

COMPORTEMENT D'UN COMPOSITE FINE MINERALE - CIMENT - BOIS ELABORE A L'AIDE DE DECHETS INDUSTRIELS SOLIDES

Soumis le 16/10/1999 – Accepté le 29/04/2000

Résumé

Cinq fines minérales de différentes natures minéralogiques et de limites granulaires comparables, provenant de résidus de carrières, ont été traitées pour former le squelette de bétons légers d'isolation. L'allègement et le pouvoir isolant de ces bétons sont obtenus par incorporation de granulats de bois dans la matrice constituée de la fine minérale et de ciment CPA.

Dans une première partie, sont présentés les principales caractéristiques de ces fines: minéralogie par diffraction des rayons X, granulométrie laser, conductivité thermique à la sonde TPS, densité sèche par pycnométrie à eau et morphologie au MEB.

La seconde partie est consacrée à l'étude de l'effet des caractéristiques de ces fines sur le comportement hygrothermique et mécanique de ces bétons élaborés avec une même formulation et un même état de consistance au moulage.

Les résultats de ces investigations sont comparés entre eux et à ceux de matériaux usuels classés par la RILEM.

Mots clés: Fines minérales – Résidus de carrières - Bétons légers - Comportement mécanique - Conductivité thermique - Variations dimensionnelles.

Abstract

Five mineral fines resulting from exploitation of aggregates quarries, having different mineralogical natures and a comparable grading analysis, have been treated in the aim to form the frame of lightweight and insulating concretes. The lightening and the capacity of insulating concretes are achieved by addition of wood aggregates in a matrix forming by a fine mineral and a CPA cement. In the first part are presented the principal characteristics of these fines like: Mineralogy using X-ray diffraction analysis, laser grading analysis, thermal conductivity measurement using the TPS method, dry density by water picnometry and morphology in electron microscopy.

The second part describes the properties acquired by the wood concretes elaborated with the different mineral fines. The properties concerned are the thermohygroscopic and the mechanical. The elaborated concretes have the same formulation and consistency.

The results of the experimental investigation are compared between themselves and with the ones of usual materials.

Key words: Mineral fines - Solid waste of quarries - Lightweight concrete - Mechanical behaviour - Thermal conductivity - Dimensional variations.

M.L. BENMALEK ⁽¹⁾

H. HOUARI ⁽²⁾

A. BALI ⁽³⁾

M. QUENEDEC ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Institut de Génie Civil
C.U. de Guelma
(Algérie)

⁽²⁾ Département de Génie Civil
Université Mentouri
Constantine (Algérie)

⁽³⁾ Département de Génie-Civil
Ecole Nationale Polytechnique
El Harrach Alger (Algérie)

⁽⁴⁾ Département de Génie Civil
L.T.R.M.C.
Université de Picardie-Jules
Verne, 80025 Amiens (France)

ملخص

خمسة أنواع من مخلفات صناعة المقالع مختلفة من حيث طبيعتها ومتقاربة من حيث نعومتها عولجت لتكوّن هيكلًا لخرسانة خفيفة عازلة. التخفيف والقدرة العازلة لهذه الخرسانة تمّ الحصول عليهما بدمج ركام (3-8 مم) من خشب داخل خليط الإسمنت البورتلاندي والمخلفات الصناعية الناعمة.

العمل المقدم في هذا البحث يلقي الضوء على مميزات هذه البقايا الصلبة ومدى تأثيرها على الخواص الميكانيكية، الحرارية والمائية للخرسانة الخفيفة المصنوعة من هذه المواد. النتائج التجريبية المتحصّل عليها قورنت ببعضها البعض و بعوامل المواد الإعتيادية المصنفة من طرف الهيئة العالمية لمخاير مواد البناء (RILEM).

كلمات المفتاح: المعادن الناعمة، مخلفات المقالع، الخرافة الخفيفة، السيرة الميكانيكية، التوصيل الحراري، التغيرات المقياسية.

L'industrie des granulats et celle du travail de la pierre génèrent des quantités importantes de déchets plus ou moins fins. Ces fines constituent bien souvent un problème pour l'environnement. Elles se présentent en effet, dans le cas d'une extraction à sec, sous forme de poussières qui, en raison de leur finesse, sont aisément transportées par les courants d'air et entraînent une pollution physique et esthétique de l'environnement. Les boues, comme celles de l'exploitation du granite, ont longtemps été "valorisées" par épandage. Dans la réglementation européenne, cette pratique n'est plus acceptée et la mise en décharge serait actuellement une des seules issues. Les boues argileuses provenant de l'exploitation de granulats alluvionnaires représentent dans certaines régions des gisements importants qui sont actuellement inexploités et rejetés dans des bassins de décantation.

C'est pourquoi, certains auteurs se sont penchés sur la valorisation de ces différentes fines. L'accent a été mis sur le caractère environnemental. En particulier, les techniques utilisées doivent être peu consommatrices d'énergie et non polluantes. Le coût énergétique des matériaux ajoutés doit rester faible. Les matériaux élaborés doivent être recyclables. Une étude a donc été menée pour transformer les fines minérales en matériaux isolants.

