

# VALORISATION DE FINES MINÉRALES INDUSTRIELLES

K. Al-Rim, M. Ruzicka, M.-J. Le Garrec, M. Quéneudec\*

Groupe Physique Environnement - Équipe Gestion Technique du Bâti - IUT-Département Génie Civil

Les fines résultant d'un grand nombre de carrières de granulats, d'exploitation de minerais ou de l'industrie de la pierre ne sont pas exploitées actuellement et leur stockage présente souvent une gêne. De nouvelles techniques ont été développées par les auteurs pour recycler ces déchets sous forme d'éléments de construction.

Cette étude concerne les possibilités d'allègement de mélanges fines-ciment. Après avoir exposé les méthodes utilisées, les auteurs présentent une synthèse d'une étude expérimentale concernant les fines de plusieurs roches différentes par leur granulométrie et leur nature minéralogique. Les propriétés mécaniques et thermiques sont comparées à celles de matériaux usuels tels que le plâtre et le Béton Cellulaire Autoclavé.

The fillers resulting from a large number of aggregates quarries, from mining exploitation or from stone industries are not really used at the present time. New technologies have been developed to recycle this waste by making building units.

This study deals with the weight-reduction possibilities of cement-fillers mixtures. The authors present a synthesis of an experimental study about fillers of several rocks different by their grading analysis and mineralogical nature. The mechanical and thermal properties are compared with the ones of usual materials like plaster and Autoclaved Aerated Concrete.

L'exploitation de minerais, de granulats alluvionnaires ou de concassage, les industries de la pierre, laissent des quantités considérables de déchets plus ou moins fins, actuellement inexploités et qui sont parfois même une gêne importante pour l'environnement. Les fines qui intéressent ce travail ont sauf exception un diamètre équivalent maximum de 500  $\mu\text{m}$  et en tous les cas inférieur à 1000  $\mu\text{m}$ . Pour la quasi-majorité des fines, le passant à 100  $\mu\text{m}$  est  $\geq 85\%$  et la limite granulométrique est donc très différente de celle des granulats utilisés dans les bétons de sable.

L'objectif proposé dans cette étude était l'élaboration de bétons légers de densité  $0,8 < d < 1,2$ , s'apparentant aux bétons légers de classe II et/ou III conformément à la clas-

sification fonctionnelle de la RILEM<sup>[1]</sup>. Le choix a été fait d'une technologie simplifiée, mise en moule par coulage, sans traitement thermique, la quantité de stabilisant restant dans les limites préconisées pour les bétons de sable (250 à 450  $\text{kg/m}^3$ ) ou les bétons de bois (300 à 400  $\text{kg/m}^3$ ).

## NATURE ET CARACTÉRISATION DES FINES

La notion de mouillage par un liquide est toujours difficile à chiffrer et est liée aux caractéristiques des granulats comme à celles du liquide. Nous avons donc pris comme critère principal l'ouvrabilité qui variera avec la nature des constituants, la composition du mélange et les caractéristiques granulométriques. La quantité d'eau  $W_f$  nécessaire à l'obtention d'une pâte à consistance « normale » ( $f = 1850 \text{ Pa}$ ) a donc été déterminée pour chacune des fines (Cf. tableau I). De plus, les résidus d'exploitation ont été caractérisés par leur granulométrie (Cf. Figure 1), et leur masse volumique (Cf. tableau I). Ce travail s'est intéressé à des fines de différentes natures minéralogiques.

### Argiles

– la première ( $A_1$ ) provient de l'exploitation d'un paléosol ferrallitique de l'ère tertiaire, remanié. Il s'agit d'un sol sablo-graveleux contenant des blocs de quartz rubéfiés et de grès ferrugineux. Le paléosol tout venant est tamisé en carrière, par voie humide. Les graviers et sables sont commercialisés tandis que la fraction fine, jusqu'à présent inutilisée, est rejetée au fond d'anciens lieux d'extraction. Ces fines sont des kaolinites<sup>[2,3]</sup>.

– la seconde ( $A_2$ ) résulte de l'exploitation de placages de sables marins fossiles de la fin de l'ère tertiaire et est également constituée de kaolinite. Elle contient un faible pourcentage (5 %) de sable.

