

Comportement de différentes biomasses marocaines dans la fabrication de composites bois-ciment / gypse

par M'Hamed HACHMI, Abdessadek SESBOU, André ZOULALIAN,
Eric MOUGEL, Halim AKAÂBOUNE et Karim ZOUKAGHE

Cet article original nous propose d'étudier le comportement de différentes biomasses marocaines dans la fabrication de composites bois-ciment et bois-gypse. Il offre ainsi des perspectives sérieuses de valorisation des biomasses étudiées, mais aussi des avantages socio-économiques liés à l'amélioration de l'habitat et au développement de nouvelles entreprises.

Introduction

Le Maroc a une population d'environ 30 millions d'habitants caractérisée par un taux de croissance démographique très élevé. L'exode rural, amplifié par les sécheresses qu'a connu le pays ces dernières années, a fini par surpeupler les villes marocaines, conduisant à l'éclosion de bidonvilles dans leurs périphéries. Malgré la stratégie de construction de logements économiques affichée par le gouvernement marocain, ce fléau continue à polluer le paysage urbain du Maroc. Pour surmonter cette problématique, beaucoup de pays qui sont dans le même cas que le Maroc, ont opté pour le transfert de la technologie de fabrication de panneau bois-ciment (PBC) qui constitue un matériau de base pour les constructions préfabriquées. En plus de ses avantages économiques et de ses propriétés d'isolation thermique et phonique et de résistance aux intempéries, aux champignons et au feu, le PBC peut subir les mêmes transformations technologiques que celles appliquées au bois massif (FRASER, 1977). Cette technologie, qui connaît un essor mondial, peut, d'une part constituer une meilleure alternative aux constructions traditionnelles en béton massif et, d'autre part, avoir des avantages sociaux et environnementaux à travers l'installation de nouvelles entreprises génératrices de revenus et de nouveaux emplois.

Le transfert de cette technologie au Maroc pourrait l'aider à relever le défi des constructions insalubres, surtout qu'il existe déjà sur place des industries qui ont une longue expérience dans la fabrication de blocs de bardage à base de bois et de ciment pour les constructions préfabriquées, destinées aux infrastructures primaires : écoles et dispensaires en milieu rural, logements temporaires au niveau des chantiers de travail des entreprises, des barrages, des autoroutes, des relais pour les opérateurs GSM... La matière ligneuse bois utilisée par ces usines est totalement importée et essentiellement à base de sapin.

Dans le cadre de la politique affichée par l'Etat en matière de constructions, ces unités pourraient jouer les premiers rôles en investissant dans la fabrication de PBC et de panneaux bois-gypse (PBG). Outre la nécessité d'éradiquer les bidonvilles qui défigurent les villes, cette perspective est très attrayante pour deux autres raisons :

- l'abondance des liants hydrauliques à savoir le ciment et le gypse,

- et la valorisation des différentes ressources lignocellulosiques du domaine forestier marocain.

En effet, ce dernier, dont la superficie totale est de 9 millions d'hectares, est très diversifié en ressources ligneuses naturelles telles que chêne vert, chêne-liège, cèdre, alfa, biomasses des différents arbustes, etc. La stratégie affichée depuis les années 70 par le ministère chargé des Eaux et Forêts en matière de production ligneuse porte toujours sur la politique des reboisements. Ces derniers sont basés essentiellement sur l'introduction d'espèces résineuses ou feuillues plus productives. En effet, le bilan des reboisements montre que la surface reboisée totale est de 502 359 ha, répartie comme suit : résineux 47%, eucalyptus 40% et autres feuillus (essentiellement acacia) 13% (AHIZOUNE *et al.*, 1999). De grandes quantités de sous-produits peuvent provenir de ces plantations artificielles, tels les produits des élagages et des éclaircies des pins, ceux des eucalyptus ne répondant pas au cahier des charges de l'usine de pâte à papier « Cellulose du Maroc », etc. Toutes ces espèces résineuses et feuillues, ainsi que l'alfa et les déchets des lièges, peuvent constituer une source d'approvisionnement en matière première fibres-bois pour d'éventuelles usines de fabrication de PBC et de PBG. Mais le problème rencontré lors de la