Nature des fines	Provenance	Minéralogie	Aspect initial
Granite	Déchets des travaux de sciage et de finition de surfaces de la roche massive. Recueillies dans le bassin de décantation de la carrière de Baillé (Morbihan, France).	- Quartz - Sillimanite - Orthoclase	Boues lisses au toucher, de couleur grisâtre.
Grès	Résidus d'exploitation des granulats par concassage. Extraits des granulats, après concassage par lavage intense à l'eau. Recueillies dans le bassin de décantation de la carrière de Fréhel (Côte d'Armor, France).	- Quartz - Illite (très peu)	Boues quartzitiques de couleur rosâtre.
Schiste	Résidus de concassage de la roche massive. Le procédé de séparation granulats concassés est un procédé à sec. Recueillis de la carrière des Lacs (Ille et Vilaine, France).	- Quartz - Pyrophyllite - Kaolinite (peu) - Halloysite (très peu)	Farines très fines et relativement homométriques, de couleur gris-verdâtre. Une séparation granulaire est déjà effectuée par l'exploitant.
Argile 1	Résultent de l'exploitation de placages de sables marins fossiles. Résidus de lavage des granulats. Recueillies dans le bassin de décantation de la carrière du Rheu (Ille et Vilaine, France).	- Kaolinite (principalement) - Quartz (peu) - Pyrophyllite et illite (très peu)	Boues de couleur brun clair contenant une portion d'environ 5 à 10 % de sable fin.
Argile 2	Résultent de l'exploitation d'une carrière de sable alluvionnaire. Recueillies dans le bassin de décantation de la carrière de Mohon (Morbihan, France).	- Quartz (~ 50%) - Kaolinite - Halloysite - Illite (peu)	Boues de couleur jaunâtre, rugueuses, contenant une proportion importante de sable (~ 50%).

Tableau 1: Provenance, aspect et minéralogie des fines.

Dans de précédents travaux [1,2], il a été montré la possibilité d'exploiter des fines minérales industrielles en les recyclant en bétons légers de construction, porteurs et non porteurs, selon la formulation. L'allègement peut être obtenu par:

- la création de cellules dans la pâte fine-ciment,
- l'addition dans la pâte de copeaux de bois non traités, provenant eux-mêmes de déchets d'exploitation de menuiserie.

Ces travaux ont montré qu'une étude plus approfondie des caractéristiques des fines était nécessaire pour apprécier leur influence sur les propriétés des bétons légers élaborés à partir de ces fines. C'est cette voie que nous avons choisie d'explorer. Après avoir caractérisé les fines utilisées, nous déterminerons et analyserons les principales caractéristiques des bétons élaborés.

FINES UTILISEES

Matière première

La provenance et l'aspect des fines avant leur traitement sont résumés dans le tableau 1.

Traitement

Pour cette étude, les résidus sous forme de boues ont dû subir un traitement afin de mieux maîtriser les teneurs en eau.

- *Séchage*: dans une étuve à ventilation à 105°C pendant 24 heures.

- *Broyage*: durant une période de 3 heures.
- *Tamissage*: par vibration électrique au tamis de maille $d = 1.25$ mm afin d'éliminer les différentes impuretés qui ont pu polluer le bassin de décantation.
- *Stockage*: en salle sèche (20°C et 50% d'humidité relative).

Nature minéralogique

Les fines étudiées sont constituées de plusieurs minéraux. Les principales phases minérales ont été identifiées qualitativement par diffraction des rayons X. Elles sont recensées dans le tableau 1. Notons que les espèces en proportions inférieures à 5% ne sont pas décelables.

Caractéristiques granulométriques

La distribution granulométrique a été déterminée par granulométrie laser (fig.1). Cette technique, basée sur une addition de diffraction et de réflexion d'un faisceau laser envoyé sur les particules, permet en effet de mesurer les dimensions des grains de 0.001 à 200 μm .

On peut distinguer globalement deux fuseaux de granulométrie:

- Le premier comprend les fines de schiste et de granite. Il a une étendue serrée avec des limites comprises entre 1 et 40 μm .
- Le second regroupe les fines restantes. Il a une étendue plus large avec des limites comprises entre 0.04 et 200 μm .

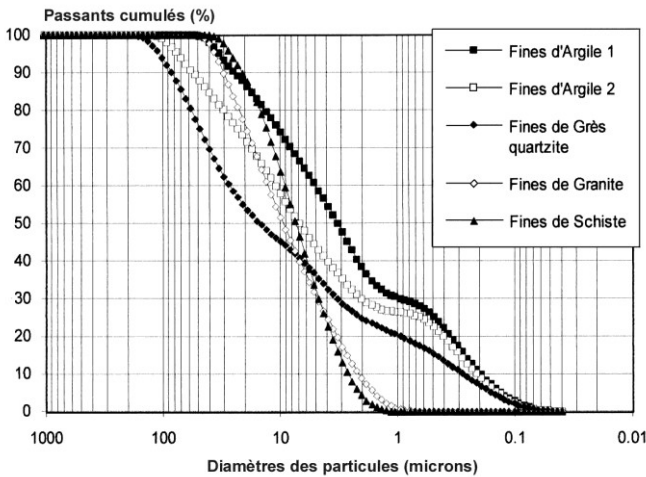


Figure 1 : Distribution granulométrique des fines minérales étudiées.

Densités et conductivités thermiques

Les mesures de densité sèche ont été effectuées par pycnométrie à l'eau. En raison de la granulométrie des fines, les mesures de volumes ont été relevées 24 heures après l'introduction des fines dans le pycnomètre, ceci pour permettre à l'eau d'occuper les vides intergranulaires et d'être éventuellement absorbée.

