



(12) **DEMANDE DE BREVET CANADIEN
CANADIAN PATENT APPLICATION**

(13) **A1**

(86) **Date de dépôt PCT/PCT Filing Date:** 2022/12/08
(87) **Date publication PCT/PCT Publication Date:** 2023/06/15
(85) **Entrée phase nationale/National Entry:** 2024/06/07
(86) **N° demande PCT/PCT Application No.:** EP 2022/085069
(87) **N° publication PCT/PCT Publication No.:** 2023/105003
(30) **Priorité/Priority:** 2021/12/10 (FR FR2113317)

(51) **Cl.Int./Int.Cl. C04B 7/52** (2006.01),
C04B 28/04 (2006.01)
(71) **Demandeur/Applicant:**
VINCI CONSTRUCTION FRANCE, FR
(72) **Inventeurs/Inventors:**
CUSSIGH, FRANCOIS, FR;
FRANCO, PAUL-ALEXANDRE, FR;
SEMENADISSE, JULIEN, FR
(74) **Agent:** ROBIC AGENCE PI S.E.C./ROBIC IP AGENCY
LP

(54) **Titre : BETON A FAIBLE DOSAGE EN CIMENT**
(54) **Title: CONCRETE HAVING A LOW CEMENT CONTENT**

(57) **Abrégé/Abstract:**

La présente invention concerne une composition de béton frais comprenant au moins : i) un liant hydraulique comprenant : - de 20% à 40% en poids de clinker Portland par rapport au poids total dudit liant, - de 45% à 75% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant, et - de 5% à 15% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total dudit liant, étant choisi parmi les additions hydrauliques, les additions pouzzolaniques, les ciments ultrafins et leurs mélanges, ii) au moins un superplastifiant ou plastifiant, iii) de l'eau, et iv) des granulats.



Date de soumission : 2024/06/07

No de la demande can. : 3240413

Abrégé:

La présente invention concerne une composition de béton frais comprenant au moins : i) un liant hydraulique comprenant : - de 20% à 40% en poids de clinker Portland par rapport au poids total dudit liant, - de 45% à 75% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant, et - de 5% à 15% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total dudit liant, étant choisi parmi les additions hydrauliques, les additions pouzzolaniques, les ciments ultrafins et leurs mélanges, ii) au moins un superplastifiant ou plastifiant, iii) de l'eau, et iv) des granulats.

Description**Titre : Béton à faible dosage en ciment****Domaine technique**

5

La présente invention se rapporte à un béton de structure formulé à partir d'un liant à faible teneur en clinker et forte teneur en filler, en particulier possédant une consistance fluide à l'état frais. L'invention concerne également un procédé de fabrication d'un tel béton.

10 **Technique antérieure**

L'utilisation des bétons de ciment, conventionnellement considérés à titre de bétons de structure, pose un souci en termes d'impact environnemental. Plus précisément, ces bétons requièrent la mise d'un œuvre d'un liant à base de ciment Portland pour agglomérer un mélange de granulats et de sable. Or, la fabrication du clinker, constituant essentiel du ciment Portland, contribue fortement aux émissions de CO₂.

Afin de réduire les émissions de CO₂ liées à la fabrication de bétons, il a été proposé de substituer partiellement au clinker un ou plusieurs matériaux de substitution tels que les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes, la fumée de silice, le métakaolin, ou encore les fillers calcaires ou siliceux. Or, une substitution importante de la teneur en clinker a généralement pour conséquence d'impacter négativement les propriétés d'un béton de structure, notamment sa résistance mécanique et sa durabilité. La réactivité de ces matériaux de substitution détermine donc usuellement leur taux de substitution dans des bétons de structure pour maintenir le niveau de qualités requises. Par exemple, le laitier de haut-fourneau, qui est un liant hydraulique latent, permet des taux de remplacement élevés, allant jusqu'à plus de 80%. Cependant, la ressource en laitier, déjà exploitée dans les bétons, est limitée. Pour leur part, les cendres volantes ont un effet pouzzolanique qui permet un remplacement du clinker jusqu'à environ 50%. Là encore, les ressources sont limitées et vont disparaître à terme du fait de l'impact environnemental néfaste des centrales thermiques. Concernant les additions ultrafines utilisées dans les bétons telles que la fumée de silice ou le métakaolin, elles sont habituellement incorporées à faible dosage, par exemple de 5 % à 20 % de la masse de liant, du fait de leur coût et de leur demande en eau plus

importante que celle du ciment. Quant aux autres additions usuelles telles que les fillers calcaires ou siliceux, celles-ci sont quasi-inertes et ne permettent donc pas une réduction significative de la teneur en clinker.

Le rapport « *Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry* », édité par l'UNEP (United Nations Environment Programme) en 2016, propose quant à lui de recourir à des argiles calcinées, notamment du métakaolin, combinées avec du filler calcaire pour substituer jusqu'à 50% du clinker. Ainsi, Antoni *et al.* [1] propose des formulations de mortiers dans lesquelles le ciment est partiellement remplacé par un mélange de métakaolin et de filler calcaire dans un rapport pondéral métakaolin:filler calcaire de 2:1 et dans un rapport eau/liant de 0,5. Cependant, la proportion d'ultrafines dans ces compositions est élevée, impliquant un coût élevé et une forte demande en eau.

Enfin, il a également été proposé dans WO 2007/132098 des compositions de béton à faible teneur en ciment, mettant en œuvre un très faible dosage en eau. Cependant, les bétons frais obtenus à partir de telles compositions ne présentent pas la fluidité et notamment la viscosité requises pour pouvoir être utilisés sur les chantiers de construction.

Il demeure donc un besoin d'un béton à faible teneur en clinker ne présentant pas les inconvénients de l'art antérieur.

En particulier, il demeure un besoin d'un béton à faible teneur en clinker possédant d'une part une consistance fluide et une faible viscosité à l'état frais, permettant son utilisation sur les chantiers de construction, notamment à son transport et/ou à sa mise en place, et d'autre part une résistance mécanique permettant de l'utiliser comme béton de structure.

Il demeure également un besoin d'un béton à faible teneur en clinker qui soit peu coûteux.

L'invention vise précisément à proposer un béton à faible teneur en clinker et forte teneur en filler donnant satisfaction en ces termes. En particulier, elle vise à proposer une nouvelle composition de béton à faible teneur en clinker permettant d'améliorer efficacement le compromis entre d'une part ouvrabilité, associée à une haute fluidité et une faible viscosité, du béton à l'état frais, et d'autre part résistance mécanique du béton à l'état durci.

Contre toute attente, les inventeurs ont constaté que ces objectifs peuvent être atteints via une composition conforme à l'invention.

Exposé de l'invention

Ainsi, la présente invention concerne, selon un premier aspect, une composition de béton

5 frais comprenant au moins :

i) de 350 kg/m³ à 550 kg/m³ de liant hydraulique, dit liant, comprenant :

- de 20% à 40% en poids de clinker Portland par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D50 supérieur à 11 µm et une surface spécifique Blaine inférieure ou égale à 5500 cm²/g,

10 - de 45% à 75% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D70 inférieur ou égal à 63 µm, et

- de 5% à 15% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent une surface spécifique BET supérieure ou égale à 5 m²/g ou un D50 inférieur ou égal à 8 µm, et étant choisi parmi les additions hydrauliques,

15 les additions pouzzolaniques, les ciments ultrafins et leurs mélanges,

ii) au moins 0,05 % en poids, exprimé en extrait sec par rapport au poids total dudit liant, en superplastifiant ou plastifiant,

iii) de l'eau dans un rapport massique eau/liant variant de 0,3 à 0,45, et

iv) des granulats.