confection de ce type de panneau est l'existence possible d'une incompatibilité naturelle entre les ingrédients du mélange, à savoir : ciment ou gypse, deux matériaux minéraux en mélange avec un matériau organique constitué de bois ou d'une autre fibre lignocellulosique. Ceci nous amène donc à considérer le degré de compatibilité avec le ciment ou le gypse de n'importe quelle espèce de bois avant de se prononcer sur son aptitude à la fabrication de PBC ou de PBG. Tel est l'objectif de la présente étude en ce qui concerne différentes biomasses forestières marocaines.

Matériels et méthodes

Un total de 29 provenances, représentant 12 espèces, réparties à travers différentes stations forestières du Maroc ont été testées dans la présente étude. Le tableau II (Cf. page 261) donne les renseignements relatifs à ces espèces forestières et aux lieux de leur récolte. L'évaluation de la compatibilité bois-gypse a porté sur 18 provenances seulement. L'effet des conditions de croissance sur la composition chimique des extraits, qui sont à l'origine de la différenciation des degrés de compatibilité constatés au sein d'une même espèce, est à l'origine du nombre élevé de provenances considérées.

Une fois collectés, les échantillons de bois et d'alfa ont été stockés puis fragmentés, broyés, tamisés et séchés à l'air libre. Seule la fraction des particules passant à travers le tamis de 20 mesh et retenues par le tamis de 40 mesh a été utilisée dans cette étude. Leur teneur en humidité est déterminée en vue de calculer la quantité d'eau distillée à ajouter à leur mélange avec le ciment ou le gypse lors des essais d'hydratation. Ces derniers ont été réalisés selon les proportions du mélange suivant : 15 g de bois sec, 200 g de ciment ou de gypse et 90,5 g d'eau distillée (WEATHERWAX et TARKOW, 1964). Dans le cas de l'hydratation du ciment témoin et de celui du gypse, le rapport optimum eau/ciment ou eau/gypse a été de 0,4 ; c'est-à-dire 80 g d'eau pour 200 g de ciment ou de gypse. Quant à celui du rapport eau/bois, il a été de 0,7 ; c'est-à-dire 10,5 g d'eau pour 15 g de bois sec (SIMATUPANG, 1979)¹. En vue d'éviter l'effet des variables nuisibles, notamment les déperditions de chaleur qui pourraient être différentes d'un calorimètre à l'autre, les essais d'hydratation témoins ont été réalisés

1 - Les proportions de mélanges pour les essais d'hydratation sont différentes de celles exigées pour la fabrication de blocs moulés ou de panneaux.

pour chacun des huit calorimètres utilisés dans cette étude. Ces essais d'hydratation ont été réalisés dans des calorimètres de type Dewar avec des parois doubles (MOSLEMI et LIM, 1984), munis de thermocouples de type K reliés à un enregistreur de température programmable de marque Hanna Instrument. Comme liants hydrauliques, on a utilisé le ciment *portland* de type CPJ 35 fabriqué par la cimenterie Lafarge de Meknès et le gypse de marque Nejma fabriqué par la Compagnie marocaine de Safi.

La réaction d'hydratation du ciment ou celle du gypse est une réaction exothermique. Les températures enregistrées (T) en °C, en fonction du temps, (t) en heure, sont transformées en chaleur d'hydratation, en cal/h (CH), selon la formule suivante (HACHMI *et al.*, 1990) :

$$CH = (T - Tr) * (Mc Cc + Mb Cb + Me Ce) / t$$

Avec :

CH (cal/h) : flux de la chaleur d'hydratation par unité de temps pour un essai d'hydratation ;

Tr : température ambiante (°C) ;

Mc, Mb, Me : sont respectivement les masses du ciment, bois et eau ;

Cc, Cb, Ce : sont respectivement les chaleurs spécifiques du ciment (0.186 cal / °C*g), du bois (0,324 cal / °C*g) et de l'eau (1 cal / °C*g).