Les conductivités thermiques ont été déterminées par la technique TPS (Transient Plane Source) récemment développée par Bouguerra et al. [3]. Le principe de la méthode a été exposé par Horai et al. [4] et repose sur la détermination expérimentale de la conductivité thermique d'un mélange frais constitué de fines (en poudre) et d'eau. Connaissant la conductivité thermique de l'eau ($\lambda = 0.596$ W/m.K), celle des fines est évaluée à partir d'un modèle mathématique développé par Hashin et Shtrikman [5]. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 2.

Nature des fines	Masse volumique absolue (kg/m ³)	λ_{fine} (W/m.K)
Granite	2610	2.58
Grès	2640	4.72
Schiste	2800	3.76
Argile 1	2600	2.35
Argile 2	2620	3.61

Tableau 2 : Masses volumiques et conductivités thermiques des fines minérales.

On peut constater que les masses volumiques absolues sèches se situent entre 2 bornes correspondant aux valeurs obtenues pour les schistes et l'argile 1. Elles se situent toutes autour de 2600 kg/m³ exceptée celle du schiste. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Al Rim [6] ou communiqués par l'exploitant dans le cas du schiste.

Les coefficients de conductivité thermique sont, pour toutes les fines, supérieures à 2.3 W/m.K. Ils ne sont pas en relation directe avec la masse volumique absolue. On voit en particulier l'importance de la présence de quartz si l'on considère les 2 argiles étudiées. Toutefois, les granites, grès et schistes qui contiennent des proportions importantes de quartz présentent des valeurs très différentes de la

conductivité thermique. Le facteur morphologique est donc aussi à prendre à compte. Si l'on considère l'analyse granulométrique, on voit que le schiste et le granite présentent des répartitions granulométriques très voisines. Nous avons donc effectué une observation microscopique.

Morphologie

Le tableau 3 et les photos 1 à 5 décrivent l'aspect le plus fréquent observé par microscopie électronique à balayage sur les différentes fines.

Nature des fines	Aspect le plus fréquent
Granite	Gros grains anguleux de quartz couverts de fines particules de quelques μm de dimension. Les particules présentent, en grossissement 10.000, des stries ou un aspect lamellaire. Ce résultat conforte l'analyse minéralogique X.
Grès	Grains anguleux de quartz, de tailles variables, associées à des plaquettes de taille inférieure présentant un aspect feuilleté. Certains gros grains présentent, à un grossissement 2500 et plus, un aspect strié qui pourrait faire penser à des feldspaths. Ils sont également recouverts de plaquettes d'aspect lamellaire pouvant être constituées par des argiles d'altération de ces feldspaths.
Schiste	Exclusivement des agglomérats de plaquettes fragmentées, lamellaires et plus ou moins délitées.
Argile 1	Grande densité de feuillets de kaolinite plus ou moins "abîmés". Il s'agit d'argiles résiduelles dans un sable marin fossile. La détérioration des feuillets a pu se faire au cours du transport avant sédimentation ou au cours de l'exploitation lors du traitement du sable.
Argile 2	Grande densité de plaquettes de petite taille (<1 μm) disposées de façon aléatoire et formant des agglomérats sphériques de plus grande dimension dont le centre est probablement constitué de quartz..

Tableau 3 : Observation des fines en microscopie à électrons secondaires.

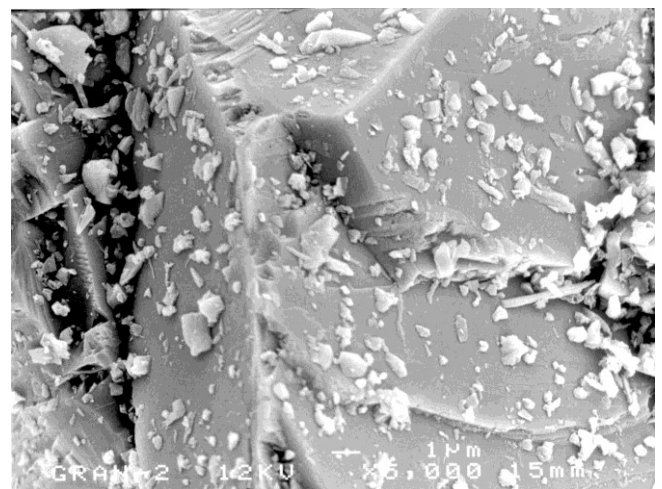


Photo 1 : Fines de granite (x5000). Grain de quartz recouvert de fines particules collées.



Photo 2 : Fines de grès (x5000). Texture anguleuse associée à des feuillets de très petites dimensions

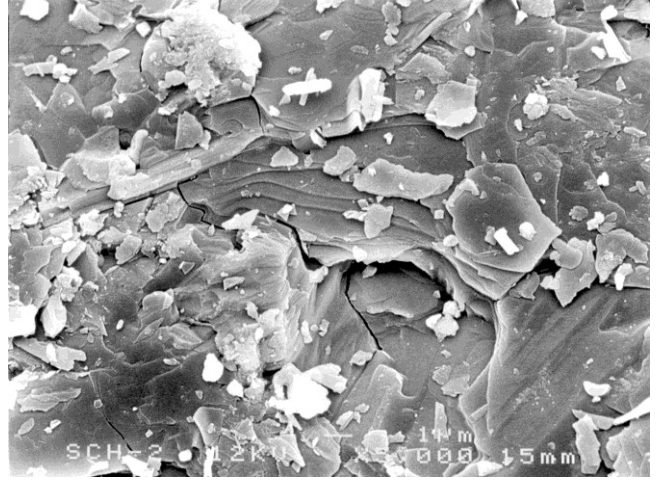


Photo 3 : Fines de schiste (x5000). Plaquettes de grandes dimensions.