20 Par « béton frais », on entend un béton tel qu'obtenu à l'issue du malaxage de ses différents constituants et avant sa prise, c'est-à-dire un béton qui a la capacité de se déformer et/ou de s'écouler.

Les inventeurs ont ainsi mis au point une composition de béton frais originale pour
25 l'élaboration d'un béton à faible teneur en clinker. Cette composition est avantageuse à plusieurs titres. Comme il ressort des exemples ci-après, elle permet d'obtenir un bon compromis entre résistance mécanique d'une part, et fluidité et viscosité du béton à l'état frais d'autre part. Par ailleurs, elle permet d'obtenir un béton dont les émissions de CO₂ sont fortement réduites par rapport à un béton traditionnel du fait de la faible teneur en clinker,
30 et la réduction d'eau dans la formulation de béton permet d'aller plus loin dans l'optimisation environnementale de la composition. Enfin, un tel béton peut avantageusement être mis en œuvre comme béton de structure, et peut atteindre des classes de résistance au moins de

classe C25/30, voire de classe C30/37. En particulier, la sélection des composants du mélange ternaire formant le liant ainsi que leurs proportions permet, par ajustement du rapport eau/liant et du ou des superplastifiant(s) ou plastifiant(s), d'obtenir une composition de béton frais dont la pâte, séparant les granulats, présente un volume et une viscosité adaptés

5 pour atteindre une consistance fluide telle que requise pour une utilisation sur un chantier de construction, tout en favorisant une réactivité du liant et un empilement granulaire permettant d'atteindre d'excellentes propriétés de résistance mécanique après la prise et à 28 jours.

10 L'invention concerne également l'utilisation d'un liant hydraulique, notamment tel que décrit dans la présente invention, comprenant :

- de 20% à 40% en poids de clinker Portland par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D50 supérieur à 11 μm et une surface spécifique Blaine inférieure ou égale à 5500 cm^2/g ,

15 - de 45% à 75% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D70 inférieur ou égal à 63 μm , et

- de 5% à 15% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent une surface spécifique BET supérieure ou égale à 5 m^2/g ou un D50 inférieur ou égal à 8 μm , et étant choisi parmi les additions hydrauliques,

20 les additions pouzzolaniques, les ciments ultrafins et leurs mélanges,

et dont le rapport pondéral clinker/filler est d'au moins 0,32,

pour former un béton frais possédant un affaissement au cône d'Abrams supérieur ou égal à 160 mm, de préférence supérieur ou égal à 180 mm, mesuré selon la norme NF EN 12350-2 à une température de 20°C à l'issue du gâchage, et de viscosité inférieure ou égale à 9

25 secondes, de préférence inférieure ou égale à 6 secondes, mesurée par la méthode du cône inversé selon la norme XP P18-469 à une température de 20°C à l'issue du gâchage.

Le liant hydraulique est particulièrement avantageux pour former un béton frais de consistance fluide et de faible viscosité, correspondant aux propriétés requises pour couler du béton sur un chantier de construction ou comme éléments préfabriqués.

30

L'invention concerne aussi l'utilisation d'une composition de béton frais, notamment selon l'invention, comprenant au moins :

i) un liant hydraulique comprenant :

- de 20% à 40% en poids de clinker Portland par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D50 supérieur à 11 μm et une surface spécifique Blaine inférieure ou égale à 5500 cm^2/g ,

5 - de 45% à 75% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D70 inférieur ou égal à 63 μm , et

- de 5% à 15% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent une surface spécifique BET supérieure ou égale à 5 m^2/g ou un D50 inférieur ou égal à 8 μm , et étant choisi parmi les additions hydrauliques,

10 les additions pouzzolaniques, les ciments ultrafins et leurs mélanges,

ii) au moins un superplastifiant ou plastifiant,

iii) de l'eau et

iv) des granulats,

et dont l'affaissement au cône d'Abrams est supérieur ou égal à 160 mm, mesuré selon la

15 norme NF EN 12350-2 à une température de 20°C à l'issue du gâchage, et la viscosité est inférieure ou égale à 9 secondes mesurée par la méthode du cône inversé selon la norme XP P18-469 à une température de 20°C à l'issue du gâchage,

pour former un béton durci présentant une résistance à la compression supérieure ou égale à 25 MPa, de préférence supérieure ou égale à 30 MPa, mesurée sur cylindres selon la norme

20 NF EN 12390-3, 28 jours après mise en contact dudit liant avec l'eau.

En plus de posséder les propriétés de consistance fluide et de faible viscosité requises à l'état fluide pour une mise en œuvre sur un chantier de construction ou pour la préparation d'éléments préfabriqués, la composition de béton frais permet de former un béton durci possédant les propriétés mécaniques requises pour un béton de structure.

25

L'invention concerne un procédé de préparation d'un béton durci comprenant la mise en œuvre d'un liant hydraulique comprenant :

- de 20% à 40% en poids de clinker Portland par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D50 supérieur à 11 μm et une surface spécifique Blaine inférieure ou égale à 5500 cm^2/g ,

30

- de 45% à 75% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D70 inférieur ou égal à 63 μm , et

- de 5% à 15% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent une surface spécifique BET supérieure ou égale à 5 m²/g ou un D50 inférieur ou égal à 8 µm, et étant choisi parmi les additions hydrauliques, les additions pouzzolaniques, les ciments ultrafins et leurs mélanges,

5 et dont le rapport pondéral clinker/filler est d'au moins 0,32.

Le liant peut être mis en œuvre sous la forme d'une composition de béton frais selon l'invention. En particulier, le procédé met en œuvre une composition de béton frais présentant les propriétés d'écoulement décrites précédemment, et permet d'obtenir un béton de structure.

10 Le procédé de préparation d'un béton durci peut avantageusement être mis en œuvre sur un chantier de construction.

Les utilisations et le procédé selon l'invention sont particulièrement avantageux pour former un élément structurant tel qu'un pieu, une paroi moulée, une semelle, une longrine, une dalle,

15 un plancher, un poteau, une poutre ou un voile.

Enfin, l'invention concerne un béton durci obtenu à partir de la composition de béton frais selon l'invention ou obtenu à partir du procédé selon l'invention.

20 Par l'adjectif « sec », on caractérise un matériau dénué d'eau.

Dans la suite du texte, les rapports pondéraux sont exprimés en extrait sec.

Au sens de l'invention, l'expression « teneur en composé », par exemple « teneur en filler » couvre la mise en œuvre d'un unique filler ou d'un mélange de plusieurs fillers.

25 **Description détaillée**

i) Liant hydraulique

La composition de béton frais comprend de 350 kg/m³ à 550 kg/m³ de liant hydraulique. La
30 quantité en liant hydraulique varie selon le type de béton considéré et son ajustement relève clairement des compétences de l'homme du métier.

Par exemple, pour un béton autoplaçant, la teneur en liant hydraulique est plus élevée que pour un béton classique et notamment de l'ordre de 450 kg/m^3 à 550 kg/m^3 .

Selon un autre mode de réalisation, la composition de béton frais peut comprendre de 350 kg/m^3 à 450 kg/m^3 de liant hydraulique.

- 5 Dans la suite du texte, le liant hydraulique est également nommé liant.