Tableau I : Caractéristique physique des fines étudiées

Fines	$\rho_{app}$	$\rho_{abs}$	$W_f$ [%]
$A_1$	0,62	2,65	48
$A_2$	0,94	2,60	40
$S_i$ :			
$S_{i,500}$	1,05	2,79	25
$S_{i,RS}$	0,76	2,79	35
$S_{i,50}$	0,55	2,74	50
$S_2$	0,98	2,73	35
G	0,87	2,64	40
GQ	1,17	2,62	35
GN	1,00	2,67	30

Rappelons que la séparation de la fraction argileuse par l'exploitant se fait, dans les deux cas, par lavage avec addition de floculant. Ceci revient certainement à surestimer la fraction limoneuse déduite de la courbe granulométrique.

**Schistes**

– Ce sont d'une part des résidus de concassage de schistes briovériens ayant subi un léger métamorphisme général (S<sub>1</sub>). Ce sont des éléments en paillettes restant après prélèvement de la fraction granulométrique correspondant aux sables et gravillons. Les résidus étudiés dans ce travail correspondent à des étendues et des limites granulométriques différentes comme le montrent les courbes granulométriques données dans les figures 1a et 1b.

– Ce sont d'autre part des résidus de schistes tachetés (S<sub>2</sub>). Ces schistes, en raison de la proximité d'un massif granitique, ont subi un métamorphisme de contact qui est à l'origine de la cristallisation d'aiguilles d'andalousite (silicate d'alumine) de dimensions exceptionnelles (pluricentimétriques). Ce sont ces cristaux d'andalousite, extraits du schiste après broyage, qui intéressent l'exploitant pour la fabrication de matériaux réfractaires. La quantité de coproduits actuellement inexploités est donc très importante.

**Granites (G)**

L'exploitation des granites génère de grandes quantités de déchets résultant essentiellement de travaux de sciage et de

finitions de surface. Ils contiennent outre les composants de la roche, feldspaths, micas, quartz, des poussières diamantées, des abrasifs divers, éventuellement des huiles et des floculants.

**Grès quartzites (GQ)**

Ce sont des résidus d'exploitation de granulats par concassage et ils contiennent essentiellement du quartz et quelques muscovites.

**Gneiss (GN)**

Ce sont également des résidus d'exploitation des granulats. Les gros éléments sont commercialisés et utilisés spécialement pour des usages routiers. Ce sont les résultats des traitements mécaniques (concassage et tamisage), composés essentiellement de quartz, feldspaths et micas, qui ont fait l'objet de ce travail.

Notons que dans l'ensemble, si l'on excepte les argiles, la fraction de grains inférieure à 2 µm est quasi inexistante et que ces résidus constituent un matériau granulaire manquant de cohésion et de plasticité.

**TECHNIQUES D'ALLÈGEMENT**

Les deux types de bétons légers : bétons cellulaires et bétons de granulats légers ont été étudiés dans ce travail. Dans toute cette étude, la stabilisation a été réalisée à froid par du ciment CPA55 (NF-P 15301-1981).

**Bétons cellulaires**

Le but du procédé est la formation de bulles de gaz à l'intérieur du matériau frais grâce à l'addition de produits chimiques ou biochimiques en faible quantité. Il existe de nombreux procédés<sup>[4,5]</sup>, nous en avons choisi deux.

**Utilisation de poudres d'Aluminium**

Les poudres d'Aluminium utilisées ont une densité apparente égale à 0,2 et leur ajout a le même effet que dans le béton cellulaire classique : dégagement de bulles d'hydrogène par réaction avec la chaux. Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer le phénomène de production d'hydrogène<sup>[6,7]</sup>. Dans le cas du ciment, la réaction avec l'aluminium se fait en particulier grâce à la chaux libérée lors de l'hydratation.

A titre d'exemple nous donnons dans la figure 2 l'évolution de la densité dans le cas de l'argile A1.

