

Description

Titre : Fabrication additive d'élément isolant

5 L'invention se rapporte au domaine de la construction. Elle concerne plus particulièrement la fabrication d'éléments isolants par une technique de fabrication additive.

En plus de ses avantages en termes de confort et
10 d'économie, l'isolation thermique des bâtiments, aussi bien en construction qu'en rénovation, constitue un enjeu primordial dans la lutte contre le réchauffement climatique. Il est donc essentiel que les éléments de construction possèdent la plus faible conductivité thermique possible.
15 Pour répondre à cette problématique, un grand nombre de solutions techniques ont été proposées, qui mettent en œuvre des éléments isolants divers (laines minérales, mousses organiques etc...) associés à des éléments structurels (murs, toitures etc...).

20 L'invention vise à proposer de nouvelles techniques de fabrication d'éléments de construction présentant une isolation thermique améliorée.

Les techniques de fabrication additive connaissent aujourd'hui des développements prometteurs dans un grand
25 nombre de domaines techniques. Egaleme nt appelée « impression 3D », la fabrication additive est une méthode dans laquelle un robot contrôlé par ordinateur fabrique des objets tridimensionnels en déposant de manière continue un matériau couche après couche. Ces techniques permettent en
30 particulier de fabriquer des objets présentant des formes complexes.

La fabrication additive a par exemple été employée pour fabriquer des éléments structurels tels que des murs en béton.

La fabrication additive d'éléments de construction, par exemple en béton ou mortier, permet d'intégrer les processus de conception, de planification et de construction et d'automatiser et rationaliser ce dernier. D'autres avantages de cette technologie sont notamment une réduction du coût de main d'œuvre, une réduction des pertes et de la consommation en matériau, la suppression des coffrages et la réduction de la durée des projets et des investissements. Dans le présent texte on entend indifféremment par béton ou mortier un matériau comprenant un liant hydraulique et des granulats.

Dans les technologies connues, un mortier humide, obtenu en mélangeant un mortier sec et de l'eau de gâchage, est pompé et convoyé vers une tête d'impression solidaire d'un robot ou d'un portique dont le mouvement est contrôlé par ordinateur. Une couche de mortier humide est déposée sur une couche de mortier précédemment déposée, généralement en étant extrudée au travers d'une buse. La tête d'impression est continuellement déplacée selon un schéma prédéterminé afin de fabriquer l'objet final.

L'invention propose une voie différente pour obtenir par ce type de techniques des éléments de constructions isolants.

A cet effet l'invention a pour objet un procédé d'obtention d'un élément isolant en mousse minérale par fabrication additive, dans lequel on dépose successivement des couches d'une pâte de mousse minérale superposées, ladite mousse minérale ayant après durcissement une masse volumique d'au plus 200 kg/m³.

L'invention a aussi par objet un procédé d'obtention d'un élément de construction comprenant au moins un élément structurel et au moins un élément isolant en mousse minérale, ledit procédé comprenant une étape d'obtention dudit élément
5 isolant en mousse minérale par le procédé de l'invention.

Un autre objet de l'invention est un élément isolant en mousse minérale, ou un élément de construction, susceptible d'être obtenu par l'un de ces procédés.

L'invention applique donc les techniques de
10 fabrication additive non pour construire l'élément structurel ou porteur de l'élément de construction, mais au contraire pour construire l'élément isolant. L'impression de l'élément isolant permet notamment de bénéficier des avantages de la fabrication additive tout en se conformant,
15 s'agissant de la fabrication des éléments structurels, aux procédés conventionnels certifiés et reconnus, lesquels ne nécessitent pas d'autorisations particulières.

L'élément de construction sera le plus souvent un mur ou un élément de mur, en particulier pour un mur de façade
20 ou de refend. Il peut aussi être un élément de plancher. L'élément sera généralement destiné à être intégré à la structure d'un bâtiment.

On entend par « mousse minérale » un matériau minéral alvéolaire ou cellulaire. Les alvéoles ou cellules sont de
25 préférence remplies d'air. La taille des alvéoles ou cellules est de préférence d'au plus 400 μm , notamment au plus 250 μm . La proportion volumique d'air dans la mousse est de préférence comprise entre 10 et 80% (en ne prenant pas en compte l'air compris dans les éventuels granulats légers
30 poreux décrits dans la suite du texte).

La mousse minérale comprend de préférence au moins un liant hydraulique.

