

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
9 juillet 2009 (09.07.2009)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2009/083809 A2

(51) Classification internationale des brevets :
C04B 28/04 (2006.01) C04B 18/08 (2006.01)
C04B 14/12 (2006.01) C04B 28/02 (2006.01)
C04B 14/16 (2006.01) C04B 14/10 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/IB2008/003988

(22) Date de dépôt international :
10 octobre 2008 (10.10.2008)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0707164 12 octobre 2007 (12.10.2007) FR
0803655 30 juin 2008 (30.06.2008) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : LA-
FARGE [FR/FR]; 61, rue des Belles Feuilles, F-75116
Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : MEILLE,
Sylvain [FR/FR]; 2 Lotissement Le Chatenay, F-38230

Tignieu-Jameyzieu (FR). BONNET, Emmanuel
[FR/FR]; 78 Chemin du Trayllet, F-38730 Chassig-
nieu (FR). CHANVILLARD, Gilles [FR/FR]; Les
Cavetières, F-38790 Saint Georges d'Espérance (FR).
SCHWARTZENTRUBER, Arnaud [FR/FR]; 145 cours
du Docteur Long, F-69003 Lyon (FR).

(74) Mandataires : MERIGEALT, Shona etc.; Lafarge, Dé-
partement Propriété Intellectuelle (DPI), 95 rue du Mont-
murier, BP 9, F-38291 Saint Quentin Fallavier Cedex (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG,
ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL,
IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK,
LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW,
MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT,
RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ,
TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM,
ZW.

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: FORMULATION AND USE OF A LIGHTWEIGHT STRUCTURAL CONCRETE AND METHOD OF OBTAINING IT

(54) Titre : FORMULATION, UTILISATION ET PROCÉDÉ D'OBTENTION D'UN BÉTON LÉGER STRUCTUREL

(57) Abstract: The invention relates to a lightweight structural concrete comprising at least: a hydraulic binder; effective water; a superplasticizer; and aggregates, said concrete having a density in the fresh state varying from 1.40 to a value D_{max} calculated from the formula $(I) D_{max} = 1,58 + (a \cdot MA)$ in which a represents a coefficient equal to 1, advantageously equal to 0.9 and preferably equal to 0.8 and MA represents the percentage by weight of amorphous matter contained in $1 m^3$ of fresh concrete; said concrete having a maximum density in the fresh state D_{max} equal to or less than 1.85, advantageously equal to or less than 1.8 and preferably equal to or less than 1.7; said concrete having an E_{eff}/L ratio varying from 0.19 to 0.46, where E_{eff} represents the effective amount of water in kilograms per cubic metre of fresh concrete and L represents the amount of cement and additions in kilograms per cubic metre of fresh concrete; said concrete comprising an effective amount of water varying from 100 to 230 litres per cubic metre of fresh concrete; said concrete comprising an amount of Portland clinker equal to or greater than 150 kilograms per cubic metre of fresh concrete; said concrete comprising an amount of (Portland clinker + optional additions + optional silica fumes + optional calcined schists + optional calcined clays) equal to or greater than 300 kilograms per cubic metre of fresh concrete; and said concrete having a slurry volume equal to or greater than $300 l/m^3$ of fresh concrete. The invention also describes a method of producing such a concrete, the use of said concrete as building material, and a cured concrete object obtained from such a concrete.

(57) Abrégé : L'invention concerne un béton léger structurel comprenant au moins : - un liant hydraulique; - de l'eau efficace; - un superplastifiant; et - des granulats; ledit béton présentant une densité à l'état frais variant de 1,40 à une valeur D_{max} calculée selon la formule $(I) D_{max} = 1,58 + (a \cdot MA)$ dans laquelle a représente un coefficient dont la valeur est égale à 1, avantageusement égale à 0,9, de préférence égale à 0,8 MA représente le pourcentage massique de matières amorphes contenues dans $1 m^3$ de béton frais; ledit béton présentant une densité à l'état frais maximale D_{max} inférieure ou égale à 1,85, avantageusement inférieure ou égale à 1,8, de préférence inférieure ou égale à 1,7; ledit béton présentant un rapport $E_{efficace}/L$ variant de 0,19 à 0,46, où $E_{efficace}$ représente la quantité d'eau efficace en kilogramme par mètre cube de béton frais L représente la quantité de ciment et d'additions en kilogrammes par mètre cube de béton frais; ledit béton comprenant une quantité d'eau efficace variant de 100 à 230 litres par mètre cube de béton frais; ledit béton comprenant une quantité de clinker Portland supérieure ou égale à 150 kilogrammes par mètre cube de béton frais; ledit béton comprenant une quantité de (clinker Portland + éventuellement additions + éventuellement fumées de silice + éventuellement schistes calcinés + éventuellement argiles calcinées) supérieure ou égale à 300 kilogrammes par mètre cube de béton frais; et ledit béton présentant un volume de pâte supérieur ou égal à $300 l/m^3$ de béton frais. Il est également décrit un procédé de préparation d'un tel béton ainsi que son utilisation en tant que matériau de construction, et un objet en béton durci obtenu à partir d'un tel béton.

WO 2009/083809 A2



(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport*

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

— *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)*

Formulation, utilisation et procédé d'obtention d'un béton léger structurel

Le domaine de l'invention est celui des bétons légers structuraux à faible conductivité thermique. De tels bétons peuvent être destinés à la réalisation de structures coulées en place, de structures préfabriquées ou d'éléments de structure préfabriqués pour bâtiments et structures de génie civil.