**Utilisation d'un entraîneur d'air**

L'entraîneur d'air utilisé dans ce travail est constitué de poudre d'hémoglobine animale. L'utilisation du sang, dans la construction, remonte d'ailleurs à des temps très anciens, acte rituel en apparence, mais en fait, permettant d'améliorer l'ouvrabilité et l'imperméabilité des matériaux<sup>[8]</sup>. En effet, le sang est un entraîneur d'air puissant grâce au mécanisme d'échange de l'hémoglobine. Une faible quantité de sang en poudre comprise entre 0,2 et 1 % de la masse de ciment suffit pour entraîner entre 5 à 25 % d'air dans un mortier normal. Nous donnons dans la figure 3 à titre d'exemple de l'effet de ce vecteur d'allègement, l'évolution de la densité pour

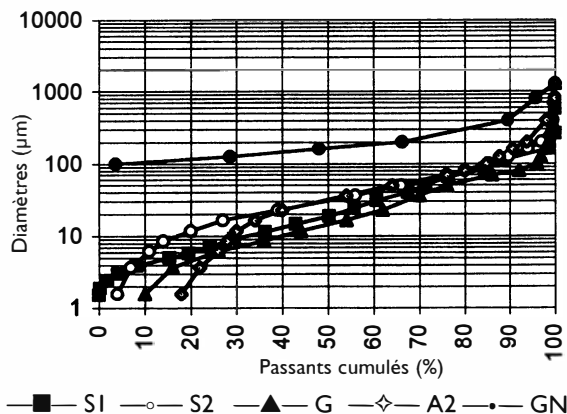


Figure 1a : Analyse granulométrique de fines

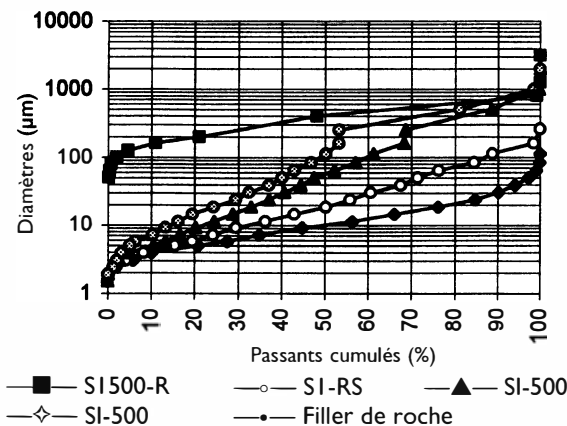
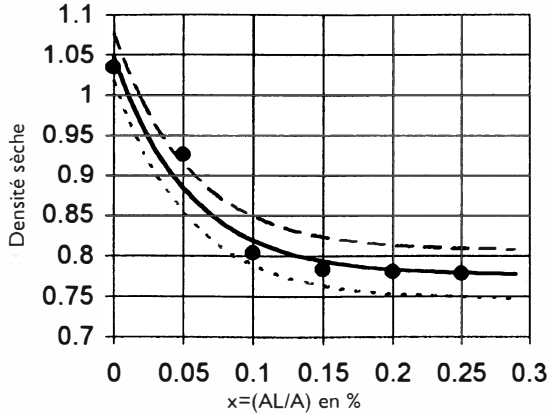


Figure 1b : Analyse granulométrique de fines



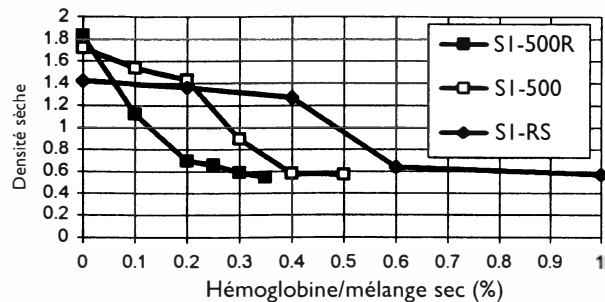
• Valeurs expérimentales  
 — Courbe de régression :  $d=0,271 \text{ EXP}(-x/0,054)+0,776$  avec  $r = 0,979$   
 - - Plus erreur de 3,87 % pour un seuil de confiance de 95 %  
 ... Moins erreur de 3,87 % pour un seuil de confiance de 95 %

