

ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DES TRAITEMENTS PHYSICOCHEMISTIQUES SUR LES PERFORMANCES MÉCANIQUES DES BÉTONS LIGNOCELLULOSIQUES CONFECTIONNÉS À PARTIR DE PULPES DE BETTERAVE

P. MONREAL*, L.B. MBOUMBA-MAMBOUNDOU, R.M. DHEILLY, M. QUÉNEUDEC

*Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI)
Equipe Ingénierie des Matériaux et des Procédés (IMaP)
Université de Picardie - Jules Verne (UPJV)
41, avenue Paul Claudel. 80480 Dury les Amiens (France)

1. INTRODUCTION

Il est logique de penser que, dans l'avenir immédiat, la croissance urbaine et de ses infrastructures va continuer à produire un impact important sur l'environnement par l'utilisation de matériaux et par la consommation de matières premières et d'énergie. Le volume de travaux du BTP va augmenter progressivement et ceux-ci doivent être entrepris en tentant d'atteindre la durabilité afin de réduire au minimum l'impact sur l'environnement (Peris Mora, 2007).

Dans la production du sucre, et en général dans toute production de produits alimentaires, de grandes quantités de résidus, effluents et coproduits sont obtenues. Ces produits doivent être récupérés et recyclés ou traités pour obtenir des produits utiles et de plus haute valeur ajoutée ou utili-

sés comme matières premières pour d'autres industries. Un de ces coproduits est la pulpe de betterave qui représente environ 3 000 000 de tonnes par an. Actuellement elle est déshydratée et pelletisée pour être utilisée dans l'alimentation du bétail générant un faible bénéfice.

C'est dans le cadre de l'éco-construction, du développement durable et de stratégies de productions propres qu'une nouvelle voie de valorisation des pulpes de betterave à plus haute valeur ajoutée serait leur utilisation comme charge végétale dans des bétons lignocellulosiques.

L'incorporation de pulpe de betterave dans une matrice cimentaire est une des études de valorisation initiée par l'équipe IMaP du LTI dans sa recherche de solutions de valorisation de ce type d'agro ressources. Des travaux effectués ces dernières années (Mboumba-Mamboundou, 2005) ont

montré la possibilité d'une confection de composites possédant de bonnes caractéristiques d'isolation thermique. Toutefois, même si les résistances mécaniques de ces composites sont compétitives au regard de la classification fonctionnelle de la RILEM (RILEM, 1978), et par comparaison avec d'autres matériaux composites lignocellulosiques à matrice cimentaire, le caractère hydrophile des pulpes de betterave ainsi que leur forte propension à gonfler en présence d'eau entraîne des variations dimensionnelles non négligeables pour le composite. D'autre part, les composés organiques relargués par les pulpes dans l'eau entraînent des retards de prise d'autant plus importants que la proportion de pulpe dans le composite est élevée (Pulpe/Ciment > 2). Afin de s'affranchir de ces effets nuisibles, nous avons effectué des traitements physicochimiques visant à minimiser le caractère hydrophile des pulpes de betterave (Monreal, 2007). Cette étude vise à évaluer l'impact de ces traitements sur les résistances mécaniques des bétons lignocellulosiques à base de pulpes de betterave.

2. LES BÉTONS LIGNOCELLULOSIQUES

Aujourd'hui, tenant compte de ce que les quantités disponibles de granulats d'origine artificielle ou minérale sont limitées, et que les coproduits d'origine industrielle ou provenant de l'agriculture sont très abondants, ces derniers représentent une ressource alternative potentielle pour l'industrie de la construction. Leur utilisation présenterait le double avantage d'une meilleure gestion des ressources fossiles et de permettre de nouvelles valorisations de ces coproduits peu ou pas valorisés (Mannan et Ganapathy, 2004).

L'utilisation des coproduits agricoles dans le béton conduit à une classe de bétons de granulats légers (BGL) appelés bétons lignocellulosiques. Il s'agit de matériaux composites à matrice cimentaire, dans lesquels les granulats minéraux ont été partiellement ou totalement remplacés par des granulats végétaux. Les domaines d'application des bétons lignocellulosiques sont variés. La plupart des industriels qui ont investi ce domaine, proposent des chapes isothermiques et isophoniques ultra légères, des dalles isolantes et des panneaux coupe son pour routes et autoroutes.

Ces matériaux composites à base de ciment et de matières végétales présentent donc les avantages propres aux bétons légers, qui sont principalement des performances mécaniques intéressantes pour des masses volumiques nettement diminuées par rapport à des bétons dits normaux et des avantages au niveau de l'isolation thermique et acoustique (Pimienta *et al.*, 1994). Mais, du fait de leur nature, les coproduits végétaux présentent aussi l'avantage de constituer des ressources renouvelables annuellement, dont la biodégradabilité peut être contrôlée et qui, par plusieurs aspects, participent à la lutte contre l'effet de serre. Toutefois, un certain nombre de difficultés subsistent et rares sont les matières végétales qui peuvent être additionnées au ciment sans provoquer des problèmes.

