

Description

**Titre : COULIS POUR L'INJECTION DE CABLES DE
PRECONTRAINTE ET PROCEDE D'INSTALLATION D'UN
CABLE COMPRENANT UN TEL COULIS**

5 Domaine technique

[0001] La présente invention concerne le domaine des armatures pour ouvrages de construction. Elle se rapporte plus particulièrement au coulis injecté dans des conduits de câbles de précontrainte et au procédé de fabrication de ce coulis ainsi qu'au procédé d'installation d'un câble de structure comprenant la mise en place
10 d'un conduit et l'injection d'un coulis dans le conduit.

Technique antérieure

[0002] Les câbles de précontrainte sont généralement composés d'un faisceau d'armatures, le plus souvent en acier, dont la mise en tension permet d'exercer la précontrainte. Les armatures sont disposées dans un conduit tubulaire
15 (généralement ménagé dans une gaine) rempli d'un matériau de protection après mise en tension. Les câbles de précontrainte peuvent être placés à l'intérieur (noyés dans la structure à contraindre) ou à l'extérieur du béton (les câbles sont ancrés à la structure par leurs seuls ancrages aux extrémités). Dans tous les cas, la post-contrainte du béton est obtenue en premier lieu par le bétonnage d'une
20 structure (par exemple une poutre) comprenant un conduit (par exemple une gaine) vide d'armatures. Des armatures sont ensuite enfilées dans ce conduit puis mises en tension. Une fois la mise en tension des armatures effectuée, un coulis est injecté dans la gaine afin d'assurer la pérennité des câbles d'une part, notamment en les protégeant de la corrosion, afin de transmettre les efforts au
25 béton de la structure, dans le cas d'une précontrainte intérieure et adhérente au béton d'autre part.

[0003] Un coulis est généralement composé d'un mélange à base de ciment et d'eau, le mélange étant suffisamment fluide pour remplir le conduit et enrober le faisceau d'armatures sans laisser de vide. Le ciment est un liant hydraulique, c'est
30 à dire capable de faire prise dans l'eau. Un ciment classique se présente sous la

forme d'une poudre très fine qui, mélangée dans l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Un exemple de ciment classique bien connu est le ciment Portland. Le durcissement du ciment est dû à l'hydratation de certains composés minéraux. La composition de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium, résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec de la silice (SiO₂), de l'alumine (Al₂O₃), et de l'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux nécessaire est fournie par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Ces matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe₂O₂, l'oxyde ferrique. La suspension eau-ciment, c'est-à-dire le mélange à base de ciment et d'eau, est toujours adjuvantée pour améliorer la fluidité et retarder la prise ; ce mélange est appelé coulis de ciment.

[0004] Les observations faites sur les ouvrages montrent que la corrosion des câbles de post-tension peut se produire (éventuellement de façon précoce) aux endroits où le coulis ferait défaut (en raison de la présence de poches ou de bulles remplies d'air et/ou de solution aqueuse), la localisation de ces défauts dépendant notamment du tracé des câbles de précontrainte. Par exemple, comme ceci est illustré à la figure 1, les câbles de précontrainte 10 ont souvent un trajet de forme sinueuse comportant des points hauts 12 et des points bas 13, l'effort de précontrainte exercé par le câble 10 étant dirigé vers le bas au voisinage des points hauts et vice versa. Au niveau de ces points hauts 12, on peut observer une absence de coulis au contact des armatures du câble 10 et la présence d'air et/ou de solution aqueuse ou encore de particules moins denses que le ciment, ce qui peut favoriser la corrosion des armatures. Pour les coulis de ciment, l'absence de coulis provient d'un manque de stabilité du coulis ou d'imperfections de remplissage dans l'opération d'injection. Le manque de stabilité du coulis se traduit par un phénomène de ségrégation du coulis dans le conduit, par sédimentation (dépôt solide) ou filtration (remontée d'eau le long des armatures), qui peut entraîner en conséquence un phénomène de ressuage. Afin d'éviter ce phénomène, l'injection du coulis dans le conduit doit se faire sans entraîner ni emprisonner d'air dans le conduit, particulièrement dans les points hauts ou

derrière les ancrages. En outre, le coulis, une fois durci, doit être chimiquement stable et protecteur vis-à-vis de l'acier constitutif des câbles pendant la durée de service de l'ouvrage. Par ailleurs, pour son injection, le coulis doit être suffisamment fluide pour être pompé et acheminé dans les flexibles, les conduits
5 et doit rester stable et homogène avant et pendant la prise. Il est donc nécessaire de maîtriser le ressuage.