**Figure 2 : Influence de la poudre d'aluminium sur la densité sèche**

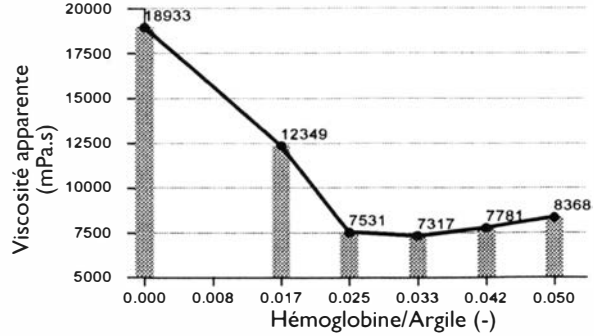
des schistes l de granulométries différentes. Toutefois, la proportion et la taille des bulles d'air ainsi que les propriétés à l'état frais dépendent de plusieurs facteurs tels que la granulométrie des fines<sup>[9]</sup>, la quantité de poudre d'hémoglobine<sup>[9 à 12]</sup>, des paramètres de malaxage<sup>[9]</sup> mais aussi de la présence ou non de ciment. Nous donnons ici un exemple de la viscosité mesurée pour une fine argileuse A<sub>1</sub> avec ou sans ciment (Cf. figure 4).

**Bétons de granulats légers**

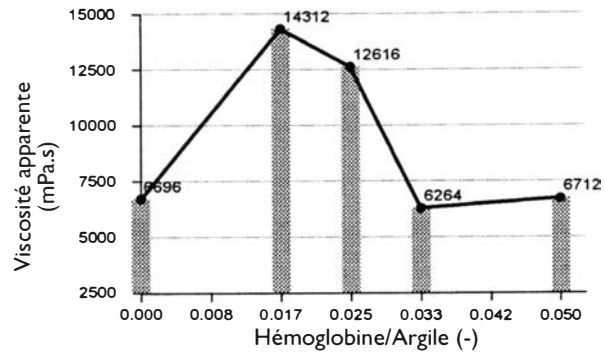
Le principe du procédé est l'emploi des copeaux de bois en tant que granulats de faible densité. Des granulats de bois ont déjà été utilisés comme granulats légers dans des bétons hydrauliques afin d'obtenir des matériaux à haute performance thermique. Ces granulats proviennent en général de bois non exploitables découpés, broyés et traités<sup>[13]</sup>. Dans le cas de cette étude, les granulats utilisés sont des déchets de menuiserie et on peut apprécier la répartition comme suit : 60 % de sapin du Nord et 40 % de bois exotiques. La densité réelle d'un tel mélange dont l'humidité naturelle est voisine de 10 % est de l'ordre de 0,55. L'absorption d'eau exprimée par le rapport massique Eau/Copeaux (E/Cop) est comprise entre 1,5 et 2.



**Fig. 3 : Variation de la densité sèche de matériau de schistes en fonction du pourcentage ajouté en hémoglobine pour trois granulométries différentes.**



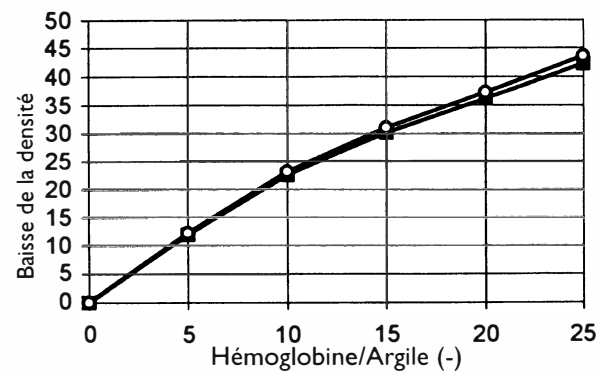
**Figure 4a : Influence du dosage en hémoglobine sur la viscosité apparente ; composition : C/A = 0,25, E/A = 0,75 (C = ciment, A = argile, E = eau)**



**Figure 4b : Influence de l'hémoglobine sur la viscosité apparente en absence du ciment ; composition : E/A = 0,75, C/A = 0,0**

