et entièrement séparées par des parois résistantes.

A la sortie de la plupart des installations, on obtient un clinker qu'il faut refroidir, broyer et cribler pour produire un agrégat ayant une granulométrie appropriée. Ces agrégats sont généralement à arêtes vives, et leur texture super-

ficielle est poreuse ou piquée. Par triage préalable ou nodulisation du matériau brut et par une cuisson de réglage, en vue de prévenir ou de limiter au minimum l'agglomération, on peut obtenir un agrégat plus arrondi à la fois en utilisant le four rotatif et le procédé de frittage.

De ce qui vient d'être dit, il ressort clairement qu'en raison de la diversité des procédés applicables et des matériaux utilisables les divers types d'agrégats qu'on peut obtenir ont des propriétés très différentes. Il faut toutefois reconnaître que l'emploi de tous ces procédés et matériaux s'est révélé heureux en permettant d'obtenir des agrégats légers qui ont donné satisfaction en service, et que la diversité rencontrée dans les agrégats classiques actuellement en œuvre n'est certainement pas moins importante.

3. Propriétés des agrégats légers pour ouvrages d'art

Alors que les propriétés des agrégats légers, pris dans leur ensemble, présentent une gamme très étendue, les caractères physiques d'un agrégat donné provenant d'une source déterminée sont généralement tout à fait constants, et c'est bien ce qu'on doit pouvoir attendre d'eux. Cependant, même considérés dans leur ensemble, les agrégats légers possèdent des propriétés propres qui les distinguent des agrégats de densité normale. Pour être à même d'exploiter pleinement les possibilités offertes par ces matériaux, il est nécessaire de bien comprendre en quoi consistent ces propriétés propres.

3.1. *Le poids unitaire* de ces agrégats est nettement plus faible. Le béton pour ouvrages d'art constitué d'agrégats légers a un poids réduit de 30%, ce qui en fait un matériau utilisable dans nombre d'applications pour lesquelles il ne serait pas possible d'employer du béton ordinaire. Les éléments particulièrement fins ont généralement un poids unitaire quelque peu plus élevé du fait qu'ils ont tendance à comprendre les fractions du matériau dont l'expansion a été la plus faible. Cette différence de densité entre fractions d'agrégats explique la tendance un peu plus forte qui se manifeste dans le sens d'une ségrégation à l'intérieur des tas. Une granulométrie constante est un impératif plus critique dans le cas des agrégats légers, car ses variations seraient de nature à provoquer des fluctuations intéressant tant la densité que les autres caractéristiques du béton.

3.2. *Les dimensions maximales* des agrégats légers sont généralement plus faibles que celles de la plupart des matériaux de poids normal. En ce qui concerne les schistes et les laitiers expansés, la taille maxima est ordinairement de 1–2 cm, bien qu'avec le procédé du four rotatif il existe des schistes allant jusqu'à 2,5 cm. A certains égards, les exigences relatives au béton ordinaire, comme par exemple la teneur en air optimale, sont à peu près les mêmes que celles se rapportant au béton léger si l'on prend en considération les dimensions maxima des agrégats.

3.3 *La forme des particules* des agrégats légers peut être très diverse, ainsi qu'on l'a déjà remarqué, la gamme s'étendant des agrégats broyés irréguliers et grossiers, à la surface piquée et rugueuse, aux cailloux lisses et arrondis qu'on obtient en procédant à un triage préalable du matériau initial et en contrôlant la cuisson.

3.4. *La densité apparente* des particules est très basse par comparaison avec celle des agrégats conventionnels. Etant donné que les particules expansées comportent des vides ou des espaces remplis d'air, il est difficile d'évaluer cette caractéristique, tout particulièrement dans la fraction des éléments fins, en raison de la variabilité de l'absorption. Tout comme le poids unitaire, la densité varie en fonction des dimensions des particules. Les morceaux les plus gros sont les moins denses et les plus petits sont les plus denses.