[0005] La fluidité du coulis est un point critique difficilement maîtrisable en raison de l'inconstance de la production du ciment, des variations climatiques durant les opérations d'injection, des pressions de mise en œuvre exercées, de la
10 cinématique de progression du coulis dans le conduit, de la filtration au travers des armatures etc.

[0006] Plus précisément, le coulis fluide est une suspension de grains de ciment dispersés dans une grande quantité d'eau contenant des adjuvants dont les rôles sont en général de fluidifier et de retarder la prise du mélange. Le ciment fait sa
15 prise par un phénomène d'hydratation, dont l'eau est le réactif principal, qui déclenche une réaction de cristallisation. L'eau du coulis est toujours excédentaire. En général les coulis sont dosés avec un rapport massique d'eau par rapport au ciment qui est de l'ordre de 0,34 à 0,40 alors que la teneur en eau nécessaire à l'hydratation des particules de ciment n'est que d'environ 0,17. Si la suspension
20 est stable, l'excédent d'eau se transforme en microporosités réparties, lors de la prise, dans le matériau durci. Dans le cas contraire il se produit des effets de ségrégation par filtration et/ou par sédimentation qui provoquent des remontées d'eau dans les points hauts avant la prise, et quelquefois des remontées de particules de matières moins denses que le ciment. Lorsque cela se produit, ces
25 particules forment dans les points hauts du tracé des câbles une accumulation de « pâte blanche » qui ne durcit pas et dont les propriétés chimiques sont différentes de celles du coulis durci. Cet effet peut être cumulé avec la présence de poches d'air et d'eau dans les points hauts si l'injection n'est pas correctement maîtrisée. C'est précisément dans ces zones de défaut d'injection que l'on peut
30 potentiellement observer des ruptures prématurées des câbles par effet de corrosion de l'acier des armatures. En effet, l'eau en quantité relative importante,

bien que nécessaire à la réaction chimique d'hydratation, présente des inconvénients tels que le ressuage ou l'accumulation de pâte blanche.

- [0007]** Il est par exemple connu selon le brevet EP0875636A1 une solution visant à pallier les problèmes de mauvaise injection en ajoutant des événements aux points
- 5 hauts du câble, permettant à l'air et à l'eau, qui pourraient se trouver au contact des armatures, de s'échapper du conduit. Cette solution n'est toutefois pas satisfaisante car l'évacuation par l'événement nécessite plusieurs étapes ultérieures de réinjection de coulis dans le conduit. Cette solution est donc longue et difficile à mettre en œuvre.
- 10 **[0008]** D'autres solutions connues consistent à remplacer le coulis de ciment par un substitut à ce coulis, tel que par exemple les gels inhibiteurs, les cires pétrolières ou les résines organiques. Ces substituts présentent de nombreux inconvénients comme par exemple un défaut d'adhérence entre le produit injecté et les armatures de précontrainte ou encore pour les cires la mise en œuvre à
- 15 température élevée, notamment pour être dans une plage de température située au-dessus du point de fusion du substitut utilisé, et obtenir ainsi un fluide de faible viscosité et donc injectable. Cette mise en œuvre à chaud provoque en outre une contraction (ou retrait) au refroidissement du produit.
- [0009]** Une autre alternative consiste à remplacer le coulis de ciment par un coulis
- 20 de composition alternative. Il est par exemple connu du document FR2623492A1 un coulis de ciment comprenant une charge minérale telle que par exemple du sable.
- [0010]** Un matériau minéral peut également être envisagé. Ce type de matériau est stable sous forme liquide et ne nécessite qu'une faible quantité d'eau en
- 25 comparaison avec un coulis de ciment destiné à l'injection. Il s'agit de produits de type poly(silico-oxo-aluminate), communément appelé « géopolymère ». En raison de l'absence de ciment dans un coulis géopolymère, la réaction d'hydratation du mélange n'intervient pas dans la prise et le durcissement du coulis. On évite ainsi les problèmes dus à la présence massive d'eau dans le coulis. Ce type de
- 30 matériau est connu par exemple du document FR2949227A1. Le coulis de géopolymère divulgué par ce document offre les performances rhéologiques et de résistance mécanique définie par un cahier des charges dans lequel, à 28 jours

