

VALORISATION DE FINES MINÉRALES INDUSTRIELLES CAS DE RÉSIDUS SCHISTEUX DE CONCASSAGE

Kamal Alrim*, Martin Ruzicka**, Rose-Marie Dheilly***, Ahmed Bouguerra***, Michèle Queneudec****

* Université de Lattaquié (Syrie), ** GPE Université de Rennes II/Université technique de Prague, *** GPE Université de Rennes I,

****Équipe CEPS Co. Université de Picardie - Institut universitaire de technologie

Les fines résultant du concassage de roches massives sont actuellement peu exploitées. Ce travail concerne les résidus de concassage de schistes briovériens. L'idée développée est leur valorisation sous forme de matériaux isolants. L'allègement a été obtenu par création d'une structure cellulaire grâce à un entraîneur d'air et par addition de granulats de bois. Différentes distributions granulaires ont pu être étudiées. L'analyse des performances mécaniques montre la possibilité d'un développement de ces matériaux sans séparation granulométrique.

Crushing rocks give fillers which are not really used at the present time. This study deals with the crushing waste of brioverian schists. The idea developed here is the recycling by making insulating materials. The weight reduction has been made by two means : by the creation of cells by an air entraining agent and by the addition of wood aggregates. Several granulometric gradations have been studied. The analysis of mechanical strength have shown a possible development without a separation in granular classes

Des études antérieures ont montré la possibilité de valoriser des fines argileuses par transformation en bétons légers isolants ou isolants porteurs^[1 à 12]. Deux types d'allègement ont été développés : par granulats légers ou par création d'une macroporosité dans la pâte argile - ciment fraîche. Dans le dernier cas la structure cellulaire a pu être obtenue par réaction chimique dans la masse ou par entraînement d'air. Dans tous les cas les impératifs restent ceux de la mise au point de matériaux à faible impact environnemental à savoir tout particulièrement peu de consommation énergétique, et l'utilisation maximum de déchets. Ces techniques ont pu être étendues à des fines de natures minéralogiques différentes et des lois générales des caractéristiques mécaniques ont pu être proposées dans le cas d'un allègement par granulats de bois^[13 à 16]. Dans ce travail nous présentons le cas de fines schisteuses. L'allègement a été effectué par deux techniques : addition de granulats légers et entraînement d'air. Nous comparerons les performances mécaniques, à densité égale, des matériaux obtenus par les deux techniques.

MATÉRIAUX ÉTUDIÉS

Les résidus schisteux sont issus du concassage de schistes briovériens. Ce sont des éléments en plaquettes subsistant après prélèvement de la fraction granulométrique correspondant aux sables et gravillons. Quatre classes dont les répartitions granulométriques sont reportées en figure 1 ont été étudiées.

Le S_{RS} présente un passant cumulé de 99 % pour $\phi = 160 \mu\text{m}$, le S₅₀₀ a une granulométrie relativement étendue et une limite granulaire supérieure de $500 \mu\text{m}$. Le S_{500R} est le résultat d'un retamissage de la classe 500 amenant la limite granulaire inférieure à $100 \mu\text{m}$ environ. Les répartitions granulométriques des S_{RS} et S_{500R} encadrent donc celle du S₅₀₀. Le S₅₀ a une limite granulaire supérieure égale à $50 \mu\text{m}$. Dans tous les cas la fraction inférieure à $2 \mu\text{m}$ est quasi inexistante et ces résidus minéraux constituent un matériau granulaire manquant de cohésion et de plasticité. La masse volumique absolue est égale à $2,76 \text{ g/cm}^3$.