La première difficulté rencontrée concerne la compatibilité entre la matrice cimentaire et le granulat lignocellulosique. En effet, certains composés présents dans les parois cellu-

lares des cellules végétales ont une action retardatrice ou même inhibitrice de la prise et de l'hydratation du ciment qui se traduit par un affaiblissement des résistances mécaniques (Hachmi et Moslemi, 1989 ; Garci Juenger et Jennings, 2002 ; Luke et Luke, 2000). Une autre difficulté rencontrée est relative aux variations dimensionnelles des matériaux composites. Les matières lignocellulosiques changent de dimensions avec le changement de leur taux d'humidité. Ce processus est réversible et les granulats varient dimensionnellement au fur et à mesure qu'ils échangent de l'humidité (Rowell, 1998). Ces variations dimensionnelles sont susceptibles de créer des pathologies dans la construction, aussi bien au niveau macroscopique, en raison des contraintes développées, qu'au niveau microscopique, par le développement de microfissurations qui peuvent favoriser la pénétration d'agents agressifs. Pour surmonter ces problèmes, différents traitements de natures diverses ont été mis en place agissant soit sur la matrice cimentaire, soit sur le granulat végétal. Il peut s'agir de traitements physiques, thermiques ou chimiques.

Le choix du traitement doit se faire en cherchant la meilleure amélioration possible des caractéristiques du granulat en termes de compatibilité avec la matrice cimentaire et de diminution du caractère hydrophile. De plus, ce traitement doit nécessiter un nombre d'étapes qui soit le plus petit possible, il doit pouvoir s'effectuer avec la moindre consommation énergétique possible et représenter un coût économique et environnemental minimum.

3. MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1. Pulpe de betterave

Les pulpes de betterave ont été fournies par l'USICA, Union des SICA de transformation de pulpe de betterave, sous forme déshydratée, en paillettes.

3.2. Ciment et chaux

Le ciment utilisé pour le traitement et pour la fabrication de toutes les éprouvettes est un ciment Portland de type CPA CEM I 52,5 NCP 2 répondant aux caractéristiques de la norme NF EN 197-1 (AFNOR, 2004). La chaux utilisée pour le traitement des pulpes est de type NHL-5 selon la norme NF EN 459-1 (AFNOR, 2002)

3.3. Traitements sur les pulpes de betterave

Les traitements appliqués consistent en un enrobage des pulpes de betterave afin d'atténuer leur forte affinité à l'eau. L'enrobage a été effectué avec deux liants hydrauliques différents (ciment et chaux) et avec huile de lin qui est une huile siccatrice, c'est-à-dire, un liquide visqueux qui durcit par oxydation à l'air pour former une pellicule solide (Abraham, 1996). Plusieurs essais préliminaires ont été réalisés pour avoir un enrobage complet et homogène de la surface extérieure des particules de pulpe. À l'issue de ces

essais, les rapports eau/liant et pulpe/liant ont été fixés respectivement à 1,0 et 0,8 dans le cas du ciment et à 1,0 et 0,6 dans le cas de la chaux. L'application de l'enrobage est suivie d'une période de cure, nécessaire pour le durcissement du liant sur les pulpes traitées, en chambre humide à 20°C et 98 % d'humidité relative. Pour le traitement à l'huile de lin un rapport pulpe/huile de lin égal à 1,0 est utilisé. Le traitement se poursuit par un temps de polymérisation de la couche d'huile de lin de 21 jours à une température de 50°C.

3.4. Caractérisation du composite à l'état durci

Des essais de résistance, en traction par flexion et en compression, ont été menés suivant la norme EN 196-1 (AFNOR, 2006) respectivement à l'aide d'un banc d'essai de type PERRIER 41.04 et d'une presse hydraulique de type PERRIER 68.7, afin d'établir les performances mécaniques des composites. Ces essais ont été effectués sur des éprouvettes de dimension $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ après une cure de 28 jours en chambre humide à 20°C et environ 98 % d'humidité relative, suivie d'un séchage jusqu'à masse constante dans une étuve à 50°C.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Influence des traitements appliqués sur les pulpes de betterave