suivant sa fabrication, la résistance à la compression du coulis doit être supérieure à 30 MPa. En revanche, ce matériau, ne répond pas aux critères usuels de fluidité nécessaire pour injection du coulis. Cette fluidité est usuellement mesurée suivant un test normalisé décrit dans la norme européenne « NF EN 445 » portant sur le
5 temps d'écoulement à travers un cône de Marsh d'un ajutage de diamètre 10 mm, qui doit rester théoriquement inférieur ou égal à 25 secondes, 5 heures après le malaxage du coulis (équivalent à une viscosité de 0,5 Pa.s).

[0011] En outre, le coulis doit pouvoir être injecté dans un conduit destiné à contenir des armatures tendues. Il est connu du document FR2713690A1 un
10 procédé pour l'injection d'un coulis. Toutefois, ce procédé est spécifiquement élaboré pour un coulis de ciment et ne peut donc pas être utilisé pour un coulis géopolymère.

[0012] Le coulis proposé par l'invention vise donc à résoudre les problèmes rencontrés dans les coulis connus parmi ceux faisant prise, qu'il s'agisse de coulis
15 de ciment ou de coulis géopolymère. Ainsi le coulis divulgué par la présente invention vise notamment à résoudre les problèmes qu'entraînent à la fois la présence d'eau dans le coulis de ciment, et le manque de fluidité des coulis géopolymère existants.

Résumé de l'invention

20 [0013] L'invention propose un coulis géopolymère pour la protection des armatures de précontrainte, le coulis géopolymère comprenant du métakaolin, des cendres volantes et un mélange activateur, le mélange activateur comprenant de l'hydroxyde de sodium et du silicate de sodium, dans lequel le rapport molaire $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ du silicate de sodium est compris entre 0,40 et 0,70. En particulier, le
25 rapport molaire $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ du silicate de sodium est compris entre 0,51 et 0,60.

[0014] Dans le coulis géopolymère, le silicate de sodium peut en outre présenter une teneur massique en eau comprise entre 52,1% et 72,1% et le mélange activateur présenter une teneur massique en eau inférieure à 65%.

[0015] Dans le coulis géopolymère, le mélange activateur peut en outre présenter
30 une teneur massique en eau comprise entre 40% et 65%. En particulier la teneur massique en eau est comprise entre 56% et 63%.

[0016] Dans le coulis géopolymère, le rapport massique métakaolin:cendres volantes:solution alcaline de silicate:hydroxyde de sodium peut être 1:1:2-3:0,15-0,35.

5 **[0017]** Dans le coulis géopolymère, le rapport massique métakaolin:cendres volantes:solution alcaline de silicate:hydroxyde de sodium peut en outre être 1:1:2,4-2,6:0,19-0,23.

[0018] Le coulis géopolymère peut en outre présenter un pH compris entre 13 et 14.

10 **[0019]** Le coulis géopolymère peut en outre présenter un ressuage de solution aqueuse de réaction inférieur à 0,5% de la masse totale du coulis.

[0020] Dans le coulis géopolymère, la surface spécifique BET (théorie Brunauer, Emmett et Teller) du métakaolin seul ou d'un mélange comprenant le métakaolin et les cendres volantes peut être supérieure ou égale à 25m²/g et de préférence supérieure ou égale à 30m²/g.

15 **[0021]** L'invention propose aussi un procédé de fabrication d'un coulis géopolymère, le coulis géopolymère comprenant du métakaolin, des cendres volantes et un mélange activateur, le mélange activateur comprenant de l'hydroxyde de sodium et du silicate de sodium, le rapport molaire Na₂O:SiO₂ du silicate de sodium étant compris entre 0,40 et 0,70, dans lequel le procédé de
20 fabrication comprend une étape d'activation au cours de laquelle le métakaolin et les cendres volantes sont activés par le mélange activateur afin d'obtenir une polymérisation de l'ensemble.

[0022] Le procédé de fabrication peut en outre comprendre une étape préalable d'homogénéisation du métakaolin et des cendres volantes.

25 **[0023]** Le procédé de fabrication peut en outre comprendre une étape de malaxage au cours de laquelle le mélange activateur est malaxé avec le métakaolin et les cendres volantes.