- Le ciment est un CPA CEM I/52,5 (EN 196-1).
- L'entraîneur d'air est lui-même un rejet industriel valorisé. Il s'agit d'hémoglobine de bœuf traitée (EP 0-171-480-A₁). Il entre dans la catégorie des entraîneurs d'air protéiniques.
- Les granulats de bois sont des copeaux, résidus de travaux de menuiserie et constitués à 60 % par du Sapin du Nord et à 40 % par des essences exotiques.
- L'entraînement d'air dépend de nombreux facteurs et en

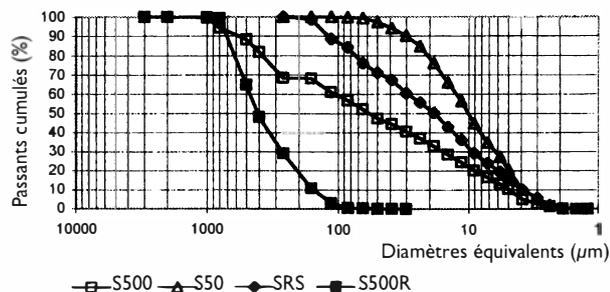


Figure 1 : Analyse granulométrique des différentes fines

particulier de la consistance de la pâte [6 et 7]. De même le malaxage en présence de copeaux peut entraîner pour des quantités d'eau trop importantes un moussage qui diminue les caractéristiques du matériau. L'eau a donc été ajoutée de façon à avoir une même consistance pour les différentes granulométries étudiées. K. Alrim a montré que pour obtenir une pâte de consistance normale (NF P 15 403), la quantité d'eau pouvait être déterminée par la formule empirique :

$$W = 0,35 C + W_f F + 1,5 Cop^{[17]}$$

W, C, F et Cop étant respectivement les pourcentages massiques d'eau, de ciment, de fine minérale et de copeaux. W_f est un coefficient qui dépend du milieu granulaire étudié. Pour une même nature minéralogique, il dépend de la surface spécifique du matériau pulvérulent. K. Alrim [17] a montré que W_f était égal à 20 % pour le S_{500R} , 25 % pour le S_{500} et 35 % pour le S_s . Pour le S_{50} , W_f atteint 50 %. Il augmente donc avec la surface spécifique. Le malaxage se fait dans un malaxeur normalisé pour mortier hydraulique (EN 196-1). La poudre de schiste sèche, le ciment et éventuellement les copeaux sont d'abord mélangés à sec pendant une durée d'environ 30 s. L'eau est ensuite introduite progressivement jusqu'à obtenir une pâte homogène et fluide par malaxage à vitesse lente. Dans le cas d'un allègement par entraîneur d'air celui-ci est alors ajouté et le malaxage est prolongé à vitesse rapide pendant une durée optimisée expérimentalement [12]. Après mise en moule par coulage, les échantillons sont conservés en salle à hygrométrie et température contrôlées jusqu'à et après démoulage. Un séchage en étuve à 70°C jusqu'à masse constante est effectué avant les différents essais.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous donnons dans cet article l'influence des deux vecteurs allègement : copeaux de bois et entraîneur d'air protéinique sur les caractéristiques physicomécaniques avant de comparer les performances des matériaux obtenus par les deux techniques.

Allègement par entraîneur d'air

Les densités des matériaux secs en fonction du pourcentage

Tableau 1 : Densité du matériau sec en fonction du pourcentage d'hémoglobine ajouté

Pourcentage d'hémoglobine ajouté	Densité du matériau sec		
	S_{500R}	S_{500}	S_{RS}
0	1,838	1,733	1,427
0,1	1,119	1,522	-
0,2	0,688	1,437	1,313
0,25	0,647	-	-
0,3	0,584	0,911	-
0,35	0,530	-	-
0,4	-	0,566	1,276
0,5	-	0,555	-
0,6	-	-	0,678