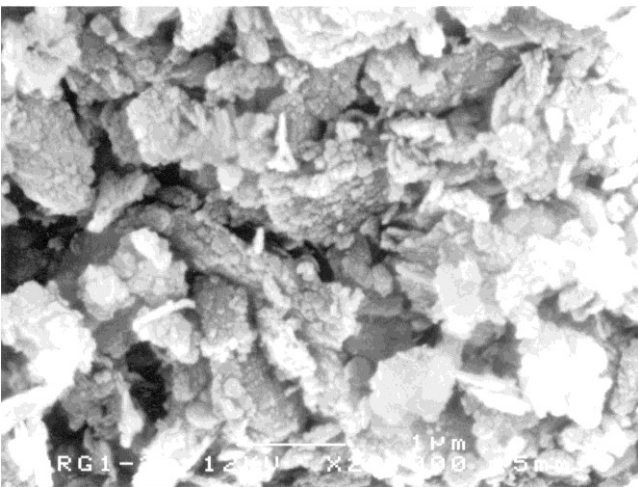


Photo 4 : Fines d'argile A1 (x20 000). Grande densité de feuillets de Kaolinite.

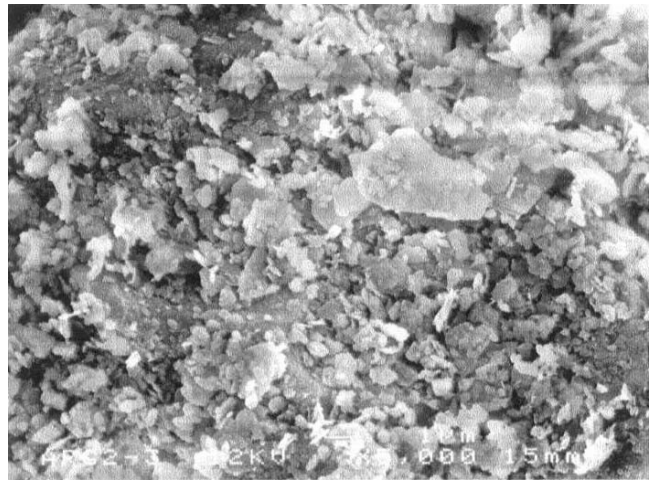


Photo 5 : Fines d'argile A2 (x5000). Agglomérats sphériques de petites dimensions.

FORMULATION DU BETON DE BOIS

Constituants

Outre les fines caractérisées précédemment, le béton de bois est élaboré à partir d'un ciment de type CPA-CEM I 52.5 (Norme EN 196 1) assurant la stabilisation et de granulats de bois assurant l'allègement.

Il s'agit dans ce travail d'étudier l'influence de la nature des fines utilisées. Nous avons donc, pour les granulats de bois, utilisé un produit déjà commercialisé (Agrelith C).

Ces granulats sont obtenus par traitement mécanique, thermique et physico-chimique de bois d'épicéa (Brevet Français N° 8102941) et sont qualifiés de granulats de bois minéralisés.

Ils présentent une structure macroporeuse tubulaire (Photo 6) qui explique leur faible masse volumique sèche apparente ($\rho_s = 165 \text{ kg/m}^3$).

Le calibrage effectué par le fabricant conduit à un granulat 3/8 ayant un coefficient de conductivité thermique $\lambda = 0.07 \text{ W/m.K}$ (Brevet Français N° 8102941).

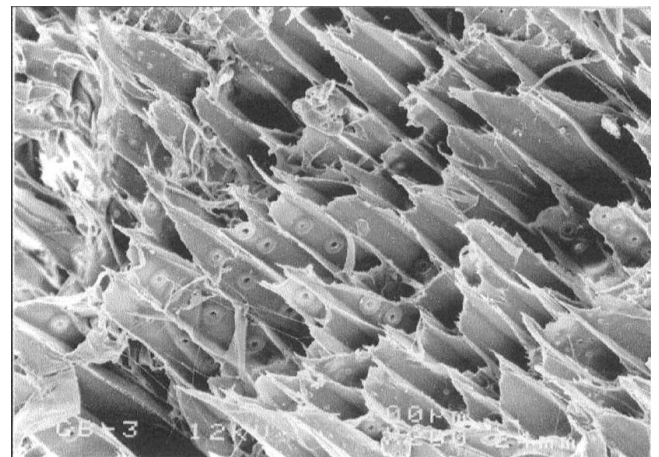


Photo 6 : Aspect général au MEB du granulat de bois stabilisé (x200).