[0024] Dans une réalisation du procédé de fabrication, on ajoute de l'eau au début de l'étape de malaxage, la quantité d'eau ajoutée étant comprise entre 1% et 4%
30 de poids du coulis de géopolymère. L'eau ajoutée n'est utile que pour améliorer la

fluidité du coulis. L'eau n'est en effet pas nécessaire à l'étape de polymérisation, ce qui réduit son utilisation à minima. Par rapport aux quantités de métakaolin, de cendres volantes et de mélange activateur requises pour la fabrication du coulis, l'eau représente ainsi une quantité marginale, évitant ainsi les risques liés à la
5 qualité et à la stabilité lors de la prise du coulis.

[0025] Dans une réalisation du procédé de fabrication, dans une étape préalable de broyage, le métakaolin seul ou un mélange comprenant le métakaolin et les cendres volantes est broyé afin d'obtenir une surface spécifique BET supérieure ou égale à 25 m²/g et de préférence supérieure ou égale à 30 m²/g.

10 **[0026]** L'invention propose aussi un procédé d'installation d'un câble de structure, comprenant :

- la mise en place d'un conduit contenant au moins une armature,
- la mise en tension de l'armature,
- l'injection d'un coulis géopolymère dans le conduit, et

15 dans lequel le coulis géopolymère comprend du métakaolin, des cendres volantes et un mélange activateur, le mélange activateur comprenant de l'hydroxyde de sodium et du silicate de sodium, le rapport molaire Na₂O:SiO₂ du silicate de sodium étant compris entre 0,40 et 0,70.

[0027] Le procédé d'installation peut comprendre en outre, avant l'injection du
20 coulis géopolymère dans le conduit, un malaxage du coulis géopolymère pendant 2 à 5 minutes avec une énergie d'environ 9 kilojoules par litre, obtenant ainsi une fluidité équivalente au cône de Marsh avec un ajutage de diamètre 10 mm comprise entre 25 secondes et 35 secondes.

[0028] Le procédé d'installation peut comprendre en outre, au cours de l'injection
25 du coulis géopolymère dans le conduit, le recours à un flexible, le flexible ayant un diamètre interne supérieur à 25 mm et une longueur limitée à 100m.

[0029] Dans une réalisation du procédé d'installation, on pompe le coulis au cours de l'injection, le débit de pompage du coulis étant compris entre 0,5 m³/h et 1,5m³/h.

30 **[0030]** Il faut remarquer que ni le procédé de fabrication du coulis géopolymère, ni le procédé d'installation ne nécessite une étape de chauffage des composants du

coulis géopolymère ou du coulis en lui-même. Ces procédés peuvent être mis en œuvre à température ambiante, par opposition par exemple à l'injection de cire pétrolière qui nécessite le chauffage de la cire au-dessus de son point de fusion. De ce fait, le phénomène de retrait du coulis géopolymère après son injection est

5 insignifiant voire inexistant.

Brève description des dessins

[0031] D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée ci-après, et à l'analyse des dessins annexés, sur lesquels :

10 Fig. 1

[0032] [Fig. 1] est un schéma de principe illustrant un exemple de câble de précontrainte.

Description des modes de réalisation

[0033] Le coulis géopolymère selon l'invention est un matériau minéral sous forme

15 liquide stable dont la formulation ne comprend pas ou que très peu d'eau libre. Il s'agit plus précisément d'un produit de type Poly « silico-oxo-aluminate » ou $(\text{-Si-O-Al-O})_n$ (pour lequel n est le degré de polymérisation). Ce coulis géopolymère est particulièrement avantageux pour la protection des câbles de précontrainte dans leur conduit. En effet, ce coulis géopolymère garantit un meilleur remplissage

20 du conduit et un meilleur enrobage des armatures tout en n'ayant pas d'effet nocif eu égard à l'armature de précontrainte.

[0034] Le coulis géopolymère comprend principalement des poudres, qualifiées d'élément de charge, et un mélange activateur liquide. Les éléments de charge sont un métakaolin et des cendres volantes.

25 [0035] Le métakaolin est également appelé kaolin calciné. Le métakaolin est un silicate d'alumine déshydroxylé de composition générale $\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{Si}_2\text{O}_2$. Le métakaolin est par exemple un produit en poudre commercialisé sous la dénomination Argical 1200 ®, dont la composition est détaillée dans le tableau [Tableau 1] suivant.