Nous avons, comme précédemment, pour l'allègement par poudres d'aluminium, cherché, dans le cadre de cette étude, à minimiser le prix de revient d'un tel matériau en évitant tout traitement des copeaux. Ce composite est un matériau très compétitif puisque ne nécessitant aucune technique élaborée de fabrication et peu consommateur d'énergie, puisque fabriqué à cru et mis en place par coulage. Seule est à prendre en compte l'énergie de malaxage. En outre, cette technique permet de valoriser les déchets de deux filières industrielles : l'industrie des granulats alluvionnaires ou concassés et celle du bois.

Nous donnons, dans la figure 5, pour illustrer les possibili-



**Figure 5 : Évolution de la baisse moyenne de densité pour différents teneurs en eau.**

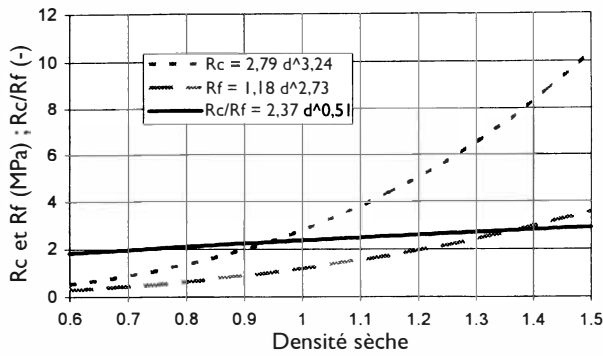


Figure 6 : Résistance à la compression (Rc) et à la traction (Rf) en fonction de la densité sèche

tés d'allègement par cette technique, l'évolution de la baisse moyenne de densité pour différentes teneurs en copeaux, toutes natures minéralogiques confondues.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Dans cette étude la quantité de ciment a été fixée à 20 % de la masse sèche. La quantité d'eau de gâchage peut être déterminée à partir de la formule empirique<sup>[10]</sup>

$$E = 0,35C + W_F + (1,5 \text{ à } 1,8) \text{ Cop}$$

où E, C, F et Cop sont des pourcentages massiques (E = eau, C = ciment, F = fines, Cop = copeaux). WF est la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une pâte (fine-ciment) de consistance normale.

Sur la figure 6, nous avons représenté les courbes moyennes des résistances mécaniques pour l'ensemble des points expérimentaux. Pour une densité > 1,1 nous avons toujours une densité  $\sigma_c > 2,5$  MPa suffisante pour la fabrication de blocs pleins isolants. Des résistances supérieures peuvent être obtenues pour des densités plus élevées mais nous sortons ici du champ de nos investigations.

CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES

Les caractéristiques thermiques ont été étudiées sur des blocs de dimensions 7 cm x 25 cm x 50 cm par la méthode de<sup>[14,15]</sup> en fonction de la technique d'allègement et de la nature minéralogique des fines. Les résultats sont reportés dans le tableau 2.

On peut constater qu'à densité voisine les résistances thermiques des composites étudiés sont nettement supérieures à celles des plâtres. De même, leur faible diffusivité et leur

**Tableau 2 : Caractéristiques thermiques de blocs 7 x 25 x 50 cm.**

Allègement	Matériau	w	d	$\lambda$ W/mK	R m <sup>2</sup> K/W	B kWs/m <sup>2</sup> K	A ks
	Aluminium		0,85	0,23	0,30	50	15
	Entraîneur d'air Argile A <sub>1</sub>	~1 %	0,78	0,21	0,33	47	15
	Copeaux		0,80	0,19	0,36	57	21
	Copeaux Argile A <sub>2</sub>	0,64	1,05	0,26	0,27	65	17
	Granite	0,45	1,03	0,24	0,30	59	17
	Schistes S <sub>2</sub>	0,53	1,07	0,29	0,24	62	15
	Plâtre	0	1,06	0,36	0,19	71	14
	BCA 500	0	0,50	0,18	0,39	35	14

inertie thermique, en font des matériaux intéressants du point de vue du confort thermique. Notons à ce sujet qu'un BCA de masse volumique 500 kg/m<sup>3</sup> a une résistance thermique supérieure (R=0,40 m<sup>2</sup>K/W) mais une inertie inférieure (A = 14 K. s au lieu de 17).