3.5. *La résistance* des particules des agrégats varie d'une sorte à l'autre. Certaines sont peu résistantes et friables tandis que d'autres sont résistantes et dures. Cette propriété n'intervient pas nécessairement pour interdire l'emploi de telle ou telle sorte dans la fabrication des bétons légers de construction, mais elle se manifeste dans la valeur des résistances à la compression associées à une consistance et à une teneur en ciment déterminées, notamment dans le cas des bétons de résistance élevée.

3.6. *La qualité des agrégats*, telle que déterminée par les essais de béton exécutés conformément aux techniques normalisées de gel et dégel, est généralement semblable à celle des agrégats de poids ordinaire de bonne qualité. Il faut veiller à ce que les matériaux indésirables tels que chaux calcinée ou composés ferreux, qui contribuent respectivement à dégrader la qualité et à provoquer des taches, ne soient pas présents dans des quantités qui les rendraient nuisibles.

3.7. *L'absorption* dont sont capables les agrégats légers est élevée si on la compare à celle des agrégats de poids normal qui absorbent 1 ou 2% d'eau rapportés au poids sec des agrégats. Les agrégats ordinaires contiennent généralement une humidité suffisante au moment du dosage, de sorte que, s'ils absorbent de l'eau supplémentaire pendant le mélange, ce n'est qu'en très faible quantité. Ce qui fait qu'avec le béton de densité normale la quantité d'eau de gâchage requise peut facilement être réglée de façon à compenser l'absorption. En revanche, la plupart des agrégats légers peuvent absorber 5 à 20% d'eau rapportés au poids sec. Toute l'absorption ne se fait pas, normalement, pendant l'opération de mélange ni avant la mise en place, et il faut donc tenir compte de la quantité d'eau nécessaire aux agrégats de façon à empêcher le durcissement du mélange durant la période comprise entre le mélange et la mise en œuvre. Le taux d'absorption apparaît ainsi comme un facteur important qui doit être pris en considération lorsque, procédant par des gâchées successives, l'on veut obtenir une consistance uniforme.

Il convient de remarquer que l'eau absorbée ne peut être mise à profit par la pâte de ciment du mélange pendant le processus d'hydratation et que, par conséquent, elle n'influe en rien sur le rapport E/C. Le rapport eau-ciment

effectif *net* du béton léger est essentiellement le même, pour des résistances comparables, que celui du béton ordinaire.

Mais cette haute capacité d'absorption qui caractérise les agrégats légers n'est pas sans avoir certains avantages. L'eau absorbée représente un réservoir intérieur d'eau de maturation disponible pour la poursuite de l'humidification du ciment, même une fois qu'ont été interrompus les traitements après-prise classiques. Le résultat est que la plupart des bétons à agrégats expansés continuent à présenter des gains substantiels de résistance pendant plusieurs mois au-delà de l'arrêt de la cure.

4. Propriétés physiques du béton léger

L'exposé succinct qui est fait ci-dessous de ces propriétés se rapporte exclusivement à la partie du spectre de la Fig. 1 qui concerne les bétons légers considérés comme étant appropriés aux constructions portantes en béton armé et précontraint. Cette restriction étant faite, les propriétés de presque tous les agrégats de construction légers produits aux Etats-Unis, au Canada et en Australie recouvrent une large bande avec, toutefois, une dispersion pas beaucoup plus forte que celle présentée par les agrégats conventionnels de poids ordinaire. Dans une mesure un peu plus grande qu'avec le béton contenant des agrégats ordinaires, l'humidité du béton influe sur les propriétés du béton léger. Une grande partie des propriétés apparaissent aussi comme étant directement liées au poids unitaire; c'est ainsi par exemple que les bétons légers ont un module d'élasticité et une conductibilité calorifique plus faibles que les bétons lourds de même résistance. D'autre part, les propriétés en question ne présentent pas de ligne de démarcation très nette en rapport avec le type d'agrégats, que ce soit en fonction des matériaux bruts ou du procédé de fabrication appliqué. Les figures 2 à 8 indiquent le domaine de variation de certaines des propriétés physiques les plus importantes que l'on va maintenant étudier. A titre de comparaison, on a tracé en traits interrompus les courbes représentatives des propriétés d'un béton de même résistance à base de gravillons et de sable Elgin.