Composition

Les composites élaborés dans ce travail ont tous la même répartition pondérale à sec. Seule la nature des fines diffère. Les proportions sont: 25% de ciment (C) + 50% de

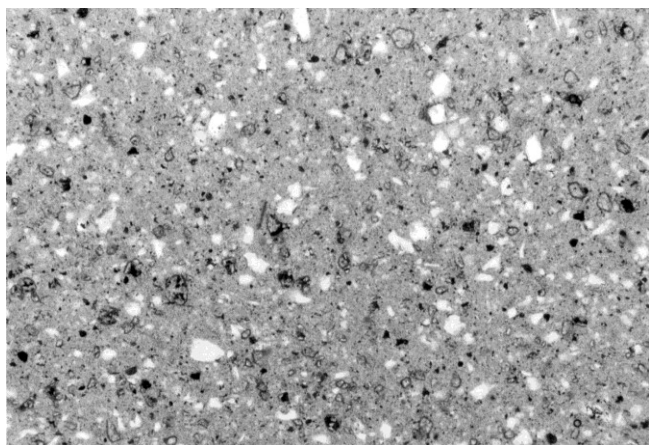


Photo 7: Microstructure de la matrice argile/ciment en microscopie optique.

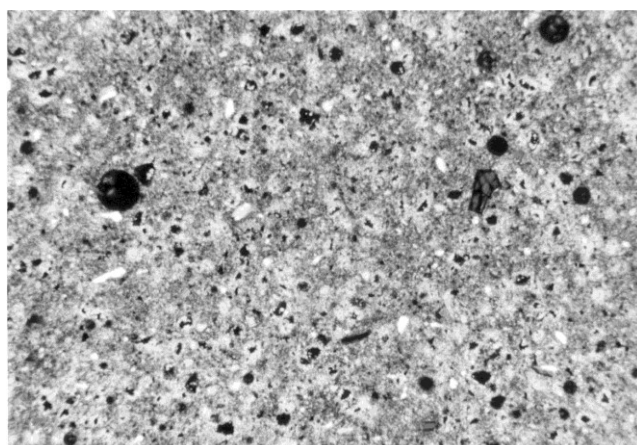


Photo 8: Microstructure de la matrice schiste / ciment en microscopie optique.

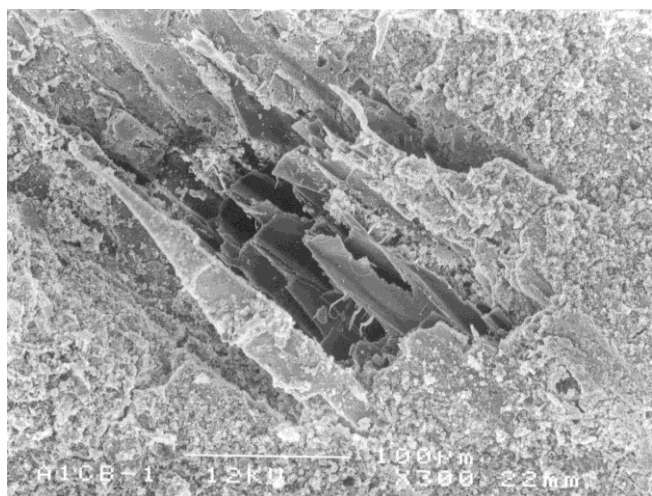


Photo 9: Adhérence matrice-granulat de bois. Cas du composite à matrice argileuse A1 (x300).

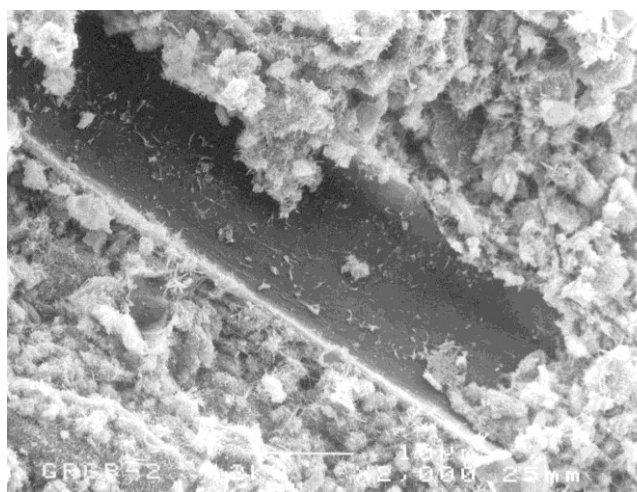


Photo 10: Adhérence matrice-granulat de bois. Cas du composite à matrice gréseuse (x2000).

fines minérales (F) + 25% de bois (B), soit un rapport constant F/C = 2.

La quantité de bois a été déterminée par Bouguerra [7] pour obtenir des densités correspondant aux valeurs cibles du programme européen FOREST [8].

La quantité d'eau ajoutée a été déterminée à l'aide de la formule générale empirique suivante [1]

$$E = W_c C + W_f F + W_b B \quad (1)$$

où W_c est un coefficient permettant d'obtenir une pâte de ciment de consistance normale.

$W_c = 0.35$ selon Moslemi [9] et Al Rim [1].

W_f est un coefficient relatif aux fines étudiées permettant d'obtenir une pâte fine-eau de consistance normale également. La détermination a été effectuée par les auteurs.

$W_f = 0.45$ pour les fines de granite, grès et schiste.

$W_f = 0.70$ pour les fines d'argile 1 et d'argile 2.

W_b est un coefficient relatif aux granulats de bois traités. Il correspond à l'absorption à refus des granulats de bois.