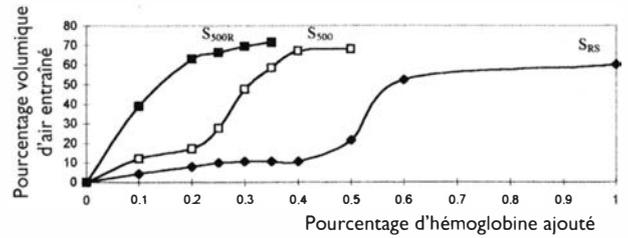


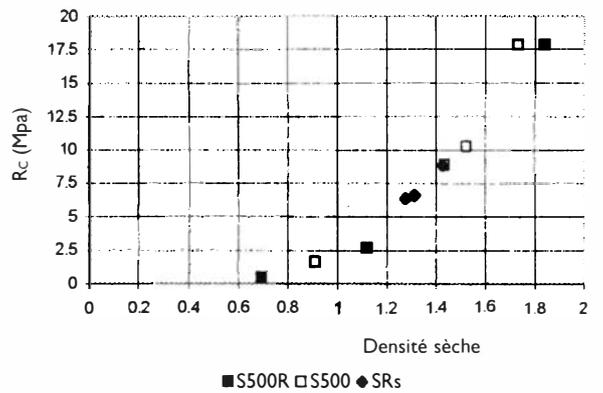
Figure 2 : Baisse de la densité sèche en fonction du pourcentage d'hémoglobine ajouté au mélange sec (C = 20 % et F = 80 %) : effet de la granulométrie

d'entraîneur d'air ajouté au malaxage sont reportés dans le tableau I.

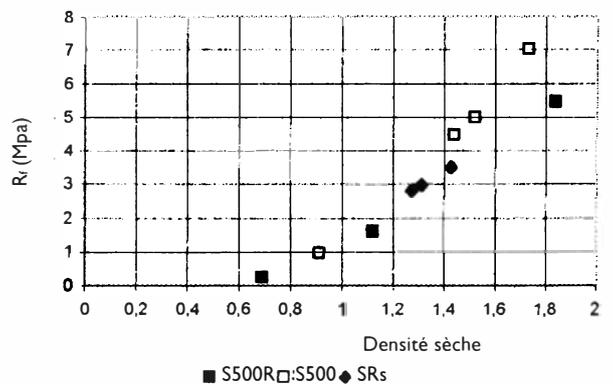
Plus les grains sont fins, plus la densité sèche est faible avec 0 % d'hémoglobine, en raison de la quantité d'eau ajoutée.

Si l'on désigne par γ le pourcentage d'air entraîné correspondant à la densité sèche d'un matériau sans hémoglobine, on voit qu'elle dépend également de la granularité (figure 2).

Plus la limite granulaire supérieure est élevée, plus l'entraînement d'air est important. A limite granulaire supérieure égale, une granulométrie resserrée dans le domai-



a : Résistance à la compression



b : Résistance à la flexion

Figure 3(a et b) : Variation de la résistance mécanique en fonction de la densité sèche du matériau pour trois granulométries différentes

ne des plus grands diamètres (S_{500R}) est favorable à l'entraînement d'air.

L'étude des résistances mécaniques (figures 3a et 3b) montre, qu'à densité égale, il y a peu de différences dans le cas des résistances en compression. Les résistances à la flexion semblent plus influencées par la granulométrie, surtout dans le domaine des densités élevées. Il est néanmoins possible de rassembler les valeurs dans un fuseau de largeur raisonnable. Les résistances en flexion peuvent s'exprimer par une loi puissance en fonction de la densité $R_f = 1,13 d^{3,26}$ avec un coefficient de corrélation $r = 0,98$. Dans le cas de la compression on a $R_c = 2,11 d^{3,83}$ avec $r = 0,99$ [17].

Allégement par granulats de bois

L'influence des granulats de bois sur la densité a été effectuée à partir d'un mélange sec contenant 20 % de ciment en masse. La somme fines + copeaux reste fixe et correspond à 80 % du mélange sec. Les différentes compositions étudiées sont reportées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Compositions des six mélanges étudiés

Mélange	Proportion de ciment (%)	Proportion de fines (%)	Proportion de copeaux (%)
1	20	80	0
2	20	75	5
3	20	70	10
4	20	65	15
5	20	60	20
6	20	55	25

La densité sèche est influencée par deux facteurs essentiels : le pourcentage en copeaux et l'eau de gâchage. Plus la teneur en copeaux augmente, plus la densité diminue. De même, plus la finesse des grains augmente, plus W_f augmente et par conséquent la densité sèche baisse puisque les fines schisteuses n'étant pas réactives à l'eau il reste après séchage une porosité consécutive à l'évaporation de l'eau n'ayant pas servi à l'hydratation du ciment. Les courbes de la densité en fonction des copeaux (figure 4) ont tendance à se rejoindre pour des pourcentages importants de copeaux. Au delà de 25 % en masse, ce sont les caractéristiques des copeaux qui l'emportent.