4.1. *Le poids unitaire* du béton léger pour ouvrages d'art varie de 1350 à 2000 kg/m^3 environ, il est donc égal à 60–80% de celui du béton ordinaire de même résistance. C'est évidemment cette propriété qui constitue la principale justification de son emploi et qui, malgré le prix plus élevé des agrégats légers, peut en faire un matériau de construction économique (Fig. 2).

4.2. *La résistance à la compression* peut être amenée à la valeur maxima pratique d'environ 400 kg/cm^2 en n'augmentant que faiblement la teneur en ciment par comparaison avec ce qui est nécessaire pour les bétons ordinaires de résistance et granulométrie identiques. On a signalé des résistances dépassant 600 kg/cm^2 obtenues en prenant certains agrégats et d'assez fortes teneurs en ciment. En revanche, avec quelques agrégats, la résistance maxima est limitée

à approximativement 350 kg/cm², en raison vraisemblablement de la résistance inférieure des particules constituant ces agrégats. Avec la plupart des agrégats légers, et pour une consistance et une teneur en ciment données, on augmente la résistance à la compression en remplaçant les éléments fins par du sable naturel. Cette augmentation s'accompagne généralement, mais pas toujours, d'une élévation du poids unitaire (Fig. 3).

A l'instar de ce qui a lieu avec le béton de poids ordinaire, le durcissement à la vapeur accélère le développement de la résistance à la compression. Grâce aux effets qui résultent des meilleures qualités d'isolement que possède le béton léger, on peut obtenir des résistances accélérées quelque peu supérieures à celles qui sont possibles avec des bétons ordinaires comparables traités à la vapeur, après prise, dans les mêmes conditions.

4.3. *Cisaillements (Traction oblique)*, *Résistance à l'éclatement par traction et Module de rupture* sont des propriétés qui, toutes, sont étroitement liées à la résistance à la traction. On peut donc se servir de la résistance à l'éclatement par traction comme d'un indicateur commode de ces propriétés. Dans le cas des bétons légers traités par humidification continue, les valeurs de la résistance à l'éclatement par traction recouvrent une bande relativement étroite qui n'est pas essentiellement différente de la bande relative aux bétons ordinaires. En revanche, lorsqu'il s'agit d'éprouvettes en béton léger soumises à un séchage, cette résistance à l'éclatement par traction est très nettement inférieure à celle des éprouvettes traitées par humidification continue. Cette chute semble due à des contraintes de retrait différentiel provoquées par un taux d'humidité différent entre les parties intérieure et extérieure de l'éprouvette. Ce retrait différentiel engendre des contraintes de traction dans le voile extérieur, alors que dans les régions situées à l'intérieur ces contraintes sont compensées par des compressions, ce qui a pour effet d'amoindrir la résistance à l'éclatement par traction. En remplaçant une partie des éléments fins légers par du sable, on a constaté qu'on pouvait améliorer la résistance du béton léger séché à l'éclatement par traction, et en de nombreux exemples les résultats sont presque aussi bons quand cette substitution porte seulement sur un tiers des éléments au lieu d'être totale (Fig. 4).

4.4. *La force d'adhérence*, telle que déterminée par des essais de traction sur des barres à empreintes, est en moyenne égale à environ 70% de celle des bétons ordinaires de même résistance à la compression. Les valeurs de la force d'adhérence mesurée par essais de traction ont tendance à varier dans une large gamme, tant en ce qui concerne le béton ordinaire que pour le béton léger, et la rupture peut soit être provoquée par l'éclatement, par suite d'un effet de coin, soit être due à l'écrasement du béton sous les empreintes de la barre. Le remplacement par du sable se révèle avantageux pour certains bétons légers. Il est nécessaire de poursuivre les recherches pour déterminer l'effet exercé par les agrégats sur la force d'adhérence ainsi que pour fonder la validité des essais de traction auxquels on a recours pour mesurer la force d'adhérence (Fig. 5).