Le béton structurel se compose de granulats (c'est à dire de sables, gravillons, graviers, cailloux) qui sont liés entre eux par un liant hydraulique. Un liant hydraulique comprend du ciment et éventuellement des additions. Lorsque le liant hydraulique est mis en présence d'eau, il s'hydrate et fait prise. Des adjuvants sont éventuellement ajoutés pour améliorer les caractéristiques du liant hydraulique. Les proportions relatives des quatre constituants fondamentaux d'un béton courant sont les suivantes :

	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume	14%-22%	1%-6%	7%-14%	60%-78%
Masse	5%-9%	N/A	9%-18%	63%-85%

15

Les résistances mécaniques en compression obtenues classiquement sur éprouvettes cylindriques 16x32 mm, pour du béton structurel normal sont généralement de l'ordre de 25 à 35 MPa, (béton de type C25/30 selon la norme EN 206-1).

Parmi les granulats bien connus dans le domaine des matériaux de construction, on trouve des granulats légers, le plus souvent artificiels et fabriqués à partir de matières minérales, qui sont notamment utilisés pour la fabrication de bétons dits « légers ». Les granulats légers sont notamment définis par la norme NF EN 13055-1 de Décembre 2002. Ces granulats légers sont par exemple des argiles (argiles expansées), des schistes (schistes expansés) ou des silicates (vermiculite ou perlite).

Parmi les granulats bien connus dans le domaine des matériaux de construction, on trouve également des granulats traités, de manière à diminuer leur capacité d'absorption d'eau, par différents types de matériaux et via différents procédés. On trouve par ailleurs des granulats partiellement ou

30

2

totallement pré-saturés en eau, par une immersion réalisée au moins 24 heures avant l'utilisation desdits granulats saturés.

Les granulats sont caractérisés non seulement par les matériaux qui les constituent mais également par leur porosité c'est à dire le volume de vide par unité de volume apparent (ou Volume de vide/Volume total). La porosité est une
5 fonction de la masse volumique réelle Δ et de la masse volumique du solide constituant le granulat γ_0 selon la formule $p\%=100(1-\Delta/\gamma_0)$.

La teneur en eau des bétons structurel utilisés pour l'industrie se situe généralement dans une plage de 5 à 9% en masse. Le béton comprend
10 différentes catégories d'eau. Tout d'abord, l'eau efficace est l'eau située entre les grains du squelette solide formé par les granulats, le ciment et les additions. L'eau efficace représente donc l'eau impliquée dans l'hydratation. D'autre part, le béton comprend de l'eau retenue par la porosité des granulats. Cette eau n'est pas prise en compte dans l'eau efficace. On la suppose prisonnière et ne
15 participant pas à l'hydratation du ciment. L'eau totale représente la totalité de l'eau présente dans le mélange (au moment du malaxage).

La conductivité thermique (encore appelée lambda (λ)) est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert de chaleur par conduction. La conductivité thermique représente la quantité de
20 chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température. Dans le système international d'unités, la conductivité thermique est exprimée en watts par mètre kelvin, ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Les bétons classiques ont une conductivité thermique à 23°C et 50 % d'humidité relative entre 1,3 et 2,1. Les bétons légers structuraux traditionnels possèdent des
25 conductivités thermiques généralement supérieures à 0,8 W/m.K à 23°C et 50 % d'humidité relative.

Diminuer la conductivité thermique des bétons légers structuraux est hautement désirable puisqu'elle permet une économie d'énergie de chauffage dans les immeubles d'habitation ou de travail. De plus cette diminution permet de
30 réduire les ponts thermiques, particulièrement dans les constructions de bâtiments à plusieurs étages et ayant une isolation thermique par l'intérieur, notamment les ponts thermiques des planchers intermédiaires. Cependant, une diminution de la conductivité thermique des bétons est habituellement obtenue par une diminution de la densité des bétons. Or, cette diminution a pour effet une

3

perte de résistance des bétons, ce qui les rend impropres à remplir leur fonction de structure.

Diverses formulations de bétons présentant une conductivité thermique diminuée ont été proposées. Cependant de telles formulations ne permettent pas d'obtenir des valeurs de résistance à la compression suffisantes. Ainsi US 3,814,614 décrit l'utilisation de particules de verre expansé pour l'obtention d'un béton léger dit « structurel ». Les bétons décrits dans ce document ne présentent cependant pas de valeurs de résistance à la compression satisfaisantes. De même GB 1,165,005 décrit l'utilisation de cendres pulvérisées dans des formulations de bétons légers structuraux. Là encore si la conductivité thermique est effectivement diminuée la résistance à la compression de tels bétons est également très diminuée et n'est pas satisfaisante. Enfin l'utilisation de granulats d'argiles ou de schistes expansé(e)s pour la fabrication de bétons légers non structurels est connue, voir par exemple les demandes de brevets publiées BE 843,768 et FR 2,625,131.

Un des buts de l'invention est de proposer une formulation de bétons légers permettant d'allier résistance à la compression suffisante pour un béton de structure et faible conductivité thermique.

Un mode de réalisation de l'invention est un béton léger structurel comprenant au moins :

- un liant hydraulique ;
- de l'eau efficace ;
- un superplastifiant ; et
- des granulats ;

ledit béton présentant une densité à l'état frais variant de 1,40 à une valeur D_{\max} calculée selon la formule (I)

$$D_{\max} = 1,58 + (a \times MA)$$

Formule (I)

dans laquelle a représente un coefficient dont la valeur est égale à 1, avantageusement égale à 0,9, de préférence égale à 0,8

MA représente le pourcentage massique de matières amorphes contenues dans 1 m³ de béton frais ;

4

ledit béton présentant une densité à l'état frais maximale D_{\max} inférieure ou égale à 1,85, avantageusement inférieure ou égale à 1,8, de préférence inférieure ou égale à 1,7 ;

ledit béton présentant un rapport E_{efficace}/L variant de 0,19 à 0,46,

5 où E_{efficace} représente la quantité d'eau efficace en kilogramme par mètre cube de béton frais

L représente la quantité de ciment et d'additions en kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

ledit béton comprenant une quantité d'eau efficace variant de 100 à 230 litres par
10 mètre cube de béton frais ;

ledit béton comprenant une quantité de clinker Portland supérieure ou égale à 150 kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

ledit béton comprenant une quantité de (clinker Portland + éventuellement
cendres volantes + éventuellement laitiers + éventuellement fumées de silice +
15 éventuellement schistes calcinés + éventuellement argiles calcinées) supérieure
ou égale à 300 kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

et ledit béton présentant un volume de pâte supérieur ou égal à 300 l/m³ de béton
frais.