L'ajout de copeaux diminuant les densités, les résistances mécaniques sont affaiblies. La résistance moyenne en com-

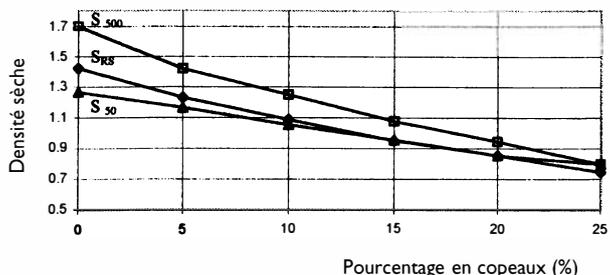
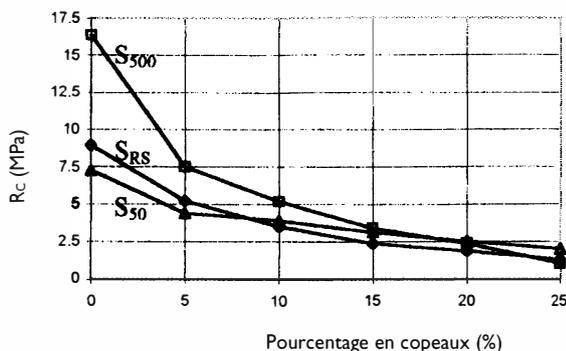
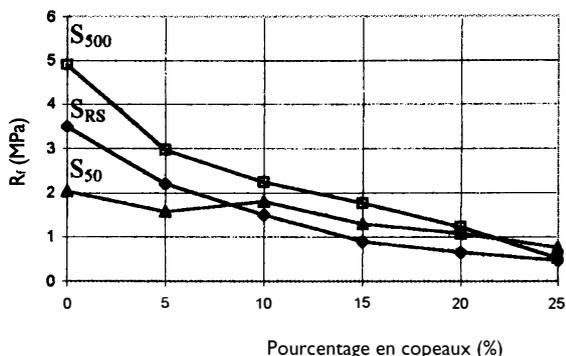


Figure 4 : Influence du pourcentage massique de copeaux de bois sur la densité sèche



a : Résistance à la compression



b : Résistance à la flexion

Figure 5 (a et b) : Résistances mécaniques à l'état sec en fonction du pourcentage massique en copeaux de bois

Tableau 3 : Valeurs des paramètres a, m, r obtenus pour une loi puissance $R = ad^m$ suivant la granulométrie du résidu schisteux et de la résistance mécanique

Résistance	Paramètres	S500	SRS	S50
R_c	a	2,46	2,82	3,48
	m	3,50	3,09	2,52
	r	0,993	0,998	0,978
R_f	a	1,2	1,09	1,37
	m	2,76	3,34	1,94
	r	0,983	0,999	0,974

pression varie entre 13 et 2 MPa et la résistance moyenne en flexion entre 4,3 et 0,7 MPa pour un pourcentage de copeaux variant de 0 à 25 % (figures 5a et 5b).

Un traitement des données expérimentales en utilisant une loi puissance $R = ad^m$ a permis d'obtenir pour les résistances les expressions du tableau 3.

Toutefois, l'ensemble de ces courbes décrivant le comportement à la compression en fonction de la densité sèche peut être rassemblé dans un fuseau relativement étroit (figure 6).