L'obtention de la pâte de mousse minérale comprend de préférence le gâchage avec une solution aqueuse d'une composition sèche comprenant au moins un liant hydraulique, puis le malaxage de la pâte minérale ainsi obtenue.

5 Par composition sèche on entend un mélange pulvérulent. Après prise et durcissement, la mousse finale peut être appelée mousse durcie, ou encore mousse de ciment, mousse de mortier ou mousse de béton. La solution aqueuse peut être simplement de l'eau, ou encore de l'eau comprenant
10 en solution, en dispersion ou en suspension un ou plusieurs additifs, notamment organiques, par exemple des tensioactifs, ou encore minéraux, par exemple des nanoparticules de silice.

Le liant hydraulique est notamment choisi parmi les
15 ciments Portland, les ciments alumineux, les ciments sulfoalumineux, la chaux hydratée, les laitiers de haut fourneau granulés broyés, les cendres volantes et leurs mélanges.

La mousse minérale et/ou la composition sèche peut
20 également comprendre des granulats, en particulier des granulats légers, c'est-à-dire ayant une masse volumique apparente inférieure à 200 kg/m³. Les granulats légers sont notamment choisis parmi la perlite, la vermiculite, les billes de verre expansé, les billes de polystyrène expansé,
25 les céosphères, les silicates expansés, les aérogels et leurs mélanges. La mousse minérale peut aussi comprendre des granulats autres que les granulats légers, mais de préférence en une teneur pondérale d'au plus 20%, notamment d'au plus 15%, voire d'au plus 10% ou d'au plus 5% (après
30 durcissement).

La taille maximale des granulats est de préférence d'au plus 3 mm, notamment d'au plus 2 mm et même d'au plus 1 mm, compte tenu de la section réduite du dispositif de pompage et de la buse de la tête d'impression. Pour assurer

une bonne stabilité de la mousse, la taille maximale des granulats est même avantageusement d'au plus 0,1 mm. La taille maximale peut être vérifiée par exemple par tamisage.

La composition sèche comprend de préférence au moins
5 un additif, notamment choisi parmi les superplastifiants, les épaississants, les accélérateurs et les retardateurs. Le mortier sec comprend avantageusement des épaississants inorganiques, par exemple des argiles gonflantes, capables d'augmenter la limite d'élasticité au repos du mortier
10 humide. Les accélérateurs et retardateurs permettent d'ajuster le temps nécessaire à la prise et au durcissement du liant hydraulique.

La pâte de mousse minérale peut être obtenue par différentes techniques, lesquelles ont en commun le fait
15 qu'un gaz, notamment de l'air, est introduit dans la pâte. Le gaz peut être notamment généré ou introduit lors du malaxage de la pâte minérale, ou encore apporté par une mousse aqueuse ou par une solution contenant un agent générateur de gaz, ajoutées à la pâte après malaxage.

20 Selon un mode de réalisation, la composition sèche et/ou la solution aqueuse comprend un agent entraîneur d'air capable de piéger de l'air au sein de la pâte minérale lors du malaxage. Dans ce cas la pâte de mousse minérale est formée lors du malaxage. Un tel agent est de préférence un
25 tensioactif. Il peut notamment s'agir d'un tensioactif anionique. Le tensioactif anionique est avantageusement choisi parmi les alkylsulfates, les alkylsulfonates, les alkylethersulfates, les alkylarylsulfates et les tensioactifs élaborés à partir de protéines ou d'acides
30 aminés, par exemple les N-acylglutamates et les N-acylsarcosinates. L'agent entraîneur d'air peut aussi être de l'alcool polyvinylique.

Dans ce mode de réalisation, la composition sèche comprend de préférence au moins 40%, voire au moins 60% en

poids de granulats légers, un liant hydraulique comprenant un ciment sulfoalumineux et/ou un ciment alumineux, un agent entraîneur d'air, en une teneur pondérale d'au moins 0,3%, notamment d'au moins 0,5%, et éventuellement un agent
5 viscosant, notamment choisi parmi les alcools polyvinyliques, les éthers d'amidon, les éthers de cellulose, les éthers de guar et les argiles. Les granulats légers ont de préférence un diamètre moyen d'au plus 80 µm.

Selon un autre mode de réalisation, la composition
10 sèche et/ou la solution aqueuse comprend un agent générateur de gaz capable de générer des bulles de gaz au sein de la pâte minérale lors de son malaxage. Un tel agent est par exemple une poudre métallique (par exemple d'aluminium, zinc, silicium...) capable de réagir avec l'eau et les
15 hydroxydes. Il peut aussi s'agir d'un peroxyde, par exemple le peroxyde d'hydrogène, capable par exemple de réagir avec des sels de manganèse.