La quantité d'adjuvant peut être ajustée de manière à obtenir un
20 étalement cible à la livraison du béton.

Les granulats selon l'invention peuvent avoir une taille inférieure ou égale
à 31,5 mm.

On entend par « matières amorphes » selon l'invention des substances
minérales non cristallisées, c'est-à-dire ne possédant pas de structure atomique
25 ordonnée.

On entend par « volume de pâte » selon l'invention le volume du ciment,
des additions, de l'eau efficace, de l'air, des adjuvants et des granulats de taille
strictement inférieure à 63 µm.

Le béton léger structurel selon l'invention peut être un béton préfabriqué
30 sur chantier, un béton prêt à l'emploi ou un béton fabriqué dans une usine de
production d'éléments préfabriqués. De préférence, le béton selon l'invention est
un béton prêt à l'emploi. On entend par « béton prêt à l'emploi » selon l'invention
un béton présentant un temps ouvert d'ouvrabilité suffisant pour permettre le
transport du béton jusqu'au chantier où il sera coulé. A la livraison, le béton doit

5

avoir une classe de consistance au moins S3 selon la norme EN 206-1. De préférence, le temps ouvert d'ouvrabilité des bétons prêts à l'emploi peut être d'au moins 2 heures.

Dans le cas où le béton est un béton prêt à l'emploi, il faut :

- 5 - ajuster le dosage en superplastifiant de manière à obtenir un étalement initial du béton frais supérieur ou égal à 550 mm (mesure réalisée selon le document « Bétons autoplaçants – recommandations provisoires » diffusé par l'Association Française de Génie Civil en juillet 2002, annexe 1) ; et
- 10 - utiliser des granulats secs ou pré-saturés en eau présentant une quantité d'eau absorbable inférieure ou égale à 10 % par rapport à la masse totale de granulats secs (dans le cas des granulats pré-saturés en eau, la quantité d'eau absorbable considérée sera la quantité d'eau absorbable avant la pré-saturation moins
- 15 la quantité d'eau utilisée pour la pré-saturation). De manière équivalente, en utilisant d'autres unités, la quantité d'eau absorbable des granulats utilisés dans les formulations de béton prêt à l'emploi selon la présente invention doit être inférieure ou
- égale à 80 litres par mètre cube de béton frais.

- 20 Selon une variante, le béton selon l'invention peut comprendre :
- de 0,5 à 20 % en volume d'air.

Un liant hydraulique selon l'invention comprend du ciment Portland et éventuellement des additions. Le ciment Portland selon l'invention est tel que défini dans la norme Européenne EN 197-1. Il comprend principalement du

25 clinker Portland. On entend par le terme « clinker Portland » selon la présente invention un matériau hydraulique constitué d'au moins deux tiers en masse de silicates de calcium ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ et $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), la partie restante étant constituée de phases contenant de l'aluminium et du fer, ainsi que d'autres composants. Le rapport massique $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ ne doit pas être inférieur à 2,0.

30 La teneur en oxyde de magnésium (MgO) ne doit pas dépasser 5,0 % en masse.

Les additions sont généralement des matériaux pulvérulents utilisables en substitution partielle du ciment. Les additions selon l'invention peuvent être des poudres calcaires, siliceuses ou silico-calcaires, des cendres volantes, des laitiers, des fumées de silice, des schistes calcinés, des argiles calcinées (dont

6

les métakaolins), des pouzzolanes ou leurs mélanges. Les additions sont telles que définies dans la norme Européenne EN 206 paragraphe 3.1.23.

Les poudres calcaires, siliceuses ou silico-calcaires selon l'invention sont des granulats fins, caractérisés par une taille de particules variant en général de
5 0.1 à 125 μm .

On entend par le terme « cendre volante » selon la présente invention un matériau obtenu par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé (voir norme EN 197-1 paragraphe 5.2.4). Les cendres volantes selon
10 l'invention peuvent être de nature siliceuse ou calcique.

On entend par le terme « laitier » selon la présente invention un laitier choisi parmi les laitiers granulés de haut fourneau selon la norme EN 197-1 paragraphe 5.2.2.

On entend par le terme « fumée de silice » selon la présente invention un
15 matériau obtenu par réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arcs électriques utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium (voir norme EN 197-1 paragraphe 5.2.7). Les fumées de silice sont formées de particules sphériques comprenant au moins 85% en masse de silice amorphe.

On entend par le terme « schiste calciné » selon la présente invention un
20 matériau produit dans un four spécial à une température d'environ 800°C comprenant principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate monocalcique. (voir norme EN 197-1 paragraphe 5.2.5)

On entend par le terme « argiles calcinées » selon la présente invention
25 des argiles qui ont subi un traitement thermique.