30 [0036] [Tableau 1]

SiO ₂	55 %	Fe ₂ O ₃	1,8 %
Al ₂ O ₃	39 %	TiO ₂	1,5 %
K ₂ O + Na ₂ O	1,0 %	CaO + MgO	0,6 %

Le tableau [Tableau 1] ci-dessus détaille la composition chimique du métakaolin de dénomination commerciale Argical 1200®

- 5 **[0037]** Le métakaolin utilisé est broyé finement. Plus précisément, le métakaolin présente une surface spécifique BET supérieure à 15m²/g. Préférentiellement, la surface spécifique BET est supérieure à 25m²/g. Par exemple, la surface spécifique BET du métakaolin est supérieure à 30m²/g. Le métakaolin permet notamment d'obtenir un coulis plus lisse qu'avec un ciment classique, en limitant
- 10 les dépôts de sels minéraux en surface du ciment (appelés également « efflorescences »). Par ailleurs, la finesse de broyage du métakaolin permet d'améliorer les résistances mécaniques en compression et de diminuer la viscosité du coulis géopolymère obtenu. En effet, parmi les éléments de charge,
- 15 volantes entraîne une augmentation de la résistance mécanique et de la viscosité du coulis. Le métakaolin étant de forme allongée et irrégulière tandis que les cendres volantes étant de forme sphérique, le broyage du métakaolin améliore ses propriétés d'empilement avec les cendres volantes, ce qui entraîne une augmentation de la part de métakaolin parmi les éléments de charge. En outre, le
- 20 métakaolin est un composant qui nécessite peu d'énergie pour son extraction par rapport à un ciment ordinaire, ce qui rend la fabrication du coulis géopolymère écologiquement intéressante. En effet, la fabrication du métakaolin est obtenue par calcination de kaolinite (argile naturelle), qui peut être effectuée à basse température (entre 600°C et 800°C) par rapport à la fabrication d'un ciment qui
- 25 nécessite une combinaison chimique d'argile et de calcaire à très haute température (de l'ordre de 1450°C).

- [0038]** Les cendres volantes sont des cendres volantes de classe F. Plus précisément, les cendres volantes utilisées sont issues de la combustion de charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermoélectriques, par
- 30 captation dans des dépoussiéreurs électrostatiques. Par exemple, les cendres

volantes utilisées sont commercialisées sous la dénomination commerciale « Silicoline ® ». Les cendres volantes permettent notamment d'améliorer la maniabilité du coulis et les performances mécaniques de celui-ci à long terme.

- [0039]** Les cendres volantes utilisées peuvent être broyée finement. Dans ce cas, les cendres volantes présentent une surface spécifique BET supérieure à 15m²/g. Préférentiellement, la surface spécifique BET est supérieure à 25m²/g. Par exemple, la surface spécifique BET des cendres volantes est supérieure à 30m²/g. La finesse de broyage des cendres volantes permet d'améliorer les résistances mécaniques en compression du coulis géopolymère obtenu.
- 10 **[0040]** Le mélange activateur comprend de l'hydroxyde de sodium, du silicate de sodium et de l'eau. Le mélange activateur permet d'amorcer les réactions chimiques en cassant des liaisons chimiques des éléments de métakaolin et de cendres volantes, afin de former un gel amorphe puis d'enclencher la réaction de polymérisation et de polymériser l'ensemble afin d'obtenir le géopolymère dont la
- 15 structure tridimensionnelle contient la liaison Si-O-Al.

- [0041]** Le silicate de sodium est une solution alcaline de silicate. Plus précisément, le silicate de sodium présente un rapport molaire Na₂O:SiO₂ compris entre 0,40 et 0,70. Par exemple, le rapport molaire est compris de préférence entre 0,51 et 0,60. Par exemple, le rapport molaire est compris entre 0,55 et 0,59. Selon un autre
- 20 exemple, le rapport molaire est 0,57. En outre, le silicate de sodium présente une teneur massique en eau comprise entre 52,1% et 72,1%. Par exemple, le silicate de sodium comprend 62,1% de son poids en eau.