Alternativement, l'agent générateur de gaz peut être ajouté à la pâte minérale (après malaxage). Par exemple,
20 l'obtention de la pâte de mousse minérale peut comprendre une étape d'ajout à la pâte malaxée d'une solution aqueuse comprenant cet agent. Cet ajout peut être réalisé juste avant la tête d'impression.

Selon encore un autre mode de réalisation, l'obtention
25 de la pâte de mousse minérale comprend en outre une étape d'obtention d'une mousse aqueuse puis une étape de mélange de ladite mousse aqueuse avec la pâte minérale. Dans ce cas la mousse minérale est obtenue par le mélange de la pâte minérale malaxée et de la mousse aqueuse. La mousse aqueuse
30 est par exemple obtenue en mélangeant de l'eau et un agent moussant (ou un agent stabilisateur de mousse) puis en introduisant un gaz, notamment de l'air, par agitation, bullage ou encore injection sous pression. Le diamètre médian

des bulles de la mousse aqueuse est de préférence d'au plus 400 µm, notamment d'au plus 250 µm.

L'agent moussant est par exemple un tensioactif. Selon un exemple préféré, il s'agit d'un tensioactif issu de
5 protéines ou d'aides aminés.

Par exemple, la pâte de mousse minérale comprend de préférence de 10 à 70% d'eau ; de 30 à 75%, notamment de 40 à 60%, de ciment, notamment de ciment Portland ; de 10 à 70%, notamment de 15 à 40%, de fillers, notamment des fillers
10 calcaire, dont le diamètre médian (pour une distribution volumique) est d'au plus 5 µm, notamment compris entre 1 et 4 µm ; jusqu'à 10%, notamment entre 1 et 7%, de particules fines dont le diamètre médian est d'au plus 1 µm ; et éventuellement des additifs (agents réducteurs d'eau,
15 plastifiants, superplastifiants, agents retardateurs ou accélérateurs, agents épaississants, agents moussants...). Toutes les teneurs indiquées sont des teneurs pondérales. Le mélange de la mousse aqueuse avec la pâte minérale est de préférence réalisé au moyen d'un mélangeur statique,
20 notamment de type hélicoïdal.

Selon un autre exemple de ce mode de réalisation, la mousse aqueuse comprend le mélange d'un tensioactif cationique qui est un sel (notamment un halogénure) d'ammonium quaternaire et d'un tensioactif anionique qui est
25 un sel (notamment un sel alcalin) d'acide carboxylique en C10-C24, par exemple du stéarate de potassium. Le liant hydraulique est alors de préférence du ciment Portland, notamment du type CEM I 52.5. La pâte de mousse minérale comprend de préférence un latex, notamment choisi parmi les
30 (co)polymères vinyliques et/ou acryliques, par exemple des copolymères styrène-acrylique.

Selon encore un autre exemple de ce mode de réalisation, la mousse aqueuse comprend des nanoparticules, notamment de silice, qui ont la propriété de stabiliser les

5 mousses. De telles mousses sont appelées « mousses de Pickering ». Les nanoparticules de silice peuvent être elles-mêmes stabilisées par des tensioactifs. La masse volumique de la mousse minérale après durcissement (en particulier après 28 jours) est de préférence comprise entre 40 et 200 kg/m³, notamment entre 50 et 180 kg/m³, voire entre 60 et 150 kg/m³, ou encore entre 80 et 120 kg/m³.

10 De par la présence d'une importante quantité de gaz, en particulier d'air, emprisonnée dans une matrice minérale, la mousse présente une faible conductivité thermique, notamment en réduisant les transferts thermiques par convection et par conduction. La conductivité thermique de la mousse minérale après durcissement (en particulier après 28 jours) est de préférence d'au plus 60 mW.m⁻¹.K⁻¹.

15 Le procédé comprend le dépôt successif de couches de pâte de mousse minérale superposées.

Après son obtention, la pâte de mousse minérale est de préférence pompée (notamment à l'aide d'une pompe) et acheminée, généralement dans un tuyau, vers la tête d'impression d'une imprimante. La tête d'impression comprend notamment une buse à travers laquelle la pâte est extrudée. La buse d'extrusion est de préférence située à moins de 100 mm de la couche sous-jacente. L'imprimante est par exemple un robot industriel ou un portique, portant la tête d'impression, et dont le mouvement est piloté par un ordinateur. L'ordinateur comprend notamment un support d'enregistrement dans lequel est stocké un ensemble de données ou modèle 3D ainsi que des instructions, qui lorsqu'elles sont exécutées par l'ordinateur conduisent ce dernier à contrôler le déplacement (trajectoire, vitesse...) de la tête d'impression.