Comparaison des deux techniques d'allégement

Nous avons respectivement retracé dans les figures 7a et 7b les résistances à la compression et à la flexion obtenues

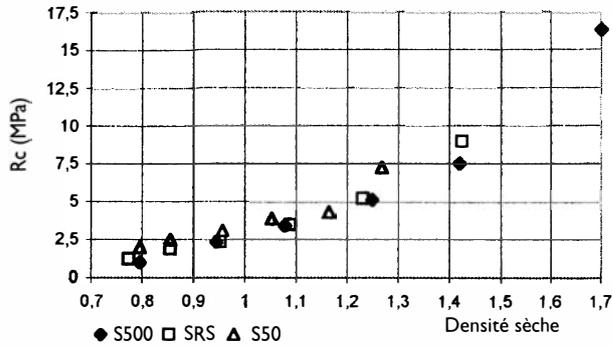
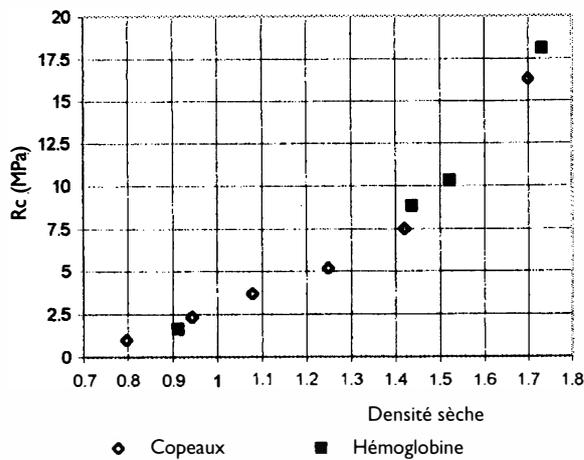
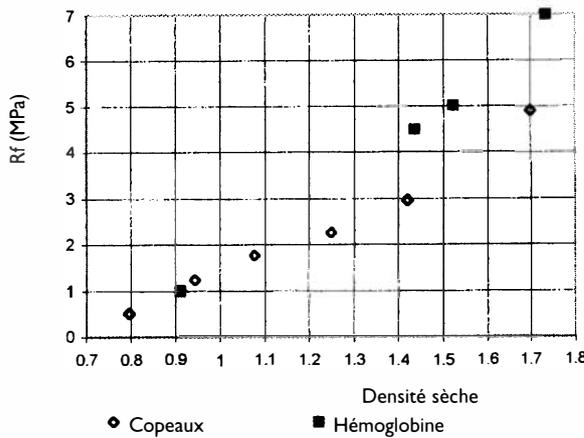


Figure 6 : Résistance à la compression en fonction de la densité sèche du matériau



a : Résistance à la compression



b : Résistance à la flexion

Figure 7 (a et b) : Synthèse des résistances mécaniques obtenues en fonction de la densité sèche pour le résidu S500

nues pour le S500 avec les deux techniques étudiées. On peut constater que la méthode d'allègement n'a pas une influence notable sur la variation de Rc en fonction de la den-

sité sèche. Par contre, en ce qui concerne la résistance à la flexion, l'allègement par entraîneur d'air protéinique est plus performant

Une étude de l'influence du vecteur d'allègement sur la microstructure et de l'adhérence à l'interface matrice - copeaux est en cours pour essayer d'expliquer ce phénomène. En effet, nous avons pu montrer qu'en général les copeaux, par leur morphologie jouaient le rôle de fibre qui devrait améliorer le comportement à la flexion [17].

SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Le but de ce travail était de comparer les performances mécaniques de bétons légers de fines issues de concassage de roches schisteuses par deux techniques différentes. Nous avons pu montrer que plus la granulométrie est fine, plus le pourcentage massique en hémoglobine doit être important pour alléger le matériau tout en respectant les exigences mécaniques (tableau 4).