A) Clinker Portland

Le clinker Portland, encore appelé dans la présente description clinker, peut être mis en œuvre sous la forme d'un clinker Portland isolé et/ou sous la forme d'un ciment Portland.

- 10 De préférence, le clinker est mis en œuvre sous la forme d'un ciment Portland, notamment choisi parmi les ciments définis dans la norme européenne NF EN 197-1, notamment de type CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ou CEM V.

De préférence, le clinker est mis en œuvre sous la forme d'un ciment Portland choisi parmi le CEM I et le CEM II/A.

- 15 Un CEM I comprend au moins 95 % de clinker. Un CEM II/A comprend au moins 80 % de clinker. Par exemple, le CEM I et le CEM II/A peuvent comprendre en outre un matériau choisi parmi les laitiers, la fumée de silice, les pouzzolanes, les cendres volantes, le schiste calciné, le calcaire et leurs mélanges. Le CEM II peut être un CEM II/A-S, un CEM II/A-D, un CEM II/A-P, un CEM II/A-Q, un CEM II/A-V, un CEM II/A-W, un CEM II/A-T, un
20 CEM II/A-L, un CEM II/A-LL, ou un CEM II/A-M.

En particulier, le clinker est mis en œuvre sous la forme d'un ciment Portland choisi parmi le CEM I, le CEM II/A-L, le CEM II/A-LL et leurs mélanges, de préférence sous la forme d'un CEM I, notamment d'un CEM I 52,5 N.

- Par exemple, le liant peut comprendre de 20% à 40% en poids de CEM I par rapport au poids
25 total dudit liant.

Les particules du clinker présentent un D_{50} supérieur à $11 \mu\text{m}$, de préférence supérieur ou égal à $12 \mu\text{m}$, plus préférentiellement allant de $12 \mu\text{m}$ à $25 \mu\text{m}$, notamment de $12 \mu\text{m}$ à $20 \mu\text{m}$.

- 30 En particulier, les particules du clinker présentent un D_{90} supérieur ou égal à $30 \mu\text{m}$.
En particulier, les particules du clinker présentent un D_{97} supérieur à $35 \mu\text{m}$.

Les percentiles ou « centiles » 50 (D_{50}), 70 (D_{70}), 87 (D_{87}), 90 (D_{90}) et 97 (D_{97}) d'une poudre sont les tailles de particules correspondant aux pourcentages, en masse, de 50%, 70%, 87%, 90% et 97% respectivement, sur la courbe de distribution granulométrique cumulée des tailles de particules de la poudre, les tailles de particules étant classées par ordre croissant.

- 5 Par exemple, 70% en masse des particules d'une poudre ont une taille inférieure à D_{70} et 30% des particules en masse ont une taille supérieure à D_{70} . Les tailles et les percentiles peuvent être déterminés à l'aide d'une distribution granulométrique réalisée à l'aide d'un granulomètre à diffraction laser, notamment selon la méthode en dispersion liquide. Par exemple, il peut s'agir d'un granulomètre de l'entreprise Malvern nommé
- 10 « MASTERSIZER 3000 ». Le percentile 50 D_{50} est encore classiquement appelé « diamètre médian ».

- Les particules du clinker présentent une surface spécifique Blaine inférieure ou égale à 5500 cm²/g, en particulier inférieure ou égale à 5200 cm²/g, et plus particulièrement allant de 3000 cm²/g à 5200 cm²/g. La surface spécifique Blaine est mesurée selon la norme NF
- 15 EN 196-6.

Ainsi, le clinker est avantageusement mis en œuvre sous la forme d'un ciment différent d'un ciment surbroyé.

- Le liant hydraulique comprend de 20% à 40% en poids de clinker par rapport au poids total dudit liant. Le liant peut comprendre au moins 23% en poids, de préférence de 25% à 40%
- 20 en poids, et plus préférentiellement de 25% à 35% en poids de clinker par rapport au poids total dudit liant.

La composition de béton frais peut comprendre de 70 kg/m³ à 220 kg/m³ de clinker, de préférence de 75 kg/m³ à 150 kg/m³ de clinker.

25 **B) Filler**

Les particules du filler présentent un D_{70} inférieur ou égal à 63 µm.

Le filler peut être choisi parmi les fillers définis dans la norme NF EN 12620.

En particulier, le filler est choisi parmi les fillers quasi-inertes et leurs mélanges.

- Par filler quasi-inerte, on entend une addition minérale de type I selon la norme NF EN
- 30 206/CN. En particulier, un filler quasi-inerte est différent d'une addition hydraulique ou pouzzolanique. Un filler est dit quasi-inerte au motif qu'il n'a pas de prédisposition à réagir avec l'eau ou le ciment.

L'homme du métier sait sélectionner un filler quasi-inerte parmi les constituants usuels d'un liant dédiés à former un béton.

5 Le filler peut être choisi parmi les fillers calcaires tels que le carbonate de calcium, les fillers siliceux tels que le quartz, les fillers silico-calcaires, et leurs mélanges, en particulier parmi les fillers calcaires, les fillers siliceux et leurs mélanges.

De préférence, le filler comprend au moins un filler calcaire, et plus préférentiellement le filler est un filler calcaire.

10 Les fillers calcaires peuvent par exemples être des additions calcaires telles que définies dans la norme NF P 18-508.

Les fillers calcaires sont notamment avantageux pour leur faible impact environnemental et leur disponibilité.

15 Le filler peut être caractérisé par une surface spécifique Blaine allant de 2000 cm²/g à 9000 cm²/g, de préférence de 3500 cm²/g à 7000 cm²/g.

20 Le liant comprend de 45% à 75% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant. Le liant peut comprendre de 45% à 70% en poids, de préférence de 45% à moins de 65% en poids, en particulier de 50% à 58% et plus particulièrement de 50% à 55% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant.

Dans le cas d'un clinker mis en œuvre sous la forme d'un ciment Portland incorporant lui-même un filler tel que décrit précédemment, la quantité du filler ainsi introduite avec le ciment est prise en compte pour l'évaluation de la teneur en filler dans le liant. Tel est notamment le cas d'un CEM II/A-L.

25 La composition de béton frais peut comprendre de 160 kg/m³ à 400 kg/m³ de filler, de préférence de 200 kg/m³ à 300 kg/m³ de filler.

C) Matériau de granulométrie ultrafine

30 Le matériau de granulométrie ultrafine est avantageusement une poudre minérale réactive dans un milieu cimentaire. Plus précisément, il est choisi parmi les additions hydrauliques, les additions pouzzolaniques, les ciments ultrafins et leurs mélanges. Par exemple, les

additions hydrauliques et pouzzolaniques sont des additions de type II selon la norme NF EN 206/CN.

Par définition, une addition hydraulique est une addition minérale qui réagit avec l'eau. Il peut par exemple s'agir d'un laitier moulu.

- 5 Une addition pouzzolanique est une addition minérale qui réagit avec l'hydroxyde de calcium en présence d'eau. Il peut s'agir par exemple de la fumée de silice, du métakaolin, d'argiles calcinées, de cendres volantes, de pouzzolanes naturelles.

Un ciment ultrafin est tout particulièrement un ciment de classe CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ou CEM V selon la norme européenne NF EN 197-1 ou analogue, dont le broyage
10 est plus fin que celui des ciments courants de ces mêmes classes.