$W_b = 0.80$ [7].

Soit:

$$E = 0.35C + (0.45 \text{ ou } 0.70)F + 0.80B \quad (2)$$

Les mélanges sont ensuite versés dans les moules par coulage. Les éprouvettes sont conservées en salle humide ($\Theta = 20^\circ\text{C}$, HR = 90%) avant et après démoulage.

Il faut noter l'homogénéité des matrices élaborées (Photos 7 et 8) ainsi que la bonne adhérence des matrices minérales avec les granulats de bois (Photos 9 et 10).

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES

Masses volumiques et résistances mécaniques

Les masses volumiques sèches apparentes ont été déterminées par pesée et mesure des dimensions d'éprouvettes cubiques de 10 cm d'arête âgées de 28 jours et séchées à 105°C jusqu'à masse constante.

Les résistances à la compression à 28 jours sont obtenues par écrasement de 3 éprouvettes de même géométrie que les précédentes à la vitesse de chargement prévue par la norme NFP 18-406 pour le béton traditionnel. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

Il n'existe pas de corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique. A masse volumique égale, les composites confectionnés avec les fines de grès sont deux fois plus résistante que ceux confectionnés avec les fines d'argile 1.

Nature des fines	λ (W/m.K)		Masse volumique sèche (kg/m ³)	R_{c28} moyen (MPa)
	Etat saturé	Etat sec		
Granite	0.523	0.131	770	3.3
Grès	0.556	0.175	730	4.6
Schiste	0.625	0.198	920	4.8
Argile1	0.514	0.117	740	2.0
Argile2	0.522	0.117	700	2.2

Tableau 4: Conductivité thermique, masse volumique et résistance à la compression des bétons élaborés.

Par ailleurs, dans le cas des fines argileuses, la proportion de quartz ne semble pas jouer un rôle prépondérant. Une étude microstructurale, permettant d'identifier la structure poreuse, la cohésion de la matrice et d'apprécier l'adhérence matrice/granulats, sera donc nécessaire.

Remarquons que les bétons de bois élaborés s'apparentent du point de vue mécanique aux bétons légers de classe II (grès et schiste) ou III (granite, A₁ et A₂) de la classification fonctionnelle de la RILEM ⁽¹⁾ (1978) [10].

Caractéristiques thermiques

Les conductivités thermiques des matériaux consolidés sont déterminées par la technique de la sonde monotige à faible inertie thermique [11] à la température ambiante de 20°C aux états extrêmes de conservation:

- éprouvettes entièrement saturées d'eau par immersion,
- éprouvettes séchées à 105°C jusqu'à masse constante.

Les résultats sont regroupés dans le tableau 4.

A l'état sec, les valeurs de λ sont inférieures à 0.2 W/m.K quelle que soit la matrice. Le tableau 5 qui suit présente des valeurs de λ de certains matériaux légers de même usage. On voit qu'à densité égale les matériaux élaborés sont thermiquement compétitifs. Du point de vue de la RILEM, les bétons de bois élaborés sont tous classés matériaux isolants. Même si l'on peut noter une valeur légèrement supérieure pour le grès, les conductivités thermiques sont, à densité égale à l'état sec, peu influencées par la minéralogie. Il semblerait donc que le rôle des granulats de bois soit prépondérant.

Matériaux	Masse volumique apparente sèche (kg/m ³)	λ_{sec} (W/m.K)
Plâtre [1]	1060	0.36
Béton cellulaire autoclavé BCA 500 [1]	500	0.18
Béton de copeaux de bois (*)	700	0.16
BCA (*)	375 - 575 575 - 825	0.16 - 0.20 0.22 - 0.33
Béton de perlite ou vermiculite (*)	400 - 600 600 - 800	0.24 0.31
Béton d'argile expansée (*)	600 - 800 800 - 1000	0.25 0.33

Tableau 5 : Conductivité thermique de quelques matériaux légers de construction. (*): Règles DTU Françaises Th-K77.

A l'état saturé, l'influence est plus marquée et les conductivités thermiques ne suivent pas la loi de densité. Notons à ce sujet, que nous avons pu montrer par imagerie

RMN [7] que lors d'une saturation par capillarité dans le cas d'une matrice argile-ciment, l'eau se localisait dans la matrice et diffusait essentiellement dans les pores de faible dimension, les granulats de bois agissant comme coupure de capillarité. L'identification porométrique est en cours actuellement. Elle permettra d'expliquer l'influence de l'humidité sur les caractéristiques thermiques dans les états saturés ou non. Toutefois, l'état saturé n'est qu'un état extrême. En situation normale de fonctionnement, les échanges d'humidité se font essentiellement en phase vapeur avec l'atmosphère ambiante. Les isothermes de sorption-désorption établis dans le cas d'une matrice kaolinite-ciment montrent que dans les conditions normales d'usage, la quantité d'eau adsorbée est faible et ne modifie pas de façon significative les performances d'isolation.

Nous avons, par ailleurs, souligné dans un précédent papier [12] que la conductivité thermique des matériaux élaborés suit, à température ambiante, une évolution quasi-linéaire avec l'augmentation de la teneur en eau et ce, quelle que soit la matrice employée. Le phénomène d'évaporation-condensation signalé par Azizi [13] dans le cas des matériaux poreux humides non saturés n'apparaît pas encore à cette température.