La vitesse d'impression est typiquement de 30 à 1000 mm/s, notamment de 50 à 300 mm/s. L'épaisseur (ou hauteur, puisqu'il s'agit ici de la dimension dans la

direction verticale) des couches de pâte est de préférence comprise entre 5 et 40 mm, notamment entre 10 et 20 mm. La largeur des couches de pâte est de préférence comprise entre 10 et 300 mm, notamment entre 20 et 100 mm.

- 5 Dans le mode de réalisation décrit ci-avant, comprenant le mélange d'une mousse aqueuse et de la pâte minérale, ce mélange est de préférence réalisé au moyen d'un mélangeur statique. L'ajout de la mousse aqueuse est de préférence réalisé entre la pompe et la tête d'impression,
- 10 idéalement le plus près possible de la tête d'impression afin de conserver la structure de la mousse. La quantité de mousse aqueuse par rapport à la quantité de pâte minérale est de préférence ajustée automatiquement, notamment en fonction de la densité recherchée. Le rapport entre le volume
- 15 de mousse aqueuse ajoutée et le volume de pâte minérale est de préférence compris entre 5 et 12. Par exemple, pour une masse volumique après durcissement de 100 kg/m³, le rapport entre le volume de mousse aqueuse ajoutée et le volume de pâte minérale est typiquement de l'ordre de 10.
- 20 Le procédé comprend de préférence l'ajout à la pâte de mousse minérale, avant le dépôt, d'un accélérateur de prise et/ou de durcissement ou d'un agent modificateur de rhéologie. L'ajout peut notamment se faire au niveau de la buse ou à proximité de la buse, donc juste avant extrusion.
- 25 Alternativement, l'accélérateur ou l'agent modificateur de rhéologie peut être ajouté immédiatement après le dépôt, en surface des couches. L'accélérateur de prise est par exemple un sulfate d'aluminium ou un sel de lithium, selon le type de liant hydraulique employé. L'agent modificateur de
- 30 rhéologie permet par exemple de conférer un caractère thixotropique à la pâte. L'ajout d'un accélérateur de prise ou d'un agent modificateur de rhéologie permet de consolider rapidement les couches de mousse minérale, de façon à ce

qu'elles puissent supporter le poids des couches sus-jacentes sans déformation.

L'obtention de l'élément de construction comprenant au moins un élément structurel et au moins un élément isolant en mousse minérale peut être réalisée de différentes manières.

On entend par « élément structurel » un élément du bâtiment qui satisfait à un rôle de structure ou qui participe à son confortement. L'élément structurel est par exemple une paroi en béton.

Selon un mode de réalisation, l'élément isolant forme un coffrage, le procédé comprenant en outre une étape de remplissage dudit coffrage par un élément structurel, notamment en béton. A titre d'exemple, l'élément isolant est imprimé de manière à former deux parois se faisant face et ménageant une cavité, dans laquelle du béton est coulé. Les parois peuvent être planes ou présenter les formes les plus diverses, comme le permet la technique de fabrication additive. On forme ainsi un élément de construction comprenant une paroi de béton entourée de deux couches isolantes externes.

Selon un autre mode de réalisation, les couches de mousse minérale sont déposées contre au moins un élément structurel préexistant. On dépose ainsi les couches au contact d'un élément, par exemple en béton, le long d'au moins une de ses surfaces principales. On obtient par exemple une paroi de béton possédant sur au moins une (éventuellement sur deux) de ses surfaces une couche isolante.

Dans le cadre de ce mode de réalisation, les couches de mousse minérales peuvent être déposées entre et en contact avec deux éléments structurels préexistants. On forme ainsi par exemple un mur comprenant une première et une deuxième

paroi de béton entre lesquelles est disposée une couche de mousse minérale.

Les éléments de construction peuvent être des éléments préfabriqués, destinés à être assemblés sur le chantier de construction, par exemple au moyen d'un mortier, afin de former les murs extérieurs ou intérieurs (par exemple les murs de refend) d'un bâtiment. Les éléments peuvent aussi être fabriqués directement sur le chantier de construction et former le mur complet du bâtiment.