Le matériau de granulométrie ultrafine peut être choisi parmi les laitiers, la fumée de silice, le métakaolin, les argiles calcinées, les cendres volantes, les additions pouzzolaniques naturelles ou artificielles, les ciments ultrafins de classe CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ou CEM V, et leurs mélanges, en particulier parmi les laitiers de haut-fourneau, la fumée de
15 silice, le métakaolin, les argiles calcinées, les additions pouzzolaniques naturelles ou artificielles, les ciments ultrafins de classe CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ou CEM V et leurs mélanges.

Le métakaolin est usuellement obtenu par calcination d'argile composée majoritairement de kaolinite à des températures allant de 600°C à 900°C. Par exemple, le métakaolin peut être
20 choisi parmi les métakaolins conformes à la norme NF P 18-513.

La fumée de silice est usuellement un sous-produit de la métallurgie et de la production de silicium ou ferro-silicium. La fumée de silice est généralement formée de particules sphériques comprenant au moins 85% en masse de silice amorphe. La fumée de silice peut être choisies parmi les fumées de silice conformes à la norme NF EN 13263-1.

- 25 Les cendres volantes peuvent être choisies parmi les cendres volantes conformes à la norme Européenne NF EN 450-1.

Classiquement, le laitier est un laitier moulu de haut fourneau (en anglais « *Ground granulated blast-furnace slag* », GGBS).

Un GGBS est un matériau granulaire généralement obtenu par refroidissement rapide avec
30 de l'eau du laitier fondu provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau, suivi d'un broyage pour améliorer la réactivité du GGBS. Le GGBS est un verre amorphe

d'alumino-silicate, essentiellement composé de SiO_2 , CaO , MgO , et Al_2O_3 . Le GGBS est de préférence fabriqué selon la norme européenne NF EN 15167-1.

Les ciments ultrafins mis en œuvre comme matériau de granulométrie ultrafin peuvent être des ciments surbroyés. A titre d'exemple de ciments pouvant être mis en œuvre comme
5 matériau de granulométric ultrafine peuvent être cités les ciments de la gamme Spinor® commercialisés par la société EQIOM, notamment les matériaux vendus sous la dénomination « *Spinor® A6* », « *Spinor® A12* » et « *Spinor® A32* ».

Le matériau de granulométrie ultrafine peut également être un filler fabriqué à partir des coproduits issus, entre autres, de la production d'acier inoxydable. A titre d'exemple, il peut
10 s'agir du produit vendu sous la dénomination Fillinox® par la société Orbix.

Les particules du matériau de granulométrie ultrafine peuvent présenter un D_{50} inférieur ou égal à $8\text{ }\mu\text{m}$, en particulier allant de $1\text{ }\mu\text{m}$ à $8\text{ }\mu\text{m}$.

Les particules du matériau de granulométrie ultrafine peuvent présenter un D_{90} inférieur ou
15 égal à $30\text{ }\mu\text{m}$, de préférence allant de $4\text{ }\mu\text{m}$ à $30\text{ }\mu\text{m}$, notamment de $10\text{ }\mu\text{m}$ à $30\text{ }\mu\text{m}$. En particulier, les particules du matériau de granulométrie ultrafine présentent un D_{90} supérieur à $1\text{ }\mu\text{m}$, voire supérieur ou égal à $3\text{ }\mu\text{m}$.

Le matériau de granulométrie ultrafine peut présenter une surface spécifique obtenue par la méthode BET (Brunauer-Emmet-Teller) supérieure ou égale à $5\text{ m}^2/\text{g}$, de préférence allant
20 de $5\text{ m}^2/\text{g}$ à $35\text{ m}^2/\text{g}$, notamment de $10\text{ m}^2/\text{g}$ à $25\text{ m}^2/\text{g}$.

Le matériau de granulométrie ultrafine peut être caractérisé par une surface spécifique Blaine supérieure ou égale à $5500\text{ cm}^2/\text{g}$, de préférence allant de $6500\text{ cm}^2/\text{g}$ à $12000\text{ cm}^2/\text{g}$, notamment de $7000\text{ cm}^2/\text{g}$ à $10000\text{ cm}^2/\text{g}$.

25 Le liant hydraulique comprend de 5% à 15% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total dudit liant. Le liant hydraulique comprend généralement au moins 7% en poids, notamment de 7,5% à 14% en poids voire de 11% à 14% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total dudit liant.

Dans le cas d'un clinker mis en œuvre sous la forme d'un ciment Portland comprenant un
30 matériau de granulométrie ultrafine, la quantité en ce matériau de granulométrie ultrafine introduit avec le ciment est prise en compte dans l'évaluation de la teneur en matériau de granulométrie ultrafine dans le liant. Par exemple, dans le cas d'un CEM II/A-D, la quantité

en fumée de silice présente dans le ciment est prise en compte dans le calcul de la teneur en matériau de granulométrie ultrafine de la composition de béton frais, sous réserve que la distribution de taille de particules corresponde effectivement à celle requise selon l'invention pour le matériau de granulométrie ultrafine.

- 5 La composition de béton frais peut comprendre de 20 kg/m^3 à 80 kg/m^3 de matériau de granulométrie ultrafine, de préférence de 30 kg/m^3 à 60 kg/m^3 .

Le clinker, le filler et le matériau de granulométrie ultrafine peuvent former au moins 80% en poids, de préférence au moins 90% en poids, plus préférentiellement au moins 95% en
10 poids, voire plus de 99% du poids total dudit liant. Le liant peut être également constitué que du clinker, du filler et du matériau de granulométrie ultrafine.

De préférence, le clinker et le filler sont mis en œuvre dans un rapport pondéral clinker/filler d'au moins 0,32, de préférence supérieur ou égal à 0,4. Le rapport pondéral clinker/filler est généralement inférieur ou égal à 1,8, de préférence inférieur ou égal à 1,0 et plus
15 préférentiellement inférieur ou égal à 0,7. Selon un mode de réalisation préféré, il varie de 0,4 à 0,7. Ces rapports pondéraux sont particulièrement avantageux pour accéder à des propriétés mécaniques performantes du béton durci, tout en garantissant une consistance fluide de ce béton à l'état frais. A des valeurs en deçà, il est constaté que les propriétés mécaniques performantes du béton durci peuvent certes être maintenues mais au détriment
20 de la consistance fluide et peu visqueuse du béton frais et donc de la maniabilité de celui-ci.

ii) Superplastifiant ou plastifiant

La composition de béton frais peut comprendre un superplastifiant ou plastifiant choisi parmi
25 les NBSP (superplastifiants à base de naphthalène), les PNS (polynaphtalènes sulfonates), les MBSP (superplastifiants à base de mélamine), les PMS (polymélamines sulfonates), les HCA (acides hydroxycarboxylique), les (P)AA (poly(acide acrylique)), les LS (lignosulfonates), en particulier les lignosulfonates d'ammonium, de calcium ou de sodium, les PCE (éthers polycarboxyliques), les PCA (acides polycarboxylique), les phosphonates,
30 leurs sels et/ou leurs dérivés et leurs mélanges.

En particulier, le ou les superplastifiant(s) ou plastifiant(s) sont choisi(s) parmi les PCE (éthers polycarboxyliques), les PCA (acides polycarboxylique), les phosphonates, les NBSP

(superplastifiants à base de naphthalène), les PNS (polynaphtalènes sulfonates), les LS (lignosulfonates) et leurs mélanges, de préférence choisi(s) parmi les PCE (éthers polycarboxyliques), les PCA (acides polycarboxyliques), les phosphonates et leurs mélanges.