4.5. *Le Module d'élasticité* varie normalement de 110 000 à 210 000 kg/cm² et représente donc la moitié ou les ⅔ de celui du béton ordinaire. Tant pour les bétons ordinaires que légers, on peut obtenir une valeur approximative du module à l'aide d'une formule empirique de la forme suivante:

$$E = \alpha \sqrt{f'_c W^3}\,.$$

La valeur de α est fonction des agrégats et varie entre environ 0,12 et 0,16 en prenant:

E = module d'élasticité, en kg/cm²
f'_c = résistance à la compression, en kg/cm²
W = poids unitaire, en kg/m³.

Les données expérimentales limitées dont on dispose montrent que, pour toutes les applications pratiques, le module d'élasticité du béton léger est le même à la traction qu'à la compression (Fig. 6).

4.6. *Le coefficient de Poisson* est à peu près le même pour le béton pour ouvrages d'art léger ou ordinaire. On admet généralement une valeur de 0,20 aux fins du calcul.

4.7. *Le fluage et le retrait* sont des phénomènes étroitement liés dont les variations couvrent une large gamme, tant pour le béton ordinaire que pour le béton léger. En moyenne, cependant, le fluage et le retrait sont beaucoup plus intenses avec le béton léger. Par commodité, on admet généralement que le principe de superposition s'applique. Ce qui fait que pour déterminer le fluage, c'est-à-dire la déformation différée due aux efforts de longue durée, la méthode courante consiste à soustraire le retrait au séchage présenté par des éprouvettes témoins non chargées de la déformation totale affectant les éprouvettes chargées. Ainsi mesuré, le fluage semble être une fonction inverse de la résistance, et il se manifeste pour la plus grande partie au cours des premiers mois consécutifs à l'application des charges. Le fait que le béton léger acquière moins rapidement sa résistance explique ainsi en partie le fluage plus important qui lui est associé. D'un autre côté, c'est à la rigidité des agrégats qu'est principalement lié le retrait, et il peut croître avec la résistance (Fig. 7 et 8).

Le remplacement des éléments fins par du sable a pour effet de réduire tant le fluage que le retrait, en raison très vraisemblablement de la moins grande quantité d'eau de gâchage qui est requise. Le durcissement à la vapeur réduit également le fluage et le retrait, et ce dans des proportions comprises entre 20 et 40%.

4.8. *Les déformations à la rupture* associées à la plupart des bétons légers sont un peu plus grandes que la valeur 0,003 permise par le Code ACI. Le graphe contrainte-déformation des bétons légers tend à être linéaire jusqu'à des valeurs plus élevées de la résistance à la compression et, de ce fait, le rapport des sections, k_1, k_3, et le rapport des hauteurs au centre de gravité de la

figure des tensions, k_2, sont tous deux un peu moindres qu'avec les bétons ordinaires pour ouvrages d'art. De nouvelles recherches sont nécessaires pour valider l'emploi des coefficients du béton ordinaire dans le calcul à la limite des ouvrages en béton léger.

4.9. *Autres propriétés physiques.* Les bétons légers pour ouvrages d'art ont une longévité étonnante. On a montré que leur résistance au gel et au dégel était égale ou supérieure à celle du béton ordinaire, et ce aussi bien avec que sans entraînement d'air. L'entraînement d'air confère une forte durabilité à l'épreuve des cycles de gel-dégel et de l'écaillage dû aux sels mais, de plus, il améliore sensiblement la maniabilité. Le béton léger peut absorber de 12 à 22% d'eau en volume par comparaison avec les 12% approximatifs du béton ordinaire. Toute relation pouvant lier l'absorption et la durabilité est incertaine et procède de considérations indirectes, ainsi qu'en témoigne le fait que l'entraînement d'air augmente la durabilité sans modifier de façon appréciable l'absorption.