On entend par le terme « argiles » selon la présente invention des phyllosilicates, principalement à structure en feuillets, voire fibreux (par exemple des silicates d'aluminium et/ou de magnésium), qui, caractérisés par diffraction par rayons X par exemple, possèdent un paramètre de maille atomique des
30 plans cristallographiques [001] ($d_{(001)}$) variant de 7 à 15 Angströms. Les argiles selon l'invention peuvent être choisies parmi la kaolinite ($d_{(001)} = 7$ Angströms), les smectites (terme générique utilisé pour désigner les argiles gonflantes, dont la montmorillonite), l'illite, la muscovite ($d_{(001)} = 10$ Angströms), les chlorites ($d_{(001)} = 14$ Angströms), ou leurs mélanges.

On entend par le terme « pouzzolanes » selon la présente invention des matériaux siliceux et/ou silico-alumineux comprenant essentiellement du SiO₂ réactif et du Al₂O₃. Parmi les pouzzolanes, on peut citer les pouzzolanes naturelles, qui sont en général des matériaux d'origine volcanique ou des roches sédimentaires, et les pouzzolanes calcinées, qui sont des matériaux d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires activés thermiquement. (voir norme EN 197-1 paragraphe 5.2.3) Les pouzzolanes selon l'invention peuvent être choisies parmi les ponces, les tuff, les scories ou leurs mélanges.

Selon une variante, le béton selon l'invention comprend au moins un granulats traité. De préférence, tous les granulats sont des granulats traités. On entend par « granulats traités » selon l'invention des granulats qui ont fait l'objet d'un mélange ou d'une aspersion avec un matériau qui leur confère une propriété particulière. Par exemple, le traitement peut rendre les granulats plus hydrophobes ou diminuer leur capacité d'absorption en eau. Un granulats traité selon l'invention peut être :

- imprégné avec une résine pure (à base d'alcane, d'asphalte, de polyéthylène vinyl acétate, de silane, de siloxane ou encore d'époxy) ; ou
- imprégné par immersion ou pulvérisation d'une émulsion des résines citées ci-dessus ; ou
- imprégné avec une solution qui gélifie dans le temps, comme par exemple un gel inorganique (silicate de sodium, hydroxyde d'aluminium, hydroxyde de fer, hydroxyde de magnésium, ou gel de carbonate de calcium), un gel organique (acétate de cellulose, nitro-cellulose ou alcool + oléate de sodium), ou encore un gel organique naturel (polysaccharide, dont le dextran ou l'agar-agar, caséine ou huiles gélifiées).

Selon une variante, le béton selon l'invention comprend des billes de polystyrène. Lesdites billes de polystyrène peuvent être utilisées en remplacement partiel ou total de l'air, et/ou en remplacement partiel des granulats.

Selon une variante, le béton selon l'invention comprend un liant hydraulique choisi parmi un ciment de type :

8

- CEM III, CEM IV ou CEM V, ou
- CEM I ou CEM II, en mélange avec des additions.

De préférence, les additions peuvent être de type laitier et/ou cendres volantes et/ou fumées de silice. Selon une variante, le béton selon l'invention comprend un ciment de type CEM I ou CEM II, en mélange avec des additions
5 de type laitier et/ou cendres volantes et/ou fumées de silice.

Selon une variante, le béton selon l'invention comprend des granulats choisis parmi les gravillons, les sables ou leurs mélanges. De préférence, le béton selon l'invention comprend un rapport volumique sable/gravillons variant de 3/7 à
10 7/3.

Selon une variante, le béton selon l'invention comprend une proportion d'air en volume variant de 1% à 16 %, de préférence de 2% à 8% en volume. De préférence, la proportion d'air en volume est inférieure à 5%.

Selon une variante, le béton selon l'invention comprend un superplastifiant
15 tel qu'un polycarboxylate polyoxyde.

De préférence, le béton selon l'invention comprend des granulats légers. Selon une variante du béton selon l'invention, la totalité des granulats sont des granulats légers.

Selon une autre variante de l'invention, le béton léger structural selon
20 l'invention comprend des granulats non légers. De préférence, la totalité des granulats sont des granulats non légers.

Selon une autre variante, le béton selon l'invention comprend des granulats de verre expansé. De préférence, tous les granulats sont des granulats de verre expansé. Cette solution est notamment avantageuse pour augmenter la quantité
25 de matière amorphe dans le béton selon l'invention.

De préférence, le béton selon l'invention comprend une quantité de granulats inférieure ou égale à 700 litres par mètre cube de béton frais.

Pour obtenir et contrôler la proportion d'air désirée il est possible d'ajouter à la composition un ou plusieurs adjuvants entraîneurs d'air. Ces adjuvants sont
30 d'usage courant dans le domaine des bétons et peuvent être par exemple choisis dans le groupe des tensioactifs ioniques ou non ioniques, par exemple les oléates, les sulfonates et les carboxylates.

Le liant hydraulique selon l'invention comprend du ciment et éventuellement des additions.

Le ciment selon l'invention est de préférence tel que défini par la norme Européenne EN197.1. Aussi, le ciment selon l'invention peut être de type CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ou CEM V. De préférence, le ciment selon l'invention est de type :

- 5 - CEM III, CEM IV ou CEM V, ou
 - CEM I ou CEM II, en mélange avec des additions.

De préférence, les additions selon l'invention peuvent être des laitiers et/ou des cendres volantes et/ou des fumées de silice. Avantageusement, les additions selon l'invention sont des laitiers.

- 10 La demanderesse a découvert que l'utilisation d'un ciment de type CEM III, CEM IV ou CEM V, ou de types CEM I ou CEM II, avec des additions de type laitier et/ou cendres volantes et/ou fumées de silice permet d'obtenir, de manière
surprenante, un béton léger structural comprenant moins de 5% en volume d'air,
tout en conservant une conductivité thermique inférieure à 0,65 W/m.K à 23°C et
15 50% d'humidité relative (HR). De préférence, l'utilisation d'un ciment de type
CEM III, CEM IV ou CEM V, ou de types CEM I ou CEM II, avec des additions de
type laitier et/ou cendres volantes et/ou fumées de silice permet de ne pas
ajouter d'air lors de la préparation d'un béton léger structural selon l'invention,
tout en conservant une conductivité thermique inférieure à 0,65 W/m.K à 23°C et
20 50% d'HR (humidité relative).