- 5 La composition comprend au moins 0,05 % en poids, exprimé en extrait sec par rapport au poids total dudit liant, en superplastifiant ou plastifiant. En particulier, la composition peut comprendre de 0,05 % à 1 % en poids, de préférence de 0,1 % à 0,5 % en poids, exprimé en extrait sec par rapport au poids total dudit liant, en superplastifiant ou plastifiant.
- En particulier, le(s) superplastifiant(s) ou plastifiant(s) est mis en œuvre dans la composition
- 10 de béton frais à raison de 0,2 kg/m³ à 5 kg/m³, de préférence de 0,5 kg/m³ à 2 kg/m³, exprimé en extrait sec.
- La mise en œuvre d'au moins un superplastifiant ou plastifiant est avantageuse à plusieurs titres. Ce composé permet avantageusement de défloculer les particules du liant, et notamment de défloculer les particules du matériau de granulométrie ultrafine. Il est ainsi
- 15 possible d'une part, d'obtenir une fluidité adaptée à sa mise en œuvre sur un chantier pour un faible dosage en eau du béton, et d'autre part d'augmenter la réactivité des particules de granulométrie ultrafine et donc la résistance en compression du béton.

iii) Eau

- 20 L'eau est mise en œuvre dans la composition de béton frais dans un rapport massique eau/liant variant de 0,3 à 0,45.
- L'eau est formée de toute l'eau présente dans la composition de béton frais, c'est-à-dire de l'eau de gâchage, et de l'eau ajoutée dans la composition avec le superplastifiant ou
- 25 d'éventuels adjuvants.
- De préférence, la composition de béton frais met en œuvre l'eau dans un rapport massique eau/liant variant de 0,3 à 0,4, de préférence supérieur à 0,32, plus préférentiellement d'au moins 0,34, voire variant de 0,36 à 0,4.
- La composition de béton frais peut comprendre de 130 kg/m³ à 200 kg/m³ d'eau, de
- 30 préférence plus de 140 kg/m³, et plus préférentiellement plus de 150 kg/m³ d'eau.

Le rapport eau/liant selon l'invention se distingue notamment de celui mis en œuvre usuellement pour caractériser les ciments ou les liants, où la quantité d'eau est habituellement égale à la moitié du dosage en liant.

5 iv) Granulats

Le terme granulat se rapporte à une large catégorie de matériaux particuliers utilisés en construction. Au sens de l'invention, le terme granulat exclu les fillers tels que définis précédemment.

Les granulats peuvent être choisis parmi les sables, les sablons, les graviers, les gravillons, les cailloux, la roche concassée, les scories, le béton concassé ou recyclé, les granulats géosynthétiques, le schiste expansé, l'argile expansée et leurs mélanges. Par exemple, la roche concassée peut être formée à partir de roches siliceuses, calcaires, et/ou silico-calcaires. De préférence, les granulats comprennent au moins du sable, des gravillons ou leurs mélanges.

Par exemple, les granulats sont choisis parmi les matériaux conformes à l'article 10 de la norme NF P 18-545.

De préférence, les granulats ont une taille inférieure à 32 mm. De préférence, les granulats comprennent au moins un matériau dont la taille particulière est comprise entre 6 mm à 32 mm.

La taille des granulats, ou taille particulière, correspond au diamètre de la plus petite sphère circonscrite à la particule. Elle peut être mesurée par tamisage.

Le plus souvent, les granulats mis en œuvre sur un chantier sont sous forme humide compte-tenu qu'ils sont le plus souvent manipulés en atmosphère extérieure. Les rapports eau/liant prennent en compte l'eau issue de l'humidité des granulats.

Les granulats peuvent être présents dans une proportion pondérale variant de 55% à 85% par rapport au poids total du béton frais, ou encore dans une proportion volumique allant de 55% à 70% par rapport au volume total du béton frais. En particulier, les granulats sont mis en œuvre dans la composition de béton frais à raison de 1300 kg/m³ à 2000 kg/m³, de préférence de 1500 kg/m³ à 1800 kg/m³.

30

Composition de béton frais

L'ensemble des granulats dont la taille est supérieure ou égale à 63 μm forme un squelette granulaire.

Le mélange du liant, de l'eau, du ou des superplastifiant(s) ou plastifiant(s) et, le cas échéant, de l'air occlus et des particules de sable de diamètre inférieur à 63 μm , forment une pâte. La
5 pâte permet avantageusement de séparer et écarter les particules du squelette granulaire les unes des autres.

De préférence, le volume de ladite pâte est supérieur ou égal à 115%, en particulier à 120%, voire compris entre 120% et 135%, du volume poreux du squelette granulaire, encore appelé volume de vides du squelette granulaire.

10 Le volume poreux du squelette granulaire, encore appelé volume de vides du squelette granulaire, peut être mesuré à partir de la compacité du squelette granulaire obtenu après vibration de l'ensemble des particules du squelette granulaire. Il peut également être établi selon le modèle d'empilement compressible [2] à partir de la mesure de compacité de chaque catégorie de particules composant le squelette granulaire.

15 Un volume de pâte en excès par rapport au volume poreux du squelette granulaire permet d'assurer un bon écartement entre les particules du squelette granulaire, favorisant l'écoulement du béton frais. De plus, le rapport eau/liant requis dans le béton frais permet de limiter la viscosité de la pâte. L'association d'un volume de pâte en excès avec le rapport eau/liant requis est avantageusement utile pour assurer à la composition de béton frais une
20 viscosité adaptée à sa mise en œuvre sur un chantier ou dans une usine de préfabrication, et notamment pour assurer une consistance fluide.

La composition de béton frais peut également comprendre un ou plusieurs adjuvant(s) choisi(s) parmi les rétenteurs d'eau, les épaississants, les antimousses, les biocides, les
25 pigments, les retardateurs de flamme, les entraîneurs d'air, les retardateurs, les accélérateurs, les fibres, les poudres de dispersion, les agents de mouillage, les résines polymère, les agents complexants, les dispersions de polymère, les agents réducteurs de retrait, et leurs mélanges.

En particulier, la composition de béton frais possède une viscosité inférieure ou égale à 9
30 secondes, de préférence inférieure ou égale à 6 secondes, voire inférieure à 6 secondes, mesurée par la méthode du cône inversé selon la norme XP P18-469 à une température de

20 °C à l'issue du gâchage, c'est-à-dire à l'issue de l'obtention d'un mélange homogène de l'ensemble de ses composants.

Elle peut posséder un affaissement au cône d'Abrams supérieur ou égal à 160 mm, de préférence supérieur ou égal à 180 mm, mesuré selon la norme NF EN 12350-2 à une
5 température de 20°C à l'issue du gâchage.

La composition de béton frais permet avantageusement d'obtenir un béton au moins aussi fluide qu'un béton relevant de la classe de consistance S4 selon la norme NF EN 206/CN. En particulier, la composition de béton frais peut présenter la consistance requise pour un
béton autoplaçant. Elle permet notamment d'obtenir un béton relevant de la classe de
10 consistance S5 selon la norme NF EN 206/CN.

Procédé de préparation du béton durci

Un béton durci peut être préparé par un procédé comprenant la mise en œuvre d'un liant
15 hydraulique tel que décrit précédemment.

Le procédé selon l'invention peut comprendre au moins les étapes consistant à :

- a) former ladite composition de béton frais par malaxage de ses composants ;
- b) le cas échéant, couler la composition de béton frais, et
- c) laisser ladite composition de béton frais durcir pour obtenir ledit béton durci.