Stabilité dimensionnelle

C'est un paramètre important qui peut affecter la durabilité des matériaux de construction en général. Le retrait et le gonflement sont des phénomènes susceptibles d'entraîner des dégradations. Les travaux réalisés par Ledhem [14] sur les variations dimensionnelles des bétons de bois à matrice argileuse et simulant différentes situations climatiques ont mis en évidence le caractère représentatif des variations dimensionnelles extrêmes (différence entre les dimensions à l'état sec et à l'état saturé) par rapport aux différents retraits et gonflements (fig.2). C'est en pratique, l'écart de situation le plus extrême que peut subir le matériau: passage d'un climat très sec et chaud à un contact accidentel avec l'eau liquide.

Dans ce travail, la stabilité dimensionnelle des bétons élaborés sera donc caractérisée par les variations dimensionnelles extrêmes. Plus celles-ci sont faibles et plus le matériau est stable.

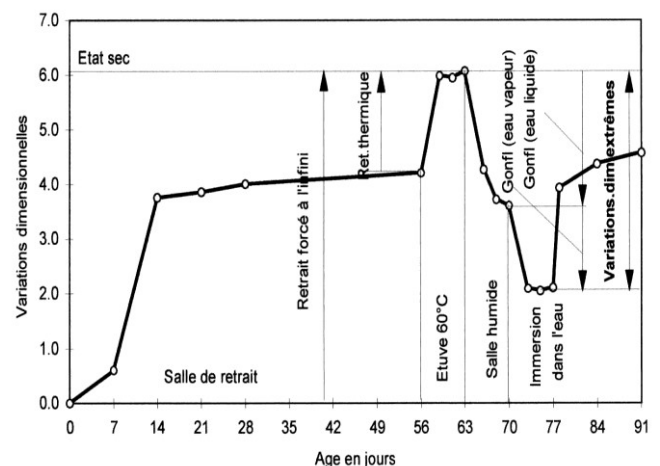


Figure 2 : Evolution type des variations dimensionnelles dans différentes ambiances, en fonction de l'âge, selon Ledhem [14].

⁽¹⁾Réunion Internationale des Laboratoires d'Etudes et essais sur les Matériaux.

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un rétractomètre à billes étalonné par une tige INVAR de 160 mm de longueur, sur des éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 cm³ munies de plots fixés à leurs extrémités et conservées dans une atmosphère non saturée (NF.P15433).

Les mesures à l'état sec ont été effectuées sur des éprouvettes séchées dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante, celles à l'état saturé sur les éprouvettes immergées dans l'eau distillée jusqu'à masse constante après conservation en atmosphère sèche (50% HR et 20°C) pendant 28 jours. On peut estimer qu'à cette date le retrait irréversible de constitution a pris fin. L'analyse des résultats présentés sur la figure 3 permet les observations suivantes:

- Les variations dimensionnelles extrêmes sont compatibles avec les valeurs obtenues pour les bétons de bois à matrice cimentaire [8]. Celles-ci varient, en général, entre 3 et 10 mm/m suivant la nature des granulats de bois et la masse volumique. Afin de les minimiser, Ledhem [15] propose d'autres types de traitement des granulats de bois: leur enrobage à l'aide de ciment CPA et chaux hydraulique naturelle (XHN), leur traitement à l'eau bouillante ou encore par leur imprégnation dans de l'huile de vidange usagée.
- Pour des masses volumiques voisines de 700 kg/m³, c'est le composite à base de grès qui paraît le plus stable. Les variations dimensionnelles extrêmes sont cependant toutes voisines de 5 mm/m excepté dans le cas de l'argile 1 où elle atteint 10.5 mm/m.

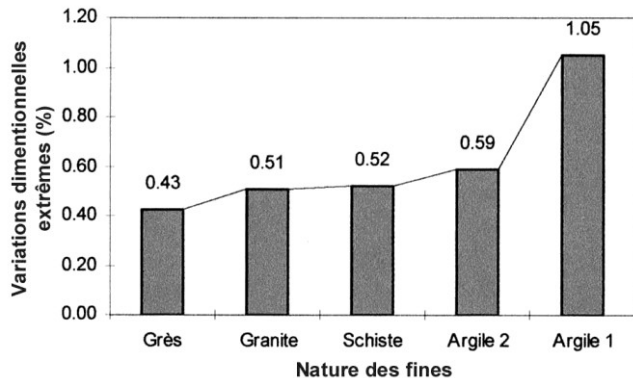


Figure 3 : Variations dimensionnelles extrêmes des bétons de bois élaborés.

La quantité de granulats de bois étant toujours la même, les différences observées semblent être imputables à la matrice. Plusieurs phénomènes sont à prendre en compte dans l'interaction entre la matrice et l'eau liquide. Il faut tenir compte en particulier de la cohésion de la matrice et de sa rigidité qui peut entraîner une plus grande déformabilité. La cohésion de la matrice est liée à la microporosité consécutive au départ de l'excès d'eau de gâchage et au développement du gel de ciment lors de l'hydratation. Nous ne tiendrons pas compte ici des réactions kaolinite-ciment [16, 17, 18 et 19] qui prennent naissance à des temps plus longs. La rigidité dépend à la fois de la nature minéralogique des fines, de leur répartition et de leur adhérence avec le gel de ciment hydraté.