On appelle conductivité thermique selon l'invention la conductivité thermique à 23°C et 50% d'HR, déterminée selon le protocole suivant :

- mesure de la conductivité thermique à sec selon la méthode de la
plaque chaude gardée (norme ISO 8302), après séchage complet de
25 l'échantillon, puis
- conversion de la valeur obtenue pour correspondre à des conditions
d'humidité relative de 50% en appliquant un coefficient de 1,083,
conformément à la norme NF EN ISO 10456 paragraphe 7.3.

- Des adjuvants peuvent être ajoutés pour modifier la vitesse de prise ou
30 pour modifier ou contrôler certaines propriétés physico-chimiques de la
composition, comme par exemples des plastifiants ou des agents hydrofugeants.

Selon un mode de réalisation préféré de l'invention, on utilise un adjuvant superplastifiant de la famille des polycarboxylates polyoxyde (PCP). D'autres adjuvants superplastifiants qui peuvent être utilisés pour la mise en pratique de

l'invention sont, par exemple, les polynaphtalènes sulfonates, les lignosulfonates, les phosphonates, le carboxylates, les résines mélamines.

Selon un mode de réalisation préféré, le béton léger structural possède une conductivité thermique à 23°C et 50% d'HR inférieure à 0,65 W/m.K, 5
préférentiellement inférieure à 0,60 W/m.K, et encore plus préférentiellement inférieure à 0,55 W/m.K.

Avantageusement le béton selon l'invention présente une conductivité thermique à 23°C et 50% d'HR inférieure à 0,60 W/m.K pour des bétons appartenant à une classe de résistance LC 25/28 (c'est-à-dire ayant une 10
résistance caractéristique à la compression à 28 jours sur cylindre d'au moins 25MPa, déterminée selon la norme EN 206). Selon un mode de réalisation préféré la résistance caractéristique à la compression est d'au moins 28MPa, plus particulièrement d'au moins 35MPa et encore plus préférentiellement d'au moins 45MPa.

15 L'invention porte également sur un procédé de préparation d'un béton léger structural tel que décrit ci-dessus, ce procédé comprenant le mélange d'au moins :

- un liant hydraulique ;
- de l'eau efficace ;
- 20 - un superplastifiant ; et
- des granulats ;

ledit béton présentant un rapport E_{efficace}/L variant de 0,19 à 0,46,

où E_{efficace} représente la quantité d'eau efficace en kilogramme par mètre cube de béton frais

25 L représente la quantité de ciment et d'additions en kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

ledit béton comprenant une quantité d'eau efficace variant de 100 à 230 litres par mètre cube de béton frais ;

ledit béton comprenant une quantité de clinker Portland supérieure ou égale à 30
150 kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

ledit béton comprenant une quantité de (clinker Portland + éventuellement cendres volantes + éventuellement laitiers + éventuellement fumées de silice + éventuellement schistes calcinés + éventuellement argiles calcinées) supérieure ou égale à 300 kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

et ledit béton présentant un volume de pâte supérieur ou égal à 300 l/m³ de béton frais.

Selon une autre variante, l'invention porte également sur un procédé de préparation d'un béton léger structural tel que décrit ci-dessus, ce procédé

5 comprenant le mélange d'au moins :

- un liant hydraulique ;
- de l'eau efficace ;
- un superplastifiant ; et
- des granulats ;

10 ledit béton étant caractérisé en ce qu'il présente une densité à l'état frais variant de 1,40 à une valeur D_{max} calculée selon la formule (I)

$$D_{max} = 1,58 + (a \times MA)$$

Formule (I)

15 dans laquelle a représente un coefficient dont la valeur est égale à 1, avantageusement égale à 0,9, de préférence égale à 0,8

MA représente le pourcentage massique de matières amorphes contenues dans 1 m³ de béton frais ;

ledit béton présentant une densité à l'état frais maximale D_{max} inférieure ou égale à 1,85, avantageusement inférieure ou égale à 1,8, de préférence inférieure ou

20 égale à 1,7 ;

ledit béton présentant un rapport $E_{efficace}/L$ variant de 0,19 à 0,46,

où $E_{efficace}$ représente la quantité d'eau efficace en kilogramme par

mètre cube de béton frais

25 L représente la quantité de ciment et d'additions en kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

ledit béton comprenant une quantité d'eau efficace variant de 100 à 230 litres par mètre cube de béton frais ;

ledit béton comprenant une quantité de clinker Portland supérieure ou égale à 150 kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

30 ledit béton comprenant une quantité de (clinker Portland + éventuellement cendres volantes + éventuellement laitiers + éventuellement fumées de silice + éventuellement schistes calcinés + éventuellement argiles calcinées) supérieure ou égale à 300 kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

et ledit béton présentant un volume de pâte supérieur ou égal à 300 l/m³ de béton frais.

Un autre mode de réalisation de l'invention est l'utilisation d'un béton léger structural tel que décrit ci-dessus comme matériau de construction.

- 5 Un troisième mode de réalisation de l'invention est un objet en béton durci obtenu à partir d'un béton léger structural tel que décrit ci-dessus.

Exemples de modes de réalisation préférés

Détermination de la quantité de matières amorphes dans le béton

- 10 On détermine tout d'abord la quantité de matière amorphe de chaque constituant solide du béton de la manière décrite ci-dessous.