20 Les différentes techniques de malaxage connues de l'homme du métier peuvent être utilisées. Par exemple, la composition de béton frais peut être formée par ajout successif des composants sous malaxage, le malaxage étant prolongé jusqu'à obtention du béton frais. Le malaxage peut être réalisé dans un malaxeur conventionnel, notamment un malaxeur à action forcée. L'homme du métier sait ajuster la durée ou la puissance du malaxage pour obtenir
25 une composition de béton frais homogène.

La composition de béton frais peut être coulée selon les méthodes usuelles connues de l'homme du métier.

Après le durcissement de la composition de béton frais, notamment par hydratation et/ou durcissement, un béton durci tel qu'un élément structurant est obtenu. En particulier, le béton
30 durci obtenu peut être sous la forme d'un pieu, d'une paroi moulée, d'une semelle, d'une longrine, d'une dalle, d'un plancher, d'un poteau, d'une poutre ou d'un voile.

Béton durci

Un béton durci peut être obtenu à partir de la composition de béton frais décrite précédemment, ou à partir du procédé tel que décrit précédemment.

- 5 Le béton durci selon l'invention est avantageusement un béton dont la résistance mécanique est au moins aussi élevée qu'un béton relevant de la classe de résistance C25/30. En particulier, le béton durci est un béton relevant de la classe de résistance C25/30 ou C30/37, et plus particulièrement de la classe de résistance C25/30.

10 Le béton durci peut présenter une résistance à la compression supérieure ou égale à 3 MPa, de préférence supérieure ou égale à 5 MPa, mesurée selon la norme NF EN 12390-3, 24h après mise en contact du liant avec l'eau et conservation à une température de 20°C.

De préférence, le béton durci présente une résistance à la compression supérieure ou égale à 25 MPa, de préférence supérieure ou égale à 30 MPa, mesurée sur cylindres selon la norme NF EN 12390-3, 28 jours après mise en contact dudit liant avec l'eau.

- 15 Un tel béton durci est particulièrement utile pour former des éléments structurants. De préférence, le béton durci est sous la forme d'un pieu, d'une paroi moulée, d'une semelle, d'une longrine, d'une dalle, d'un plancher, d'un poteau, d'une poutre ou d'un voile.

20 Le béton durci peut être sous la forme d'un élément structurant, notamment un élément préfabriqué ou coulé, en particulier un élément structurant d'un ouvrage de bâtiment ou de travaux publics tel qu'en infrastructure ou en superstructure.

Exemple

Matériel et méthodes

25

Les matières premières suivantes ont été utilisées :

- ciment CEM I 52,5 N Le Havre fourni par la société Vrac de l'Estuaire de surface spécifique Blaine 4700 cm²/g et présentant un diamètre médian D₅₀ de 12 µm ;
- filler calcaire Betocarb HP EN fourni par la société Omya présentant un D₈₇ de 63 µm ;
- 30 - superplastifiant commercialisé par la société Chryso sous la dénomination Optima 175 ;
- sable 0/4 calcaire Pécy fourni par la société A2C ;
- gravillon 4/20 calcaire Pécy fourni par la société A2C ;

- Matériaux de granulométrie ultrafine :

Laitier ultra-fin Moerdijk commercialisé par la société Ecocem dont le diamètre médian D50 est de 2,25 μm ;

5 Fumée de silice DP Les Clavaux commercialisée par la société Ferropem dont surface spécifique BET est de 21,5 m^2/g ;

Métakaolin Argicem Fumel commercialisé par la société Argeco dont la surface spécifique BET est de 17,5 m^2/g ;

CEM III Spinor A32 commercialisé par la société Egiom dont le diamètre médian D50 est de 6 μm .

10

Mesures sur les mortiers de béton équivalent

Il est connu que les spécificités physiques des mortiers de béton équivalent sont représentatives des spécificités physiques des bétons correspondants.

15 La viscosité est mesurée pour les mortiers de béton équivalent par détermination du temps d'écoulement dans un mini-entonnoir en « V » (mini « V funnel ») à une température de 20°C selon la méthodologie de la norme NF EN 12350-9.

Les mesures d'étalement sont réalisées sur mortier de béton équivalent à une température de 20°C selon les dispositions de la norme NF EN 12350-8 en utilisant le mini-cône MBE (cône d'Abrams à échelle ½).

20 La résistance à la compression est mesurée pour les mortiers de béton équivalent sur des prismes 4cm x 4cm x 16cm selon la norme NF EN 196-1 à 24 h et à 28 jours.

Mesures sur les bétons

Le volume du squelette granulaire est établi selon le modèle d'empilement compressible [2].

25 La viscosité est mesurée à l'issue du gâchage pour les compositions de béton frais par détermination du temps d'écoulement dans un entonnoir en « V » (« V funnel ») à une température de 20°C selon les dispositions de la norme XP P18-469.

Les mesures d'affaissement au cône d'Abrams sont réalisées à l'issue gâchage sur les compositions de béton frais à une température de 20°C selon les dispositions de la norme

30 NF EN 12350-2.

La résistance à la compression est mesurée pour les bétons durcis sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 110 mm et hauteur 220 mm selon la norme NF EN 12390-3 à 18 h, 24 h, 7 jours et 28 jours.

5 **Exemple 1**

Préparation de mortiers de béton équivalent conformes et non conformes à l'invention pour différentes teneurs en ciment

Le liant est préparé par malaxage à sec de ciment (CEM), de filler calcaire (FC) et de métakaolin (MK) dans les proportions indiquées en tableau 1.

10 Le mortier de béton équivalent est préparé par malaxage du sable, du liant, du superplastifiant et de l'eau, le rapport pondéral eau/liant (E/L) et la teneur en superplastifiant, exprimée en poids commercial, étant indiqués en tableau 1.

Les liants mis en œuvre dans les essais A et B comprennent respectivement 35% et 12,5% de ciment.

15

[Tableau 1]

		Essai A	Témoin B
Liant	CEM (kg/m ³)	140	50
	MK (kg/m ³)	50	50
	FC (kg/m ³)	210	300
Sable 0/4 (kg/m ³)		1038	1038
Superplastifiant (kg/m ³)		5,8	5,9
E/L		0,4	0,4

Exemple 2

20 **Préparation de mortiers de béton équivalent conformes et non conformes à l'invention pour différentes teneurs en métakaolin**

Des mortiers de béton équivalent sont préparés selon le protocole détaillé en exemple 1 dans les proportions indiquées en tableau 2.

Les liants mis en œuvre dans les essais A, C, D, E et F comprennent respectivement 12,5%,

25 0%, 5%, 10% et 15% de métakaolin.

[Tableau 2]

		Essai A	Témoin C	Essai D	Essai E	Essai F
Liant	CEM (kg/m ³)	140	140	140	140	140
	MK (kg/m ³)	50	0	20	40	60
	FC (kg/m ³)	210	260	240	220	200
Superplastifiant (kg/m ³)		5,8	2,6	4,0	5,0	6,2
Sable 0/4 (kg/m ³)		1038	1038	1038	1038	1038
E/L		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Exemple 3**5 Préparation de mortiers de béton équivalent conformes et non conformes à l'invention**

Des mortiers de béton équivalent sont préparés selon le protocole détaillé en exemple 1 dans les proportions indiquées en tableau 3. Le volume de pâte correspond au pourcentage du volume de pâte par rapport au volume poreux du squelette granulaire.