CONCLUSION

Les résultats expérimentaux montrent la possibilité technique de concevoir des matériaux performants à partir de résidus d'exploitation, sans consommation importante d'énergie. La comparaison avec des matériaux couramment utilisés est favorable. Toutefois, un certain nombre de caractéristiques des fines (granulométrie, surface spécifique, nature minéralogique) sont à prendre en compte dans une étude plus approfondie des propriétés de ces matériaux et dans l'élaboration de modèles correspondants.

Remerciements : nous remercions l'Ademe Bretagne et spécialement M. Danvert pour son aide.

\* K. Al-Rim, M. Ruzicka, M.-J. Le Garrec, M. Quéneudec  
Groupe Physique Environnement - Équipe Gestion Technique du Bâti - IUT-Département Génie Civil - Rue du Clos Courtel-BP 1144-35014 Rennes Cedex

Bibliographie

[1] Rilem. CPC LC2 Materials and Structures, 1978, 11, p. 61  
 [2] J. Esteoule-Choux. Contribution à l'étude des argiles du Massif Armorica. Thèse de doctorat, 1970, Rennes.  
 [3] A. Jigorel. Connaissance et restauration de l'habitat en terre. Comptes Rendus du Colloque 10-11 Avril 1990, Montfort sur Meu, Ille-et-Vilaine.  
 [4] K.J. Goudwin. Béton cellulaire obtenu par les gaz d'azote. Actes du Congrès - Western Regional Meeting, CA, USA, 20 Mars 1991, 269-76  
 [5] M. Venuat. La pratique des ciments, mortiers et bétons. Tome 1, Édition du Moniteur, 1989, 2e Édition, p. 261-263  
 [6] R. Pigache. Étude et réalisation d'un béton cellulaire autoclavé à base de loess. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle de géologie appliquée. Université des Sciences et Technologie, 1978, Lille.  
 [7] L. Guillaume. La poudre d'aluminium et les matériaux cellulaires. Revue Aluminium - applications, 1973, n° 422, 555-65.  
 [8] M. Venuat. Utilisation du sang animal dans les mortiers et bétons. Revue du Moniteur, 3 Mars 1980.  
 [9] M. Ruzicka, D. Lorin, M. Quéneudec. Some aspects of fresh clay-cement mixes foamed by a biological agent. Production methods and workability of concrete, Paisley/Glasgow, Scotland, U.K., 3-5 Juin 1996, A paraître.  
 [10] K. Al-Rim. Le béton argileux léger, Généralisation à d'autres fines de roche et applications à la conception d'éléments de Construction préfabriqués. Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes I, 1995 Rennes.  
 [11] K. Al-Rim, M.A. Morbeville, M. Quéneudec. Influence de l'addition d'un entraîneur d'air protéinique sur un mélange d'argile-ciment. Revue Internationale d'Héliotechnique, 1994, n° 9, nouvelle série, 26-36.  
 [12] K. Al-Rim, M. Ruzicka, M. Quéneudec. The effect of a biological air entraining agent on clay cement mixtures. Proceedings of ConChem International Conference, Bruxelles, 28-30 Novembre 1995  
 [13] P. Pimienta, J. Chandellier, M. Rubaud, F. Dutruel, H. Nicole. Étude de faisabilité des procédés de construction à base de bétons de bois. Cahiers du CSTB 2703, Janv.-Fev. 1994.  
 [14] G. Bastian. Détermination des caractéristiques thermophysiques de matériau de construction par la méthode de la sonde plane en régime transitoire et asymptotique. Rev. Phys. Appl. 22, 1987, 431-444.  
 [15] N. Alcheik, J. Miriel, J. Schmouker. Mesure par choc thermique des paramètres thermophysiques de la « Bauge » - Amélioration de la mesure par l'utilisation de fluxmètre. Rencontres Universitaires de Génie Civil, ENS Cachan, 14-15 Mai 1992.