On réalise un mélange entre le constituant à analyser et un composé de référence entièrement cristallisé dont on connaît la composition (par exemple rutil, alumine ou zircon). Le mélange comprend en général 50 % en masse du constituant à analyser et 50 % en masse du composé de référence. Le mélange doit être parfaitement homogénéisé et les proportions relatives du constituant à analyser et du composé de référence doivent être connues avec précision.

- 15 Le composé de référence sera choisi en fonction du constituant à analyser. De préférence, selon un premier cas, le composant de référence est différent des cristaux que l'on peut trouver dans le constituant à analyser. Dans tous les cas, afin de ne pas fausser la mesure quantitative, on choisira un composé de référence proche en terme d'intensité de réponse des cristaux présents dans le constituant à analyser, comme cela est connu dans le domaine de la diffraction par rayons X.

- 25 On réalise une mesure quantitative du mélange, par exemple en utilisant la méthode de diffraction par rayons X quantitative (voir à ce sujet la publication *Quantitative X-Ray Diffraction Analysis*, L.E. COPELAND and Robert H. BRAGG, Analytical Chemistry).

- 30 On obtient la nature et la quantité des cristaux présents dans le mélange. La matière amorphe ne diffracte pas les rayons X et n'apparaît donc pas dans les résultats de la mesure quantitative. La quantité de matière amorphe du constituant à analyser (MA_i) en pourcentage massique par rapport à la masse du constituant à analyser peut être déterminée selon la formule (II) suivante :

13

$$MA_i = 100 \times [100 \div (100 - X_0)] \times [1 - (X_0 \div X_m)]$$

Formule (II)

dans laquelle X_0 représente le pourcentage massique du composé de référence dans le mélange (constituant à analyser + composé de référence) ;

5 X_m représente le pourcentage massique du composé de référence déterminé par la mesure quantitative.

Selon un deuxième cas, le matériau de référence est une phase cristalline également présente dans le constituant à analyser, la mesure quantitative est appliquée d'abord séparément au constituant à analyser et au matériau de
10 référence, afin de déterminer la quantité de la phase cristalline commune dans le constituant à analyser. De cette manière, connaissant la quantité de la phase cristalline dans le constituant à analyser et la proportion relative du constituant à analyser et du matériau de référence, on peut déterminer X_m . Ensuite, on peut appliquer la formule (II).

15 Enfin, pour obtenir la quantité de matière amorphe dans le béton frais (en pourcentage massique), on multiplie la quantité de matière amorphe de chacun des constituants du béton par la quantité de ce constituant dans 1 mètre cube de béton, puis on fait la somme des différentes valeurs obtenues.

20 Le béton léger structural selon l'invention est exemplifié par les modes de réalisations préférentiels décrits ci-dessous.

Exemples 1 et 2 : granulats de schiste expansé

Exemple 1

25

Composants	masses et volumes rapportés au m ³ de matériau frais	% en poids
Ciment portland Artificiel	373 kg	24,5% en poids
Eau totale	188 l	12,5%
...(dont eau efficace)	103 l	7,5%)
Air	143 l soit 14.3% en volume	

Composants	masses et volumes rapportés au m³ de matériau frais	% en poids
Sable de schiste expansé	539 kg	35.5%
Gravillons de schiste expansé	408 kg	27%
Superplastifiant	6 l	0.4%
Entraîneur d'air	3 l	0.2%
Matières amorphes	0	0

Le ciment utilisé est du ciment de Portland artificiel de masse volumique de 3,15. Ce ciment est de la classe CEM I 52,5 (Standard EN197-1) provenant de l'usine du Havre.

- 5 Le sable de schiste expansé possède une masse volumique réelle à l'état sec de 1,92 et une absorption d'eau de 4,5% en poids.

Les gravillons de schiste expansé ont une granulométrie allant de 4 à 10 mm, une masse volumique réelle de 1,29 et une absorption d'eau de 7,2% en poids. Ils proviennent de la société GEM (Mayenne, France).

- 10 L'adjuvant superplastifiant est de la famille des polycarboxylates polyoxyde (PCP), il s'agit du GLENIUM 27 de la société BASF et l'entraîneur d'air choisi est un sulfonate : le Microair 104 de la société BASF. Le filler calcaire présente une densité de 2,6 et une distribution granulométrique comprise entre 0 et 100 µm (diamètre médian 8 µm), et est disponible sous le nom de BETOCARB HP-EN
- 15 (anciennement appelé BETOCARB P2 d'Entrains) par la société OMYA.

La détermination de la teneur en air des bétons a été réalisée selon la norme ASTM C173.

- 20 Le procédé de fabrication est celui de bétons légers standards et peut être modifié et/ou ajusté si désiré. Le procédé utilisé dans ces exemples est le même pour les exemples 1 à 3.

Dans ces exemples les ingrédients sont introduits dans un malaxeur standard de marque ZYKLOS.

Une étape préliminaire de pré-mouillage des granulats est effectuée pendant laquelle les granulats sont malaxés deux minutes avec l'eau de pré-

mouillage puis sont laissés en repos pour une certaine période de temps (par exemple 24 heures). Puis les étapes suivantes sont effectuées :

- Mélange des granulats pendant 1 minute
- Arrêt du malaxage pendant 4 minutes
- 5 - Introduction en 30 secondes des liants (ciment et filler)
dans le malaxeur
- Reprise du malaxage pendant 1 minute
- Introduction en 30 secondes de l'eau de gâchage dans le
malaxeur, tout en maintenant le malaxage
- 10 - Malaxage pendant 1 minute.

Les cylindres et les cubes sont confectionnés en trois couches, et le matériau est mis en place au moyen d'une barre de piquage. Après remplissage des moules, les éprouvettes sont conservées à $20\pm 1^\circ\text{C}$ et à 95% HR. Après démoulage à 24 h elles sont placées dans l'eau pour les éprouvettes de densité
15 supérieure à 1 et sur une étagère pour les autres. Les cylindres de compression sont rectifiés avant essai.