- [0042]** L'hydroxyde de sodium se présente sous la forme initiale de pastilles de soude. Les pastilles de soude sont incorporées dans la solution de silicate de sodium, selon le rapport massique hydroxyde de sodium:silicate de sodium de
- 25 8,53:100. Par exemple, 85,3g de soude sont incorporés dans 1000g de solution de silicate de sodium. Le caractère basique de la soude permet d'augmenter le pH du coulis géopolymère, ce qui favorise la protection des armatures vis-à-vis de la corrosion. Par exemple, le coulis possède un pH compris entre 13 et 14. Selon un
- 30 autre exemple, le coulis géopolymère présente un pH compris entre 13,3 et 13,5. Selon un exemple préférentiel, le coulis géopolymère présente un pH voisin de 13,4. Par conséquent, si le coulis doit présenter un phénomène de ressuage, qui

ne sera que très limité en raison de la quantité marginale d'eau ajoutée, la solution aqueuse du ressuage présente un pH basique compris dans les gammes détaillées ci-avant. L'eau du ressuage ne provoque donc pas la corrosion des armatures. En particulier, le coulis peut présenter un ressuage de solution
5 aqueuse inférieur à 0,5% de la masse totale du coulis.

[0043] La soude permet en outre d'obtenir des rapports molaires Na/Si ou Na/Al adéquats, ce qui permet l'obtention d'un coulis géopolymère de formulation chimique répondant aux critères recherchés.

[0044] Le mélange activateur comprend en outre de l'eau. On entend ici par eau,
10 de l'eau qui est ajoutée en plus de l'eau entrant dans la composition de la solution de silicate de sodium. Par conséquent, l'eau décrite ici ne fait pas partie de l'eau composant le silicate de sodium et est donc exclue de la gamme 52,1% à 72,1% de teneur massique en eau du silicate de sodium exposée précédemment. L'eau ajoutée représente moins de 4% en masse totale du coulis géopolymère. Par
15 « masse totale du coulis géopolymère », on entend la masse du coulis comprenant le métakaolin, les cendres volantes, l'hydroxyde de sodium, le silicate de sodium et l'eau ajoutée. Par exemple, l'eau ajoutée représente entre 1% et 4% de la masse totale de coulis géopolymère. Selon un autre exemple, l'eau ajoutée représente entre 1 et 2% de la masse totale du coulis géopolymère, et
20 préférentiellement 1,86%. Selon encore un autre exemple, l'eau ajoutée représente entre 3 et 4% de la masse totale du coulis géopolymère, et préférentiellement 3,64%. Cette quantité reste marginale par rapport à la masse totale du coulis géopolymère.

[0045] Autrement dit, le mélange activateur présente une teneur massique en eau
25 inférieure à 65%. Ici, la teneur massique en eau prend en compte l'eau contenue dans le silicate de sodium en tant que tel et l'eau ajoutée au silicate de sodium et à l'hydroxyde de sodium. Par conséquent, la teneur massique est ici un rapport entre la masse d'eau contenue dans le silicate de sodium et l'eau ajoutée sur la masse totale du mélange activateur (c'est-à-dire le silicate de sodium, l'hydroxyde
30 de sodium et l'eau ajoutée). Par exemple, le mélange activateur présente une teneur massique en eau comprise entre 40% et 65%, et par exemple entre 56% et 63%. Par exemple, le mélange activateur présente une teneur massique en eau

comprise entre 58% et 59% Selon un autre exemple, le mélange activateur présente une teneur massique en eau comprise entre 59% et 60%

[0046] Avantageusement, l'ajout d'eau au mélange activateur permet d'améliorer la fluidité du coulis géopolymère tout en ne réduisant que de façon limitée la
5 résistance mécanique après prise et durcissement, celle-ci respectant toujours le critère selon lequel la résistance à la compression du coulis doit être supérieure à 30 MPa à 28 jours.

[0047] Le coulis de géopolymère de l'invention présente l'avantage de n'entraîner un ressuage que très limité et une meilleure homogénéité du coulis étant donné la
10 faible quantité d'eau incorporée. Par ailleurs, cette faible quantité d'eau entraîne l'absence de filtration dans le faisceau d'armatures constitutif du câble. Il résulte également de la faible quantité d'eau ajoutée une porosité du coulis géopolymère très inférieure à une porosité du coulis cimentaire de l'art antérieur. Par exemple, la porosité du coulis géopolymère détaillé ici présente une porosité au moins six
15 fois inférieure à la porosité d'un coulis de ciment. De plus, la progression cinétique d'injection du coulis géopolymère dans le conduit est facilitée et le coulis enrobe plus facilement les armatures que ne le fait un coulis de ciment classique, ce qui prévient l'apparition de poches (ou bulles) d'air occlus.