L'enveloppement des armatures se fait en général de la même manière qu'avec le béton ordinaire. On n'a rien signalé qui permette de supposer l'existence de différences significatives en matière de protection contre la corrosion. La rugosité et la dureté superficielles qui caractérisent les agrégats assurent une bonne résistance à l'usure, ainsi qu'il ressort de l'excellente tenue dont il est fait état à propos de nombreux tabliers de ponts exécutés en béton léger. Néanmoins, en raison de sa plus faible résistance à la traction, ce matériau est sujet aux «arrachages» et aux fissurages sous l'effet de chocs localisés. On a constaté qu'un revêtement mince en résine époxy constituait une bonne solution pour remettre en état et protéger les zones soumises à des conditions locales d'abrasion ou d'usure particulièrement sévères.

Le coefficient de dilatation thermique est approximativement égal à 80% de celui du béton contenant des agrégats de densité ordinaire, et il s'en rapproche davantage lorsque l'on prend du sable à la place des éléments fins. La conductibilité calorifique est fonction du poids unitaire à sec du béton et varie de $^1/_5$ à $^1/_3$ de celle du béton ordinaire. Ce qui confère au béton léger une résistance au feu supérieure de 20 à 50% ainsi qu'un meilleur isolement thermique.

5. Règles de calcul

Tant le comportement des ouvrages en service que les essais exécutés sur des pièces de charpente ont montré que les constructions en béton léger se comportaient de manière tout à fait semblable à celles exécutées en béton ordinaire. Eu égard à la plupart des propriétés du béton, la comparaison des comportements est purement une question de degré; les principes de base du calcul sont les mêmes, et ce sont tout au plus des ajustements mineurs qu'il y a lieu de faire pour prendre en compte les effets dus aux différences de propriétés. Dans le passé, on a conçu nombre d'ouvrages parfaitement réussis à partir de

béton léger pour ouvrages d'art sans apporter d'autre modification à l'établissement du projet que la réduction du poids mort.

Pour une grande partie des propriétés du béton léger, les différences qui interviennent ne justifient pas d'apporter des changements au calcul dans les conditions où on le fait habituellement. C'est ainsi que, malgré un coefficient de dilatation thermique légèrement plus faible et un retrait légèrement plus important, il n'y a pas lieu de modifier les conditions auxquelles doivent satisfaire les armatures en prévision des effets du retrait et de la température. De même, la perméabilité du béton léger pour ouvrages d'art ainsi que la largeur des fissures et leur espacement ne diffèrent pas suffisamment pour qu'il soit nécessaire d'apporter des modifications aux caractéristiques minimales de l'enveloppe des armatures. En ce qui concerne d'autres propriétés, telles que le fluage et le retrait, la dispersion est si grande, aussi bien pour le béton ordinaire que pour le béton léger, que les valeurs moyennes peuvent seulement servir de guide dans les jugements qui incombrent à l'ingénieur. Lorsque ces propriétés jouent un rôle déterminant dans l'étude du comportement, il faut baser le calcul sur les données expérimentales dont on dispose à l'endroit des matériaux spécifiques mis en œuvre ou sur l'expérience qu'on en a.

Outre le poids, la résistance à la traction et le module d'élasticité sont des caractéristiques qui, dans le béton léger pour ouvrages d'art, sont elles aussi différentes de manière significative et nécessitent de modifier le calcul.

5.1. *Les éléments fléchis* régis par la résistance à la flexion peuvent être dimensionnés de la même façon que le sont les dalles et poutres en béton ordinaire supportant la même charge totale. Cette façon de procéder est justifiée étant donné que les conditions du calcul à la rupture relatives à la détermination des flexions s'appliquent sans aucune modification au béton léger. La résistance réduite à la traction doit toutefois être prise en considération en ce qui concerne: a) les cisaillements et les tractions obliques, b) le calcul des charges maxima de fissuration des éléments précontraints, et c) pour calculer les déformations, la recherche du point où les éléments cessent d'être homogènes pour devenir fissurés. De même, la capacité d'adhérence peut se trouver réduite, bien que l'adhérence représente rarement un critère du calcul des armatures à haute adhérence.