Les mesures de résistance à la compression sont effectuées sur des cylindres de 11 cm de diamètre et de 22 cm de hauteur. Une estimation de la résistance sur cube de 15 cm de côté est également donnée.

20 Pour obtenir la densité à l'état frais du béton, on détermine la masse volumique du béton frais selon la norme EN12350-6, puis on la divise par la masse volumique de l'eau, soit 1000 kilogrammes par mètre cube.

La teneur en eau efficace d'un béton est la différence entre la quantité d'eau totale contenue dans 1 mètre cube de béton frais et la quantité d'eau
25 absorbable par les granulats. La quantité d'eau absorbable par les granulats est déterminée en multipliant le coefficient d'absorption d'eau des granulats par la masse de granulats secs dans 1 mètre cube de béton. Le coefficient d'absorption d'eau des granulats est obtenue selon la méthode décrite dans l'annexe C de la norme EN 1097-6 à 24h. Cette méthode est valable pour les granulats dont la
30 taille varie de 4 à 31,5 mm. Pour les granulats dont la taille est inférieure à 4 mm, il faut utiliser la méthode décrite dans la norme EN1067-6 chapitre 9.

Les autres propriétés du béton ainsi obtenu ont été déterminées en utilisant les normes EN12390-3, EN206-1, ISO 3806 et NF EN ISO 10456. Ces propriétés caractéristiques sont les suivantes :

	Rapport E_{efficace}/L :	0,28
	Densité à l'état frais :	1,48
	Densité à l'état sec :	1,39
5	Résistance en compression à 28 jours sur cylindre :	35 MPa
	Estimation de la résistance sur cube de 15 cm de côté :	40 MPa
	Conductivité thermique à 23°C et 50% d'HR :	0,58 W/m.K

Exemple 2 :

10

Composants	Masses et volumes rapportés au m ³ de matériau frais	% en poids
Masse ciment de Portland	393 kg	25%
Masse de filler calcaire	126 kg	8%
Eau totale	209 l	13%
(...dont Eau efficace)	152 l	9,5%)
Air	80 l soit 8% en volume	
Sable de schiste expansé	546 kg	34,5%
Gravillons de schiste expansé	298 kg	19%
Superplastifiant	5 l	0,3%
Entraîneur d'air	1 l	0,05%
Matières amorphes	0	0

Le ciment, le superplastifiant, l'entraîneur d'air et le filler calcaire sont les mêmes que ceux décrits à l'exemple 1.

15 Le sable de schiste expansé possède une masse volumique réelle à l'état sec de 1,92, et une absorption d'eau de 4,5% en masse.

Les gravillons de schiste expansé ont une granulométrie allant de 4 à 10 mm, une masse volumique réelle de 1,29 et une absorption d'eau de 7,2% en

masse. Le sable et les gravillons proviennent de la société GEM (Mayenne, France).

Propriétés du béton ainsi obtenu :

5	Rapport E_{efficace}/L ;	0,29
	Densité à l'état frais :	1,58
	Densité à l'état sec :	1,41
	Résistance mécanique en compression	
10	à 28 jours sur cylindre :	40 MPa
	Estimation de la résistance sur cube de 15 cm de côté :	45 MPa
	Conductivité thermique à 23°C et 50% d'HR :	0,61 W/m.K

Exemple 3 : Seconde classe de granulats : argile expansée

15

Composants	Masses et volumes rapportés au m ³ de matériau frais	% en poids
Masse de ciment Portland	433 kg	27,5 %
Masse de filler calcaire	150 kg	9,5 %
Eau totale	275 l	17,5 %
(...dont Eau efficace)	119 l	7,5%
Air	90 l soit 9% en volume	
Sable d'argile expansée	307 kg	19,5 %
Gravillons d'argile expansée	394 kg	25 %
Superplastifiant	4 l kg	0,25%
Entraîneur d'air	0,8 l kg	0,05%
Matières amorphes	0	0

18

Le ciment de Portland, le filler, le superplastifiant et l'entraîneur d'air sont les mêmes que ceux utilisés à l'exemple 1.

Le sable d'argile expansée possède une masse volumique réelle à l'état sec de 1,15, et une absorption d'eau de 28% en masse.

- 5 Les gravillons d'argile expansée ont une granulométrie allant de 4 à 8 mm, une masse volumique réelle de 1,28 et une absorption d'eau de 18% en masse. Le sable et les gravillons proviennent de la société Argex (Belgique).

Propriétés du béton ainsi obtenu :

10

Rapport E_{efficace}/L :	0,20
Densité à l'état frais :	1,41
Densité à l'état sec :	1,26
Résistance mécanique en compression	
15 à 28 jours sur cylindre :	29 MPa
Estimation de la résistance sur cube de 15 cm de côté :	33 MPa
Conductivité thermique à 23°C et 50% d'HR :	0,52 W/m.K

20 Les formulations de bétons légers structurels selon l'invention allient une forte résistance à la compression à une conductivité thermique diminuée par rapport à celles des bétons habituellement disponibles dans le domaine. De plus ces formulations sont simples et aisées à mettre en pratique. Enfin les matériaux utilisés sont d'un coût relativement faible et facilement disponibles. Ceci rend ces formulations particulièrement utiles dans l'industrie.

25

Exemple 4 : Seconde classe de granulats : argile expansée – impact de la nature des additions utilisées

30 La substitution volumique du filler calcaire évoquée précédemment par de la cendre volante ou du laitier de hauts fourneaux permet de diminuer considérablement la conductivité thermique sans pénaliser les résistances mécaniques.

L'exemple avec le laitier montre qu'avec ce type d'addition, il est possible de formuler un béton sans air entraîné.