[0048] Le coulis géopolymère est fabriqué selon le procédé détaillé ci-après,
20 comprenant certaines alternatives.

[0049] Dans une étape initiale, le métakaolin et les cendres volantes sont homogénéisés dans un mélangeur mécanique.

[0050] Alternativement, au préalable, le métakaolin seul (c'est-à-dire sans les cendres volantes) est broyé afin d'obtenir une surface spécifique BET supérieure
25 ou égale à 25 m²/g et de préférence supérieure ou égale à 30 m²/g. Par exemple, le métakaolin est broyé à l'aide d'un broyeur. Le broyeur utilisé peut être un broyeur à anneaux ou un broyeur à boulets. Selon une autre alternative, les éléments de charge (c'est-à-dire le métakaolin et les cendres volantes) sont broyés afin d'obtenir une surface spécifique BET supérieure ou égale à 25 m²/g et
30 de préférence supérieure ou égale à 30 m²/g.

- [0051]** Dans le cas d'un broyeur à boulets, on introduit par exemple une masse de 5 kg de métakaolin, que l'on broie pendant 12h à une vitesse de 39 tours par minute. En fonction du temps de broyage, on obtient différentes surfaces spécifique BET pour le métakaolin, dont certains exemples sont regroupés dans le
- 5 tableau [Tableau 2] suivant.

[0052] [Tableau 2]

temps de broyage (h)	surface spécifique BET (m ² /g)
0	18
3	26
6	30
9	34
12	36

- Le tableau [Tableau 2] ci-dessus illustre le broyage de 5kg de métakaolin par un broyeur à boulets à une vitesse de 39 tours par minute
- 10 **[0053]** On prépare ensuite la solution de silicate de sodium dans laquelle les pastilles de soude sont incorporées. Par exemple, une dose de 85,3g de soude est incorporée pour 1000g de solution de silicate de sodium. Le mélange est agité jusqu'à la dissolution complète des pastilles de soude.

- 15 **[0054]** Ensuite, dans une étape de malaxage, le mélange activateur est malaxé avec le métakaolin et les cendres volantes. Cette étape permet d'obtenir une polymérisation de l'ensemble et par conséquent le coulis géopolymère.

- [0055]** Plus précisément, le mélange de métakaolin et de cendres volantes est introduit dans la solution d'activateur. L'ensemble est ensuite malaxé
- 20 suffisamment pour garantir une défloculation du mélange (mélange homogène sans grumeaux)

[0056] L'eau est ensuite ajoutée à l'ensemble. L'ajout d'eau permet de fluidifier le mélange de sorte à obtenir un coulis géopolymère ayant une fluidité au cône de

Marsh (avec ajutage de diamètre 10 mm) comprise entre 25 secondes et 35 secondes, et par exemple 30 secondes.

[0057] Alternativement, l'eau est ajoutée avant mixage de l'ensemble. Selon une autre alternative, l'eau est ajoutée pendant le mixage. En effet, l'instant durant lequel l'eau est ajoutée au cours de l'étape de mixage ne modifie pas les propriétés rhéologiques et la résistance mécanique du coulis géopolymère. En particulier, il faut comprendre que l'eau ajoutée ne participe pas à la polymérisation de l'ensemble. En d'autres termes, l'eau n'est pas un constituant réactif de l'étape de polymérisation. L'ajout d'eau au mélange est donc indépendant de la polymérisation.

[0058] Alternativement l'ensemble est ensuite maintenu au repos pendant 90 secondes.

[0059] Puis l'ensemble est mixé pendant 60 secondes à une vitesse par exemple de 630 tours par minute.

[0060] A titre d'exemple, le coulis géopolymère préparé présente les caractéristiques regroupées dans le tableau [Tableau 3] suivant.

[0061] [Tableau 3]

		Formulation 1	Formulation 2	Formulation 3
coulis géopolymère	métakaolin (g)	112,5	112,5	112,5
	broyage du métakaolin	non	Broyage métakaolin seul	Cobroyage métakaolin+ cendres volantes
	cendres volantes (g)	112,5	112,5	112,5
	mélange activateur	silicate de sodium (g)	280	280
		eau (g)	20	10
		soude (g)	23,884	23,884

Le tableau [Tableau 3] ci-dessus regroupe des exemples de formulation de coulis géopolymère

[0062] Par conséquent, le coulis géopolymère présente un rapport métakaolin:cendres volantes:solution alcaline de silicate:hydroxyde de sodium de

1:1:2-3:0,15-0,35. Par exemple le rapport massique est 1:1:2,4-2,6:0,19-0,23. Préférentiellement, comme illustré dans les exemples de formulation du tableau [Tableau 3], le rapport massique est 1:1:2,489:0,212.