L'étude des caractéristiques physico-chimiques met en évidence des différences entre les pulpes issues des différents traitements élaborés et celles non-traitées. Globalement, nous pouvons remarquer que l'enrobage des particules de pulpe de betterave n'est pas totalement homogène, ce qui ne devrait pas permettre de supprimer entièrement le côté hydrophile de la pulpe. En même temps, le dépôt de l'enrobage autour des particules de pulpe induit une augmentation de la masse volumique apparente. Toutefois, ces masses volumiques apparentes sont encore très faibles ($\approx 300 \text{ kg/m}^3$) et les pulpes traitées peuvent donc être utilisées comme granulat pour la confection de bétons légers. D'autre part, les traitements appliqués ont une efficacité similaire en ce qui concerne le contrôle de l'absorption. Le taux d'absorption d'eau à saturation et celui du gonflement qu'elle entraîne sont fortement diminués par l'application des traitements aux pulpes : ils permettent de diviser respectivement par trois et par quatre l'absorption d'eau et le gonflement des pulpes. Des valeurs proches de 80 % en masse et en volume de matière sèche sont obtenues (Monreal *et al.*, 2008).

4.2. Résistances mécaniques des bétons

Les résistances à la traction par flexion des composites élaborés avec des pulpes de betterave se situent entre 0,1 et 0,2 MPa (Tableau 1). Ces valeurs sont en concordance

Nature du traitement	$P_{\text{saturée}}/C$ (volumique)	Résistance à la traction par flexion (MPa)
Sans traitement	3	0,11
Enrobage à la chaux	3	0,10
Enrobage au ciment	3	0,13
Enrobage à l'huile de lin	2	0,17

Tableau 1 : Résistances mécaniques à la traction par flexion des matériaux selon la nature du traitement appliqué aux pulpes ($\rho \approx 800 \text{ kg/m}^3$).

avec les résistances à la traction des bétons lignocellulosiques élaborés avec d'autres granulats (Dupré, 2005).

Des essais de résistance mécanique à la compression des composites élaborés avec des pulpes traitées avec un liant hydraulique ont été faits en fonction du rapport E/C (eau/ciment) utilisé lors du gâchage et en fonction du temps de cure de la couche d'enrobage respectivement afin d'optimiser ces deux paramètres.

Les résultats des tests de résistance à la compression montrent que le rapport E/C optimal pour l'élaboration des matériaux avec des pulpes enrobées avec un liant hydraulique se situe entre 0,2 et 0,3 et que le temps de cure de la couche d'enrobage n'a pas beaucoup d'influence sur la résistance finale des matériaux. Ce sont le rapport E/C = 0,3 et le temps de cure de 28 jours qui ont été retenus et ceci pour un rapport P/C (pulpe/ciment = 3). Le rapport E/C = 0,3 a été préféré au 0,2 parce qu'il confère au matériau une meilleure ouvrabilité à l'état frais. Le temps de cure de 28 jours a été retenu pour être en accord avec les conditions usuelles de maturation des matériaux cimentaires. Dans ce sens, la meilleure formulation pour l'élaboration des bétons avec des pulpes traitées à l'huile de lin consistant dans les rapports P/C = 2 et E/C = 0,3 a été retenue après les tests préliminaires de faisabilité.

Les résistances mécaniques à la compression, rapportées aux masses volumiques des composites élaborées, en fonction de la nature du traitement appliqué préalablement aux pulpes sont représentées dans la Figure 1 pour la formulation optimum de chaque traitement.

L'enrobage des pulpes à la chaux (P/C = 3 ; E/C = 0,3) est le traitement pour lequel les résistances des matériaux sont les plus faibles. Les matériaux élaborés avec des pulpes

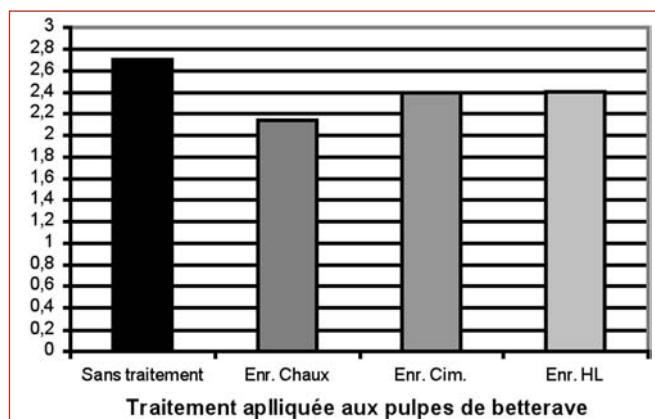


Figure 1 : Résistance à la compression des composites élaborés selon la nature du traitement appliqué aux pulpes.

issues des traitements d'enrobage au ciment ($P/C = 3$; $E/C = 0,3$) et d'enrobage à l'huile de lin ($P/C = 2$; $E/C = 0,3$) développent des résistances similaires, mais il faut noter une présence plus importante de ciment dans les composites élaborés avec l'huile de lin.

Toutefois, le traitement des pulpes semble ne pas présenter un avantage du point de vue de la résistance mécanique à la compression des matériaux. En effet, indépendamment du traitement utilisé, les résistances des bétons élaborés avec les pulpes traitées sont légèrement inférieures à celles des bétons élaborés avec des pulpes non traitées (Tableau 2).