La composition de l'essai Témoin G est dénuée de superplastifiant. La composition de l'essai

10 Témoin H possède un rapport E/L plus grand que l'Essai A.

[Tableau 3]

		Essai A	Témoin G	Témoin H
Liant	CEM (kg/m ³)	140	140	140
	MK (kg/m ³)	50	50	50
	FC (kg/m ³)	210	210	210
Superplastifiant (kg/m ³)		5,8	0	4
Sable 0/4 (kg/m ³)		1038	1038	975
E/L		0,4	0,4	0,5
Volume de pâte (%)		126	126	140

15 Exemple 4

Caractérisation des compositions et mortiers de béton équivalent obtenus en exemples 1 à 3

Les résultats des mesures d'étalement, de viscosité et de résistance à la compression, mesurés selon les méthodes détaillées dans le chapitre Matériels et Méthodes, sont reportés en tableau 4.

Les essais étant réalisés sur des mortiers de béton équivalent, les valeurs mesurées sont
5 données à titre de comparaison. En particulier, du fait des mesures de résistance sur éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³, la résistance minimale visée à 28 jours pour l'obtention d'une classe de résistance de béton C25/30 est égale à 30 MPa. De même, l'obtention d'une consistance fluide correspond à un étalement de mortier supérieur à
10 à 9 secondes est de 7 secondes.

[Tableau 4]

	Etalement (mm)	Viscosité (s)	Rc _{24 h} (MPa)	Rc _{28 j} (MPa)
Essai A (35% CEM, 12,5% MK)	350	5,6	8,2	36,3
Témoin B (12,5% CEM)	-	4,4	1,9	11,4
Témoin C (0% MK)	-	4,6	7,9	23,7
Essai D (5% MK)	-	5,6	9,3	30,0
Essai E (10% MK)	-	6,4	9,1	32,0
Essai F (15% MK)	-	6,0	7,8	40,8
Témoin G (sans superplastifiant)	100	non mesurable	9,5	28,6
Témoin H (E/L=0,5)	330	2,7	4,2	18,7

15 Comme il ressort du tableau 4, la résistance à la compression à 24 h et à 28 jours est plus élevée pour l'essai A par rapport à l'essai témoin B de plus faible teneur en ciment, pour une viscosité sensiblement similaire.

Par ailleurs, la résistance à la compression augmente pour les essais C à F et A lorsque la teneur en métakaolin augmente de 0% à 15% dans le liant, pour une viscosité inférieure à
20 7 secondes.

L'essai Témoin G montre que l'absence de superplastifiant impacte négativement la résistance à la compression ainsi que l'affaissement par rapport à l'Essai A comprenant du superplastifiant. De plus, la viscosité n'a pas pu être mesurée pour l'essai Témoin G en raison du manque de fluidité du mortier. Quant à l'essai Témoin H, comparé à l'Essai A, il montre une perte de résistance à la compression lorsque le rapport E/L augmente de 0,4 à 0,5.

Exemple 5
Préparation et caractérisation de bétons conformes à l'invention

Des compositions de béton frais sont préparées par gâchée de 30 L dans un malaxeur de laboratoire à action forcée, à température ambiante de 20°C, dans les proportions indiquées en tableau 5 en kg/m³ pour le liant formé de ciment (CEM), de filler calcaire (FC) et d'un matériau de granulométrie ultrafine (UF), le superplastifiant (SP), les granulats et l'eau. L'eau efficace comprend l'eau de gâchage et l'eau ajoutée avec le superplastifiant. Le volume de pâte correspond au pourcentage du volume de pâte par rapport au volume poreux du squelette granulaire.

[Tableau 5]

		Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4	Essai n°5
CEM		100	140	140	140	100
FC		250	230	210	210	250
UF	Laitier	50				
	Fumée de silice		30			50
	Métakaolin			50		
	CEM III				50	
Sable		840	840	850	850	840
Gravillon		840	840	850	850	840
SP (extrait sec)		0,9	1,2	1,2	1,0	1,1
Eau efficace		155	155	155	154	155
Volume de pâte (%)		126	127	125	125	128

Les résultats obtenus sur le béton frais sont reportés dans le tableau 6.

[Tableau 6]

	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4	Essai n°5
Affaissement (mm)	180	210	200	220	220
Classe de consistance	S4	S4	S4	S4	S4
Viscosité (s)	6,5	2,9	3,0	4,2	2,0

Les résultats de résistance à la compression obtenus sur le béton durci sont reportés dans le
5 tableau 7 et exprimés en MPa.

[Tableau 7]

	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4	Essai n°5
18 h	3,7	5,7	5,2	7,9	2,5
24 h	5,9		7,7	11,6	3,3
7 jours	24,7	26,6	28,4	31,7	15,8
28 jours	31,1	40,4	30,5	38,3	31,3

Comme il ressort de ces résultats, les bétons des essais n°1 à 5 relèvent tous de la classe de
10 consistance S4 et au moins de la classe de résistance C25/30. De plus, ils présentent tous une
viscosité inférieure ou égale à 6,5 secondes mesurée par la méthode du cône inversé selon la
norme XP P18-469 à une température de 20°C.

Liste des documents cités

15

[1] Antoni *et al.*, Cement and Concrete Research, 2012, 42, 1579-1589 ;

[2] F. De Larrard, « Structures granulaires et formulation des bétons », Etudes et Recherches
des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Ouvrages d'art OA 34, 2000.

20

Revendications

1. Composition de béton frais comprenant au moins :
 - i) de 350 kg/m³ à 550 kg/m³ de liant hydraulique, dit liant, comprenant :
 - 5 - de 20% à 40% en poids de clinker Portland par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D50 supérieur à 11 µm et une surface spécifique Blaine inférieure ou égale à 5500 cm²/g,
 - de 45% à 75% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D70 inférieur ou égal à 63 µm, et
 - 10 - de 5% à 15% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent une surface spécifique BET supérieure ou égale à 5 m²/g ou un D50 inférieur ou égal à 8 µm, et étant choisi parmi les additions hydrauliques, les additions pouzzolaniques, les ciments ultrafins et leurs mélanges,
 - ii) au moins 0,05 % en poids, exprimé en extrait sec par rapport au poids total dudit liant, en
15 superplastifiant ou plastifiant,
 - iii) de l'eau dans un rapport massique eau/liant variant de 0,3 à 0,45, et
 - iv) des granulats.
2. Composition de béton frais selon la revendication 1, dans laquelle le clinker et le filler sont mis en œuvre dans un rapport pondéral clinker/filler d'au moins 0,32, de
20 préférence supérieur ou égal à 0,4, plus préférentiellement de 0,4 à 0,7.
3. Composition de béton frais selon la revendication 1 ou 2, dans laquelle ledit liant comprend de 45% à 70% en poids, de préférence de 45% à moins de 65% en poids, et plus préférentiellement de 50% à 58% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant.
4. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications
25 précédentes, dans laquelle ledit liant comprend au moins 23% en poids, de préférence de 25% à 40% en poids, et plus préférentiellement de 25% à 35% en poids de clinker par rapport au poids total dudit liant.
5. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle ledit liant comprend au moins 7% en poids, notamment de 7,5%
30 à 14% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total dudit liant.

6. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle le filler comprend au moins un filler calcaire, de préférence dans laquelle le filler est un filler calcaire.