Fine	H _{opt} (%)	d _s	R _c (MPa)
S500R	0,1	1,1	2,5
S500	0,29	1	2,5
SRS	0,5	0,9	2,5

Plus les grains sont fins, plus le respect des exigences mécaniques peut être facilement obtenu avec une densité moins

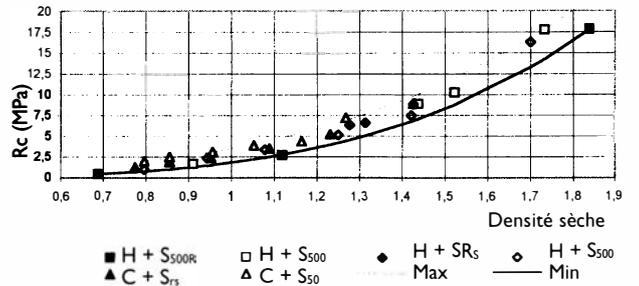


Figure 8 : Synthèse de la résistance à la compression en fonction de la densité sèche pour trois granulométries différentes de résidu

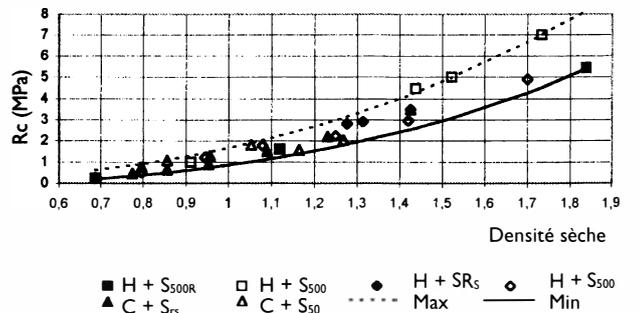


Figure 9 : Synthèse de la résistance à la flexion en fonction de la densité sèche pour trois granulométries différentes de résidu

élevée. Dans le cas d'un allègement par copeaux, plus la granulométrie est fine, moins il faut de copeaux ceci en raison de l'allègement lié à l'eau elle-même. En ce qui concerne les performances mécaniques des matériaux élaborés par les deux méthodes, même si l'on observe un léger avantage à la flexion des matériaux obtenus par entraînement d'air, les résultats peuvent se rassembler dans des fuseaux acceptables pour les différentes granulométries étudiées (figures 8 et 9). Ceci laisse supposer la possibilité d'un développement des matériaux sans séparation granulométrique. Toutefois une étude hygrothermique qui d'ailleurs est en cours actuellement sera nécessaire pour conclure.

Mais d'ores et déjà, on peut voir qu'une densité voisine de 1 peut laisser entrevoir l'utilisation de ces matériaux en blocs autoporteurs avec une teneur en ciment de l'ordre de 250 kg/m³.

*** Kamal Alrim,**

Département Génie civil - Université de Lattaquié - BP 712 - Lattaquié (Syrie)

**** Martin Ruzicka,**

GPE, IUT, département Génie civil - Université de Rennes I/Université technique de Prague - 3, rue du Clos Courtel - BP 114 - 35014 Rennes cedex

***** Ahmed Bouguerra,**

GPE, IUT, département Génie civil - Université de Rennes I - 3, rue du Clos Courtel - BP 114 - 35014 Rennes cedex

****** Rose-Marie Dheilly, Michèle Queneudec**

Équipe CEPS Co Université de Picardie - Institut universitaire de technologie - Département de génie civil. Avenue des Facultés - 80025 Amiens Cedex I.