Lorsque ce sont les déformations qui régissent l'étude, il peut se révéler nécessaire d'augmenter les hauteurs minima d'une quantité atteignant 20% pour compenser les effets de la réduction du module d'élasticité et de l'intensification du cuage et du retrait. Il convient de remarquer que la perte de rigidité à la flexion des pièces n'est pas directement proportionnelle à la diminution du module d'élasticité du béton, du fait de l'accroissement du rapport modulaire, c'est-à-dire du rapport du module d'élasticité de l'acier à celui du béton. Cette augmentation du rapport modulaire est avantageuse, au niveau des contraintes de service, eu égard à la distribution des efforts dans la zone comprimée. C'est ainsi que, pour des sections comparables possédant le même pourcentage d'acier,

la fibre neutre est située plus bas dans une poutre en béton léger que dans une poutre en béton ordinaire. Le résultat est que les contraintes qui apparaissent dans le béton au niveau des charges de service sont un peu plus faibles dans les éléments fléchis en béton léger que dans les pièces de même hauteur en béton ordinaire. Tout ceci, joint à la réduction du poids mort, tend à compenser la perte de rigidité due à la plus faible valeur du module d'élasticité. Il en va de même du moment provoqué par le retrait qui lui aussi reste comparable; le retrait potentiel qui se trouve accru dans le cas du béton léger est en effet compensé par l'abaissement de la fibre neutre.

Cette plus faible valeur de E qui est associée au béton léger donne des pièces plus flexibles, mais cette rigidité réduite peut parfois se révéler avantageuse. En présence de chocs ou de réponses dynamiques, ainsi qu'avec certains types d'ouvrages à haut degré d'hyperstaticité comprenant des voiles avec bords encastrés, cette plus faible rigidité a tendance à réduire les concentrations d'efforts en des points particuliers.

On a montré que les dimensions et la forme des pièces de charpente revêtaient une importance considérable en ce qui concerne le fluage et le retrait ainsi que, dans une certaine mesure, la résistance à la traction du béton léger. Etant donné que ces propriétés sont liées à une perte d'humidité et que la vitesse à laquelle se produisent tant le fluage que le retrait tend à être plus élevée au début, c'est-à-dire avant que le béton ait atteint sa résistance finale, les éléments minces et ceux présentant un rapport surface exposée/volume de valeur élevée ont tendance à manifester un fluage et un retrait beaucoup plus prononcé ainsi qu'une plus faible résistance à la traction. En leur état actuel, les codes de construction américains ne tiennent pas compte de ce facteur de forme bien que le phénomène en question ait été reconnu par les auteurs de certains des codes européenns et dans les recommandations du C.E.B.

Si le béton léger pour ouvrages d'art peut très bien être utilisé dans les pièces en béton précontraint, il est toutefois nécessaire de prendre en considération la réduction du module et de la résistance à la traction dans le calcul des pertes de précontrainte et des ancrages d'extrémité. Bien que les flèches dues au poids mort aient tendance à être compensées par la cambrure résultant de la précontrainte, le raccourcissement de l'axe de la pièce est plus important et provoque des déplacements plus grands aux appuis. La valeur nette de la cambrure des éléments en béton léger précontraint tend à varier à l'intérieur d'une gamme un peu plus large. En raison de l'isolement thermique plus important qu'offre le béton léger, les différences de température ont tendance à être un peu plus fortes. En outre, comme elles ont une plus grande capacité d'absorption, les pièces en béton léger sont davantage susceptibles de gauchir et de subir d'autres distorsions du fait de variations de l'humidité différentielle.