Nous n'avons pas, dans cette étude, suffisamment d'éléments microstructuraux pour expliciter les phénomènes. Toutefois, on peut déjà constater l'importance du quartz. En effet, la différence essentielle entre les argiles 1 et 2 est la présence plus ou moins importante de quartz. De même, les grès, granite et schiste sont très riches en quartz, le grès étant pratiquement du quartz à l'état pur.

On peut enfin remarquer qu'à l'exception du composite à base de schiste, il existe une corrélation avec les résistances mécaniques à la compression. Les variations dimensionnelles importantes correspondent à des résistances mécaniques faibles. Ceci montre bien l'influence de la rigidité de la matrice.

CONCLUSION

Cette étude est une contribution à la mise au point d'isolants à haute qualité environnementale. Les bétons de bois étudiés dans ce travail permettent la valorisation de résidus d'exploitation de carrières à travers leur substitution au sable. Les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques sont comparables à celles des bétons de bois usuels. La quantité de stabilisant reste faible (< 250 kg/m³) pour des résistances en compression compatibles avec une utilisation en isolant ou isolant porteur. Les performances mécaniques dépendent toutefois des caractéristiques des fines. La nature de la matrice est également primordiale pour la stabilité dimensionnelle du composite. Par contre, il semblerait que les performances thermiques soient essentiellement conditionnées par les inclusions de bois.

REFERENCES

- [1]- Al Rim K., Ruzicka M., Le Garrec M.J., et Queneudec M., "Valorisation de fines minérales industrielles", *Revue Déchets, Sciences et techniques*, N°1, Jan-fév (1996), pp. 37-40.
- [2]- Queneudec M., Le Garrec M.J., Al Rim K., and Bouguerra, A., "The recycling of solid industrial waste: the lightweight fine concretes", Proceedings of the international conference, University of Dundee, Scotland, UK. 24-26 June (1996), pp. 697-705.
- [3]- Bouguerra A., Laurent JP., Goual MS., and Queneudec M., "The measurement of the thermal conductivity of solid aggregates using the TPS technique", *J. Phys D: Appl. Phys.*, 30 (1997), pp. 2900-2904.
- [4]- Horai K., and Baldrige S., "Thermal conductivity of nineteen igneous rocks, I.: Application of the needle probe method to the measurement of the thermal conductivity of rock", *Phys Earth Planet. Interiors*, 5 (1972), pp. 151-156.
- [5]- Hashin Z., and Shtrikman S., "A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials", *J. Appl. Phys.*, 33, N°10 (1962), pp. 3125-3131.
- [6]- Al Rim K., "Le béton argileux léger. Généralisation à d'autres fines de roches et applications à la conception d'éléments de constructions préfabriqués", Thèse de doctorat de l'université de Rennes (1995), France.
- [7]- Bouguerra A., "Contribution à l'étude d'un procédé de valorisation de déchets argileux: Comportement hygrothermique des matériaux élaborés", Thèse de doctorat de l'I.N.S.A. de Lyon (1997), France.

- [8]- Piementa P., Chandellier J., Rubaud M., Dutruel F. et Nicole H., "Etude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois", *Cahier du centre scientifique et technique du bâtiment*, N°2703 (1994).
- [9]- Moslemi A.A., and Pfister S.C., "The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensionnel stability of wood-cement composite panels", *Wood and fiber science*, 19, N°2 (1987), pp. 165-175.
- [10]- RILEM. CPC LC2, *Revue Materials and structures*, N°11 (1978), p. 61.
- [11]- Laurent J.P., "Evaluation des paramètres thermiques d'un milieu poreux, optimisation d'outils de mesure in situ", *Int. Journal of heat and mass transfer*, 32, N°7 (1989), pp. 1247-1259.
- [12]- Benmalek M.L., Bali A., Bouguerra A., Goual M.S. and Queneudec M., "The effect of moisture content and temperature on thermal conductivity of lightweight environmental concrete. Exploiting wastes in concrete", Proceedings of the international conference, University of Dundee, Scotland, UK. 6-10 september (1999).
- [13]- Azizi S., "Conductivité thermique des matériaux poreux humides: Mesure par méthode flash et interprétation", Thèse de doctorat de l'INPL. 230 pages (1988), France.
- [14]- Ledhem A., "Contribution à l'étude d'un béton de bois. Mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile - ciment - bois", Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon (1997), France.
- [15]- Ledhem A., Bouguerra A., Dheilily R.M. and Queneudec M., "Simple treatments to reduce the sensitivity to water of clayey concretes lightened by wood aggregates. Exploiting wastes in concrete", Proceedings of the international conference. University of Dundee, Scotland, UK. 6-10 september (1999).
- [16]- Herzog A., and Mitchel J.K., "Reaction accompanying stabilization of clay with cement. Cement - treated soil mixtures", Highway research record N°36, Highway research board of the national research council, Washington (1963).
- [17]- Chieh Moh Z.A., "Reactions of soil minerals with cement and chemicals. Soil-cement stabilization", Highway research record N°6, National Academy of Sciences, Washington (1965).
- [18]- Mitchel J.M. and El Jack S.A., "The fabric of soil-cement and its formation. Clays and clay minerals", Proceedings of the fourteenth national conference, Berkeley, California (1966).
- [19]- Ingles O.G. and Metcalf J.B., Soil stabilization. Butter worths, Australia (1972). □