- [0063]** Des mesures rhéologiques et des tests de résistance mécanique ont été effectués sur le coulis géopolymère obtenu, selon les méthodes d'essais de la norme NF EN 445. Les résultats sont regroupés dans le tableau [Tableau 4] suivant.

[0064] [Tableau 4]

	Résistance à la compression à 7 jours (MPa)	Viscosité (Pa.s)
Formulation 1	29,7	0,90
Formulation 2	36,3	0,68
Formulation 3	39,4	0,76

- 10 Le tableau [Tableau 4] ci-dessus regroupe des résultats de résistance à la compression et mesure de viscosité

- [0065]** Le procédé d'installation d'un câble de structure est à présent décrit. Le procédé d'installation comprend principalement la mise en place d'un conduit contenant au moins une armature ainsi que la mise en tension de l'armature, puis l'injection d'un coulis géopolymère dans le conduit.

- [0066]** Une fois le coulis géopolymère préparé selon le procédé de fabrication décrit plus haut, le coulis géopolymère est malaxé afin d'obtenir une fluidité suffisante, mesurée au cône de Marsh selon la norme NF EN 445 comprise entre 25 secondes et 45 secondes. Par exemple, le coulis géopolymère est malaxé pendant 2 à 5 minutes (par exemple 4 minutes) avec une énergie d'environ 9 kilojoules par litre. Le malaxage est réalisé par exemple par un malaxeur de type turbo permettant de disperser dans le mélange une énergie d'environ 9 kilojoules par litre. Ce malaxage est une étape importante du procédé d'injection car elle permet d'améliorer la fluidité au même titre, autrement dit de réduire le temps d'écoulement mesuré au cône de Marsh. En effet, le mélange géopolymère avant turbo-malaxage peut présenter un temps d'écoulement supérieur à 50 secondes,

tandis que le turbo-malaxage décrit ci-dessus permet de l'abaisser à une valeur comprise entre 25 et 45 secondes (valeurs de viscosité comprises entre 0,5 et 0,9 Pa.s). Ces valeurs de temps d'écoulement peuvent rester supérieures au critère usuel de la norme NF EN 445 (temps inférieur ou égal à 25 secondes) sans empêcher l'injection du coulis.

[0067] Par la suite, le coulis géopolymère est injecté dans le conduit par un flexible. Le flexible possède par exemple un diamètre interne supérieur à 25 mm. De préférence, le diamètre interne du flexible est supérieur à 35 mm. En outre, le flexible présente une longueur par exemple limitée à 100m. L'injection du coulis géopolymère se fait par exemple au moyen d'une pompe (de pression nominale 25 bar) avec un débit de pompage compris entre 0,5 m³/h et 1,5m³/h.

[0068] Grâce à ce procédé d'installation, le coulis géopolymère reste stable (c'est-à-dire homogène par absence de ségrégation). En effet, aucun ressuage n'est observé autour et au travers des armatures constitutives du câble. En comparaison avec un coulis de ciment, tout risque lié à une mauvaise réaction d'hydratation, et notamment l'obtention d'un coulis instable, est donc ici évité. Après prise et durcissement du coulis géopolymère, on peut retrouver dans des cavités ou bulles une résurgence de solutions aqueuses dont le pH est compris entre 13 et 13.5 et représentant moins de 0.5% en masse de coulis. On retrouve dans la composition de ces solutions les principaux éléments chimiques issus des différents composants (ions sodium Na⁺, sulfates SO₄²⁻, silicate H₂SiO₄²⁻, et aluminates Al(OH)₄⁻), ceux-ci ne présentant pas de risque vis-à-vis de la protection contre la corrosion des armatures. Par ailleurs, le volume d'air résiduel dans le conduit est six fois inférieur à celui d'un coulis de ciment classique. Il a également été observé que lorsque le conduit dans lequel est injecté le coulis géopolymère est incliné, le coulis géopolymère progresse avec un front peu décalé entre les parties supérieure et inférieure du conduit.