Composants	Masses et volumes rapportés au m ³ de matériau frais		
	Filler calcaire	Cendres volantes	Laitier
Masse de ciment Portland	408 kg	408 kg	408 kg
Masse de filler calcaire	172 kg		
Masse de cendres volantes		152 kg	
Masse de laitier			195 kg
Eau totale	266 l	266 l	266 l
(...dont Eau efficace)	133 l	133 l	133 l
Air	25 l soit 2,5% en volume	25 l soit 2,5% en volume	25 l soit 2,5% en volume
Sable d'argile expansée	306 kg	306 kg	306 kg
Gravillons d'argile expansée	344 kg	344 kg	344 kg
Superplastifiant	4,06 kg	3,92 kg	4,22 kg
Plastifiant	1,33 kg	1,29 kg	1,39 kg
Matières amorphes	0	103 kg	185 kg

Le ciment de Portland, le filler calcaire, le superplastifiant sont les mêmes que ceux présentés à l'exemple 1. Le sable et les gravillons d'argiles expansés sont identiques à ceux présentés dans l'exemple 3. L'adjuvant plastifiant est de la famille des lignosulfonates, il s'agit du POZZOLITH 391N de la société BASF.

La cendre volante utilisée est une cendre de type V (EN 197-1) distribuée par la société Surchistes et provient de la centrale thermique de Carling. La densité de cette cendre est de 2,36, la surface spécifique Blaine est de 3520 cm²/g.

Le laitier utilisé dans cet exemple est le laitier produit par la Société Mittal-Arcelor à Fos Sur Mer. La densité de ce laitier est de 2,95, la surface spécifique Blaine est de 3258 cm²/g.

Le pourcentage massique de matières amorphes est respectivement de 67,8% dans les cendres volantes et de 94,9% dans le laitier.

Propriétés des bétons ainsi obtenus :

Type d'addition	Filler calcaire	Cendres volantes	Laitier
Rapport E_{efficace}/L :	0,23	0,24	0,22
Densité à l'état frais :	1,65	1,63	1,67
Densité à l'état sec :	1,47	1,46	1,48
Résistance mécanique en compression à 28 jours sur cylindre :	41,8	44	40,8
Estimation de la résistance sur cube de 15 cm de côté :	46,8	49,2	45,7
Conductivité thermique à 23°C et 50% d'HR :	0,697	0,635	0,598

5

L'utilisation de laitier ou de cendres volantes à la place du filler calcaire permet de diminuer le conductivité thermique pour des résistances mécaniques équivalentes.

De plus, pour une quantité d'air aussi faible que 2,5% en volume, les formulations comprenant du laitier ou des cendres volantes permettent d'obtenir un coefficient de conductivité thermique inférieure à 0,65, alors que la formulation comprenant le filler calcaire ne le permet pas. L'utilisation de laitier ou de cendres volantes à la place du filler calcaire permet donc de diminuer la quantité d'air tout en maintenant un coefficient de conductivité thermique faible.

L'association du ciment Portland avec les additions à base de laitier ou de cendres peut être remplacée par des ciments composés aux laitiers et/ou aux cendres volantes de type CEM II/A, CEM II/B, CEM III/A, CEM III/B, CEM III/C, CEM V/A ou CEM V/B.

Il est bien entendu que toute caractéristique décrite en rapport avec n'importe quel mode de réalisation peut être utilisée seule, ou en combinaison avec d'autres caractéristiques décrites, et peut aussi être utilisée en combinaison avec une ou plusieurs caractéristiques de n'importe quel autre des modes de

20

réalisation, ou n'importe quelle combinaison de n'importe quel autre des modes de réalisation.

23

2. Béton selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend :

- de 0,5 à 20 % en volume d'air.

5 3. Béton léger structurel selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un granulats traité.

10 4. Béton selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il comprend un liant hydraulique choisi parmi un ciment de type :

- CEM III, CEM IV ou CEM V, ou
- CEM I ou CEM II, en mélange avec des additions.

15 5. Béton selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce qu'il comprend un ciment de type CEM I ou CEM II, en mélange avec des additions de type laitier et/ou cendres volantes et/ou fumées de silice.

20 6. Béton selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que la proportion d'air en volume dans le mélange est varié de 1% à 16 %, de préférence de 2% à 8% en volume.

25 7. Béton selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que la proportion d'air en volume est inférieure à 5%.

8. Béton selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce qu'il comprend un superplastifiant tel qu'un polycarboxylate polyoxyde.

30 9. Procédé de préparation d'un béton léger structurel selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, ce procédé comprenant le mélange d'au moins :

- un liant hydraulique ;
- de l'eau efficace ;

24

- un superplastifiant ; et
- des granulats ;

ledit béton présentant un rapport E_{efficace}/L variant de 0,19 à 0,46,

5 où E_{efficace} représente la quantité d'eau efficace en kilogramme par mètre cube de béton frais

L représente la quantité de ciment et d'additions en kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

ledit béton comprenant une quantité d'eau efficace variant de 100 à 230 litres par mètre cube de béton frais ;

10 ledit béton comprenant une quantité de clinker Portland supérieure ou égale à 150 kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

ledit béton comprenant une quantité de (clinker Portland + éventuellement cendres volantes + éventuellement laitiers + éventuellement fumées de silice + éventuellement schistes calcinés + éventuellement argiles calcinées) supérieure

15 ou égale à 300 kilogrammes par mètre cube de béton frais ;

et ledit béton présentant un volume de pâte supérieur ou égal à 300 l/m³ de béton frais.

20 10. Utilisation d'un béton léger structurel selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 comme matériau de construction.

11. Objet en béton durci obtenu à partir d'un béton léger structurel selon l'une quelconque des revendications 1 à 8.