5 7. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle le matériau de granulométrie ultrafine est choisi parmi les laitiers, la fumée de silice, le métakaolin, les argiles calcinées, les cendres volantes, les additions pouzzolaniques naturelles ou artificielles, les ciments ultrafins de classe CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ou CEM V, et leurs mélanges, et de préférence parmi les laitiers de haut-fourneau, la fumée de silice, le métakaolin, les argiles calcinées, les additions
10 pouzzolaniques naturelles ou artificielles, les ciments ultrafins de classe CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ou CEM V et leurs mélanges.

8. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle le clinker est mis en œuvre sous la forme d'un ciment Portland, de préférence choisi parmi le CEM I et le CEM II/A.

15 9. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle le ou les superplastifiant(s) ou plastifiant(s) sont choisi(s) parmi les PCE (éthers polycarboxyliques), les PCA (acides polycarboxylique), les phosphonates, les NBSP (superplastifiants à base de naphthalène), les PNS (polynaphthalènes sulfonates), les LS (lignosulfonates) et leurs mélanges, de préférence choisi(s) parmi les PCE (éthers
20 polycarboxyliques), les PCA (acides polycarboxylique), les phosphonates et leurs mélanges.

10. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant de 0,05 % à 1 % en poids, de préférence de 0,1 % à 0,5 % en poids, exprimé en extrait sec par rapport au poids total dudit liant, en superplastifiant ou plastifiant.

25 11. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle le rapport massique eau/liant varie de 0,3 à 0,4, de préférence est supérieur à 0,32, plus préférentiellement d'au moins 0,34, voire varie de 0,36 à 0,4.

12. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle les granulats comprennent au moins un matériau dont la taille particulière est comprise entre 6 mm à 32 mm, en particulier les granulats comprennent au
30 moins du sable, des gravillons ou leurs mélanges.

13. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle le mélange du liant, de l'eau, du ou des superplastifiant(s) ou

plastifiant(s) et, le cas échéant, de l'air occlus et des particules de sable de diamètre inférieur à 63 μm , forment une pâte, avec le volume de ladite pâte étant supérieur ou égal à 115%, en particulier à 120%, voire compris entre 120% à 135%, du volume poreux du squelette granulaire.

5 14. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications précédentes, possédant une viscosité inférieure ou égale à 9 secondes, de préférence inférieure ou égale à 6 secondes, mesurée par la méthode du cône inversé selon la norme XP P18-469 à une température de 20 °C à l'issue du gâchage.

10 15. Composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications précédentes, possédant un affaissement au cône d'Abrams supérieur ou égal à 160 mm, de préférence supérieur ou égal à 180 mm, mesuré selon la norme NF EN 12350-2 à une température de 20°C à l'issue du gâchage.

16. Utilisation d'un liant hydraulique comprenant :

15 - de 20% à 40% en poids de clinker Portland par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D50 supérieur à 11 μm et une surface spécifique Blaine inférieure ou égale à 5500 cm^2/g ,
 - de 45% à 75% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D70 inférieur ou égal à 63 μm , et
 - de 5% à 15% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total
20 dudit liant et dont les particules présentent une surface spécifique BET supérieure ou égale à 5 m^2/g ou un D50 inférieur ou égal à 8 μm , et étant choisi parmi les additions hydrauliques, les additions pouzzolaniques, les ciments ultrafins et leurs mélanges,
 et dont le rapport pondéral clinker/filler est d'au moins 0,32,
 pour former un béton frais possédant un affaissement au cône d'Abrams supérieur ou égal à
25 160 mm, de préférence supérieur ou égal à 180 mm, mesuré selon la norme NF EN 12350-2 à une température de 20°C à l'issue du gâchage, et de viscosité inférieure ou égale à 9 secondes, de préférence inférieure ou égale à 6 secondes, mesurée par la méthode du cône inversé selon la norme XP P18-469 à une température de 20°C à l'issue du gâchage.

30 17. Utilisation selon la revendication précédente d'un liant hydraulique tel que défini selon l'une quelconque des revendications 1 à 8.

18. Utilisation d'une composition de béton frais comprenant au moins :

i) un liant hydraulique comprenant :

- de 20% à 40% en poids de clinker Portland par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D50 supérieur à 11 μm et une surface spécifique Blaine inférieure ou égale à 5500 cm^2/g ,
- de 45% à 75% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant et dont les particules
- 5 présentent un D70 inférieur ou égal à 63 μm , et
- de 5% à 15% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent une surface spécifique BET supérieure ou égale à 5 m^2/g ou un D50 inférieur ou égal à 8 μm , et étant choisi parmi les additions hydrauliques, les additions pouzzolaniques, les ciments ultrafins et leurs mélanges,
- 10 ii) au moins un superplastifiant ou plastifiant,
- iii) de l'eau et
- iv) des granulats,
- et dont l'affaissement au cône d'Abrams est supérieur ou égal à 160 mm, mesuré selon la norme NF EN 12350-2 à une température de 20°C à l'issue du gâchage, et la viscosité est
- 15 inférieure ou égale à 9 secondes mesurée par la méthode du cône inversé selon la norme XP P18-469 à une température de 20°C à l'issue du gâchage,
- pour former un béton durci présentant une résistance à la compression supérieure ou égale à 25 MPa, de préférence supérieure ou égale à 30 MPa, mesurée sur cylindres selon la norme NF EN 12390-3, 28 jours après mise en contact dudit liant avec l'eau.
- 20 19. Utilisation selon la revendication précédente d'une composition de béton frais selon l'une quelconque des revendication 1 à 15.
- 20. Procédé de préparation d'un béton durci comprenant la mise en œuvre d'un liant hydraulique comprenant :
 - de 20% à 40% en poids de clinker Portland par rapport au poids total dudit liant et dont les
 - 25 particules présentent un D50 supérieur à 11 μm et une surface spécifique Blaine inférieure ou égale à 5500 cm^2/g ,
 - de 45% à 75% en poids en filler par rapport au poids total dudit liant et dont les particules présentent un D70 inférieur ou égal à 63 μm , et
 - de 5% à 15% en poids en matériau de granulométrie ultrafine par rapport au poids total
 - 30 dudit liant et dont les particules présentent une surface spécifique BET supérieure ou égale à 5 m^2/g ou un D50 inférieur ou égal à 8 μm , et étant choisi parmi les additions hydrauliques,

les additions pouzzolaniques, les ciments ultrafins et leurs mélanges, et dont le rapport pondéral clinker/filler est d'au moins 0,32.

21. Procédé selon la revendication précédente, dans lequel ledit liant est mis en œuvre sous la forme d'une composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications 1 à 15.

22. Procédé selon la revendication précédente, comprenant au moins les étapes consistant à :

- a) former ladite composition de béton frais par malaxage de ses composants ;
- b) le cas échéant, couler la composition de béton frais, et
- c) laisser ladite composition de béton frais durcir pour obtenir ledit béton durci.

23. Béton durci obtenu à partir de la composition de béton frais selon l'une quelconque des revendications 1 à 15 ou obtenu à partir du procédé selon l'une quelconque des revendications 20 à 22.

24. Béton durci selon la revendication précédente, présentant une résistance à la compression supérieure ou égale à 25 MPa, de préférence supérieure ou égale à 30 MPa, mesurée sur cylindres selon la norme NF EN 12390-3, 28 jours après mise en contact dudit liant avec l'eau.

25. Béton durci selon la revendication 23 ou 24, ledit béton durci étant sous la forme d'un élément structurant, notamment un élément préfabriqué ou coulé, en particulier un élément structurant d'un ouvrage de bâtiment ou de travaux publics tel qu'en infrastructure ou en superstructure.