Bibliographie

- [1] K. Alrim, M.A. Morteveille, M. Quéneudec, *Influence de l'addition d'un entraîneur d'air protéinique sur un mélange argile-ciment. L'HémoBAL et ses caractéristiques mécaniques*, Revue Internationale d'Héliotechnique, Nouvelle série ISSN - N°9, Avril 1994, 26-36.
- [2] K. Alrim, B. L. Haridon, M. Quéneudec, *Application des différentes méthodes d'allègement des argiles à la préfabrication d'éléments de construction*, Revue Internationale d'Héliotechnique, Nouvelle série ISSN - N°10, Octobre 1994, 33-47.
- [3] L. Marmoret, A. Bouguerra, K. Alrim, M. Quéneudec, *Conductivité thermique d'un béton argileux cellulaire. Cas d'un allègement par réaction avec l'aluminium pulvérulent*, Revue Générale de Thermique, Juin 1995, 34, N°402, 393-400.
- [4] A. Bouguerra, A. Ledhem, A. t'Kint de Roodenbeke, M. Quéneudec, *The effect of moisture content and temperature on thermal conductivity of lightweight concrete with stabilized wood aggregates*, In Proceedings of « International Symposium on moisture problems in Building Walls », Porto 11-13 September 1995, 188-195.
- [5] A. Bouguerra, A. Ledhem, M. Quéneudec, *Lightweight Insulating Concretes from clay and wood waste*, In Proceedings of « Conchem International Conference », Brussels 28-30 Novembre 1995, 483-489.
- [6] A. Bouguerra, M. Ruzicka, M. Quéneudec, *The effect of a biological air entraining agent on clay-cement mixture*, In Proceedings of « Conchem International Conference », Brussels 28-30 Novembre 1995, 361-369.
- [7] M. Ruzicka, D. Lorin and M. Quéneudec, *Some aspects of fresh clay-cement mixes foamed by a biological agent*, In « Production Methods and workability of concrete », E & FN Spon, London, Juin 1996, 495-504.
- [8] A. Ledhem, A. Bouguerra, M. Quéneudec, *Étude de l'influence du traitement des granulats et d'ajouts matriciels sur la stabilisation dimensionnelle d'un composite ciment-bois-fines*, Revue Marocaine de Génie Civil, Juillet-Août 1996, 64, 63-67.
- [9] K. Alrim, A. Ledhem, M. Quéneudec, *Étude des paramètres de fabrication d'un béton de bois à matrice argileuse*, Materials and Structure/Matériaux et Constructions, October 1996, 29, 514-518.
- [10] A. Bouguerra, A. Ledhem, A. t'Kint de Roodenbeke, M. Quéneudec, *Incorporation de déchets argileux dans les bétons de bois : propriétés mécaniques et thermiques*, Déchets - Sciences et Techniques, N°4 Décembre 4eme trimestre 1996, 44-47.
- [11] A. Bouguerra, K. Alrim, A. t'Kint de Roodenbeke and M. Quéneudec, *Making insulating materials by recycling clay waste*, In Proceedings of Second International Conference Buildings and the Environment, Paris June 1997, 651-658.
- [12] M. Ruzicka, R.M. Dheilly, M. Quéneudec, *The effect of the addition of H⁺ and OH⁻ on the properties of fresh clay and clay cement mixtures foamed by a biological air entraining agent*, In Proceedings of « Conchem International Conference ». Düsseldorf 2-4 December 1997, Accepté sous presse.
- [13] K. Alrim, M. Ruzicka, M.J. Le Garrec, M. Quéneudec, *Valorisation de fines minérales industrielles*, Déchets, Sciences et Techniques, 1^{er} trimestre 1996, N° 1, 37-40.
- [14] M. Quéneudec, M.J. Le Garrec, K. Alrim, A. Bouguerra, *The recycling of solid industrial waste : The lightweight Fine Concretes*, In Concrete for Environment Enhancement and Protection., E & FN Spon London, Juin 1996, 697-705.
- [15] K. Alrim, A. Bouguerra, M.J. Le Garrec, A. t'Kint de Roodenbeke, M. Quéneudec, *Valorisation de boues d'exploitation de granite*, Déchets, Sciences et Techniques, 3^{ème} Trimestre 1996, 43-46.
- [16] M. Quéneudec, K. Alrim, R.M. Dheilly, *Rejets industriels minéraux et matériaux de construction*, Actes du Colloque « Gestion des Rejets Industriels pour un développement durable », El Jadida (Maroc) 10-12 Septembre 1997.
- [17] K. Alrim, *Étude de l'influence de différents facteurs d'allègement des matériaux argileux : le béton argileux léger. Généralisation à d'autres fines de roches et applications à la conception d'éléments de construction préfabriqués*. Thèse de l'Université de Rennes - Février 1995.