5.2. *Les poteaux* peuvent aussi être dimensionnés sur la même base, qu'il s'agisse de béton ordinaire ou de béton léger, à condition que le flambement ne soit pas un élément déterminant du calcul. Bien que la répartition des con-

traintes dues aux charges axiales entre le béton et l'acier soit quelque peu différente, en raison du fluage et du retrait qui sont un peu plus importants, la résistance ultime est la même puisqu'elle est indépendante du module d'élasticité. Dans le cas des poteaux de grande longueur, il faut toutefois tenir compte de la moindre rigidité des sections. On ne dispose pas d'une information suffisante sur le comportement des poteaux de grande longueur ayant un coefficient d'élancement supérieur à quinze et exécutés en béton léger. En l'état actuel, il semblerait logique d'appliquer un coefficient de 0,8 aux constantes figurant dans les formules de réduction des charges pour employer le béton léger.

Les poteaux représentent une partie relativement peu importante du volume total de béton mis en œuvre dans les immeubles à étages multiples, et l'on a d'autre part tendance actuellement à espacer davantage les poteaux tout en leur donnant des dimensions plus faibles, c'est pourquoi il est devenu courant en Amérique d'utiliser du béton à très haute résistance pour les poteaux et du béton moins résistant pour les planchers. L'emploi conjoint de béton de densité ordinaire dans les poteaux et de béton léger dans les planchers représente une solution à la fois économique et pratique qui permet plus facilement d'éviter l'emploi accidentel pour les poteaux du type de béton qui ne convient pas.

6. Méthodes de construction

Les bétons légers de haute qualité pour ouvrages d'art, dont la mise en œuvre et le finissage ne présentent aucun problème particulier, sont faciles à obtenir si l'on observe les principes fondamentaux de la préparation du béton et des contrôles à effectuer et si l'on tient compte des propriétés individuelles des agrégats. Faute de prendre ces caractéristiques propres en considération, des problèmes peuvent se poser sur le chantier. La plupart des difficultés pouvant survenir, ainsi d'ailleurs que les avantages légitimement escomptés, sont liés à l'absorption élevée et au faible poids unitaire qui caractérisent les agrégats expansés.

Du fait de la variabilité de l'absorption, on ne peut appliquer directement les méthodes classiques de préparation du béton et de contrôle. Mais on a mis au point des procédés de remplacement qui donnent satisfaction, et il convient de les employer. L'entraînement d'air est presque toujours chose souhaitable, non seulement pour accroître la durabilité mais aussi pour améliorer la maniabilité du mélange. Le maintien d'une granulométrie uniforme et constante est un peu plus délicat en raison du caractère de variabilité qui affecte le poids unitaire selon les dimensions des agrégats. Du fait de la légèreté des agrégats, un béton léger de maniabilité donnée ne s'affaisse pas autant que le fait le béton constitué de sable et de gravier. Cette hauteur d'affaissement réduite représente un avantage quand le béton est mis en œuvre sur des pentes assez fortes, comme le cas se présente, par exemple, avec les couvertures en voile mince.

En ce qui concerne la mise en place et le finissage, le béton léger offre certains avantages, mais présente aussi quelques inconvénients, par rapport au béton ordinaire. Le principal avantage tient, bien entendu, au moindre poids des matériaux que l'on a à manipuler. Coffrages et étais peuvent par conséquent être calculés en prévision de charges beaucoup moins fortes. Comme le béton à manipuler pèse moins lourd, les opérations consomment moins d'énergie, la manutention est réduite et l'usure des équipements est moindre. Les principaux inconvénients qui s'attachent à la légèreté des agrégats sont une tendance à la ségrégation, notamment lorsque le béton est trop travaillé ou que le mélange n'est pas convenablement préparé. Alors qu'un entraînement d'air modéré est utile pour accroître la plasticité du mélange, un excès peut provoquer des soufflures et des piqûres à la surface et rendre difficile le finissage. Il faut éviter les vibrations excessives pour prévenir la ségrégation qui, dans le béton léger, est encore beaucoup plus néfaste du fait que les agrégats grossiers plus légers tendent à flotter à la partie supérieure tandis que la pâte plus lourde et les éléments fins tombent au fond.