Type de traitement	$P_{\text{saturée}}/C$ (volumique)	Résistance à la compression (MPa)
Sans traiter	3	2,1
Enrobage à la chaux	3	1,4
Enrobage au ciment	3	1,8
Enrobage à l'huile de lin	2	1,9

Tableau 2 : Résistances mécaniques à la compression des matériaux selon le traitement utilisé ($\rho \approx 800 \text{ kg/m}^3$).

Or, étant donné que le gonflement des pulpes est moindre quand elles ont été traitées, pour un même rapport volumique apparent $P_{\text{saturée}}/C = 3$, la proportion relative de pulpes par rapport à la quantité de ciment est plus élevée que dans le cas des pulpes non traitées. Si on compare les résistances à quantité de pulpes égales, on obtient des résistances mécaniques du même ordre que pour les matériaux élaborés avec des pulpes non traitées.

5. CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif l'évaluation des performances mécaniques des bétons lignocellulosiques élaborés avec des pulpes de betterave issues de différents traitements appliqués visant le contrôle de leur caractère hydrophile.

Les pulpes traitées ont une capacité d'absorption d'eau et un gonflement réduits par rapport à celle des pulpes non traitées. Ceci permet d'augmenter l'incorporation de pulpes dans les bétons élaborés avec des pulpes traitées.

Les résultats obtenus dans les tests mécaniques des matériaux élaborés avec des pulpes traitées montrent que malgré cette présence plus importante de pulpes, les résistances mécaniques des meilleures formulations étudiées sont du même ordre de grandeur que celle obtenues avec des pulpes non traitées.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs veulent remercier l'USICA (Union des SICA de transformation de pulpe de betterave) et l'ARTB (Association de Recherche Technique Betteravière) pour le support fourni à ces travaux.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Abraham C.J.** « A solution to spontaneous combustion in linseed oil formulations ». *Polymer degradation and stability*, 54, pp. 157-166. 1996.
- [2] **AFNOR NF EN 196-1**, « Méthodes d'essai des ciments Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques ». 2006.
- [3] **AFNOR NF EN 459-1**, « Chaux de construction. Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité ». 2002.
- [4] **AFNOR. NF EN 197-1**, « Ciment Partie 1: composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ». 2004.
- [5] **Dupré B.**, « Valorisation des coproduits du lin, étude de l'impact du vécu et de la variabilité génétique de la plante sur les propriétés des matériaux composites élaborés », Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne. 2005.
- [6] **Garci Juenger M.C., Jennings H.M.** « New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes ». *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, Issue 3, pp. 393-399. 2002.
- [7] **Hachmi M., Moslemi A.A.** « Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives ». *Forest products journal*, Vol.39, N°6, pp. 55-58. 1989.
- [8] **Luke K., Luke G.** « Effect of sucrose on retardation of Portland cement ». *Advances in Cement Research*, 12, n° 1. pp. 9-18. 2000.
- [9] **Mannan M.A., Ganapathy C.** « Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS) ». *Building and Environment*, Vol. 39, Issue 4, pp. 441-448. April 2004.
- [10] **Mboumba-Mamboundou L.B.** « Analyse des facteurs de risques liés à l'incorporation des pulpes de betterave dans des matrices cimentaires ». Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne. 2005.
- [11] **Monreal P.** « Etude de faisabilité de bétons lignocellulosiques à base de pulpes de betteraves : traitements physico-chimiques des granulats et évaluation de l'influence sur les performances mécaniques, hydriques et thermiques ». Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne. 2007.
- [12] **Monreal P., Mboumba-Mamboundou L.B., Dheilly R.M., Quéneudec M.** « Evaluation de l'efficacité des traitements physicochimiques sur la performance de composites cimentaires lignocellulosiques confectionnés à partir de pulpes de betterave ». Actes du troisième colloque européen Orgagec : Matériaux organiques pour la construction : performances techniques et environnementales. Paris (France). 2008.

- [13] **Peris Mora E.** « Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials », *Building and Environment*, 42, pp. 1329-1334. 2007.
- [14] **Pimienta P., Chandellier J., Rubaud M., Dutruel F., Nicole H.** « Étude de faisabilité des procédés à base de bétons de bois ». Cahier du CSTB 2703. 1994.
- [15] **RILEM.** *Materials and structures*, n° 64 Vol 11, pp. 281-288. 1978.
- [16] **Rowell R.M.** « Property enhanced natural fiber composite materials based on chemical modification ». Dans *Science and Technology of Polymers and Advanced Materials: Emerging Technologies and Business Opportunities*. Edited by P. N. Prasad *et al.*, Plenum Press, pp. 717-732. New York. 1998.