7. Applications

C'est dans la construction des bâtiments et les applications similaires, où la réduction du poids mort justifie le coût élevé du matériau, que le béton léger pour ouvrages d'art a trouvé sa plus large utilisation. D'une manière générale, c'est à l'une des deux catégories suivantes que ressort l'utilisation du béton léger.

La première comprend les ouvrages dans lesquels le poids mort représente une part importante des charges totales et pour lesquels on peut prescrire l'emploi de béton léger sans se préoccuper du prix du matériau. A titre d'exemples, citons l'emploi du béton léger dans les bateaux ainsi que pour reconstruire ou modifier des parties d'ouvrages et/ou des ouvrages en utilisant des fondations qui existent déjà dans l'hypothèse d'une charge totale limitée.

La seconde catégorie comprend les applications à propos desquelles ce sont des considérations d'ordre économique qui emportent la décision d'employer du béton à agrégats expansés. Parmi les facteurs à prendre en considération pour choisir le béton léger, citons: a) la réduction du poids mort, qui permet de prévoir des sections moins hautes ainsi que des poteaux et des semelles plus faiblement dimensionnés, b) la réduction des charges sismiques, c) les économies au stade de l'exécution permises par l'emploi de coffrages plus légers, la réduction des coûts de manutention du béton ainsi que, pour les éléments préfabriqués, une manutention et un montage plus faciles et des frais de transport réduits, d) la réduction du module d'élasticité et ses effets tant avantageux que défavorables sur la souplesse, y compris les pertes de précontrainte accrues dans les pièces tendues, e) les propriétés thermiques, dont une qualité d'isolement supérieure et une meilleure résistance aux effets du feu.

Le béton léger pour ouvrages d'art a été utilisé avec succès pour réaliser des planchers et des toitures, aussi bien coulés sur place que préfabriqués, des panneaux de mur préfabriqués, des poutres de ponts, des tabliers de pont et des couvertures en voile mince. Ce matériau s'est révélé particulièrement utile dans certaines applications maritimes, parmi lesquelles diverses constructions telles que bateaux de docks flottants, car en effet le poids immergé ne représente que la moitié environ de celui qu'exige le béton ordinaire.

Les innovations récentes en matière de calcul et les progrès actuellement réalisés dans le domaine des matériaux doivent encore étendre la gamme des applications économiquement possibles. Les platelages et planchers en béton léger et comportant également soit des longerons métalliques soit des poutres préfabriquées et/ou précontraintes se sont révélés extrêmement économiques. Les dalles contenant des vides et les pièces composites faites d'éléments préfabriqués et remplies avec du béton cellulaire peuvent être utilement employées pour améliorer tant la rigidité que la qualité isolante des éléments de charpente. Parmi les autres innovations actuellement à l'étude et de nature à modifier radicalement les utilisations du béton léger, nous citerons l'emploi de ciments expansifs destinés à compenser le retrait accru et celui de fils minces ou d'autres renforcements en fibres pour améliorer le comportement du béton à la traction. Ces changements entraîneraient une élévation des coûts, mais cette augmentation, rapportée au coût du béton léger pour ouvrages d'art, serait de beaucoup plus faible que s'il s'agissait de béton ordinaire et, partant, plus facilement justifiée.

Dans le cadre de ce rapport succinct, il n'a été possible que de donner une vue très générale de l'ensemble des propriétés du béton à agrégats expansés et d'aborder très brièvement les applications actuelles de ce matériau. En étudiant de façon plus détaillée des problèmes tels que le contrôle de la qualité tant en matière de production d'agrégats expansés que de béton léger, les méthodes de calcul et d'exécution qui permettent de tirer le meilleur parti des caractéristiques de ce matériau, et les innovations et développements nouveaux de nature à améliorer le matériau et à faire progresser le calcul des ouvrages, les participants au Congrès sont appelés à fournir une documentation étendue qui définira la situation du béton léger. Ces contributions feront beaucoup pour mettre en évidence, de façon précise, les propriétés particulières et les potentialités de ce matériau de construction de qualité.