Pour le cas du gypse, les variables Mc et Cc sont remplacées dans la formule par la masse du gypse Mg et Cg qui est égale à 0,204 cal / °C*g.

L'observation de l'évolution de cette chaleur d'hydratation met en évidence deux réactions. La première réaction ne reflète pas le degré de compatibilité du bois avec le ciment, car il y a des essences qui dégagent au début de fortes chaleurs qui dépassent celles dégagées par le ciment témoin et qui ne sont pas forcément compatibles avec le ciment. Par conséquent, la période sur laquelle est basé le calcul du coefficient de compatibilité bois-ciment s'étale entre 3h 30 mn, soit le début de la deuxième réaction exothermique du ciment témoin utilisé dans cette expérience (qui peut d'ailleurs varier d'un type de ciment à un autre), et 24 h, considéré comme temps limite du test d'hydratation. Le degré de compatibilité bois-ciment (Ca) a été déterminé sur la base du rapport de l'aire sous la courbe donnant la variation de la chaleur d'hydratation du mélange bois-ciment, sur celle correspondant au ciment témoin (HACHMI *et al.*, 1990). Le calcul des aires a été fait à l'aide du logiciel MAPLE. Le même processus de calcul du Ca a été suivi pour le cas du gypse, mais sur la

base d'un intervalle de temps plus court entre 10 mn et 4 heures seulement, car le gypse a une prise plus rapide que le ciment et toute la chaleur d'hydratation enregistrée pour le bois-gypse est toujours inférieure à celle du gypse témoin, même au niveau de la première réaction d'hydratation. Quatre essais répétitifs ont été réalisés pour tous les tests d'hydratation.

L'aptitude de ces essences au mélange avec le ciment a été évaluée, parallèlement aux essais d'hydratation, à travers l'étude des caractéristiques physiques et mécaniques des échantillons blocs moulés confectionnés pour toutes les essences et de ceux de panneaux réalisés pour trois essences seulement, jugées les plus importantes : le pin maritime, le pin d'Alep et l'alfa. Les proportions des mélanges ciment / bois / eau ont été respectivement de 1 000 g / 75 g / 452,5 g pour les blocs moulés (ANDY et ZHONG, 1986) et 2 752 g / 1 100 g / 2 200 g pour les panneaux (ALBERTO, 2001). Afin de les stabiliser, les blocs moulés et les panneaux ont été stockés dans une chambre à 20°C et 65% d'humidité relative jusqu'à 28 jours, date à laquelle les essais mécaniques ont été réalisés.

Pour l'alfa, qui présentait un problème de prise avec le ciment, un traitement préliminaire a été appliqué : immersion des particules dans de l'eau pendant 48 h, suivie d'un enrobage avec du ciment puis d'un lavage à l'eau. Lors de la confection des panneaux avec ces particules d'alfa traitées, le chlorure de calcium a été utilisé comme accélérateur, à raison de 3% par rapport au poids du ciment. Les blocs moulés ont servi à l'évaluation de la contrainte de rupture en compression. Quant aux autres paramètres physiques et mécaniques relatifs aux panneaux, ils ont porté sur la masse volumique, le gonflement, le module d'élasticité, le module de rupture à la flexion, la traction perpendiculaire aux faces et la conductivité thermique.

Résultats et discussion

Les particules de bois et d'alfa utilisées présentaient une teneur en humidité variable selon les espèces : d'un minimum de 9,8% pour l'*Eucalyptus camaldulensis* à un maximum, surtout pour les branches des résineux, de 33,3% pour le *Pinus brutia*. La connaissance de cette teneur en humidité permet la détermination de la masse humide

Sources de variation	DL	SCE	CM	Fobs
Provenances	23	1724,34	74,97	131,52***
Calorimètres	7	86,774	12,39	21,73***
Résiduelle	65	37,682	0,57	
Total	95	1848,796		

*** Très hautement significatif ; $F(23, 65) = 2,71$ et $F(7, 65) = 4,85$

DL : degré de liberté ; SCE : somme des carrés des écarts ; CM : carré moyen ;

Fobs : F observé.

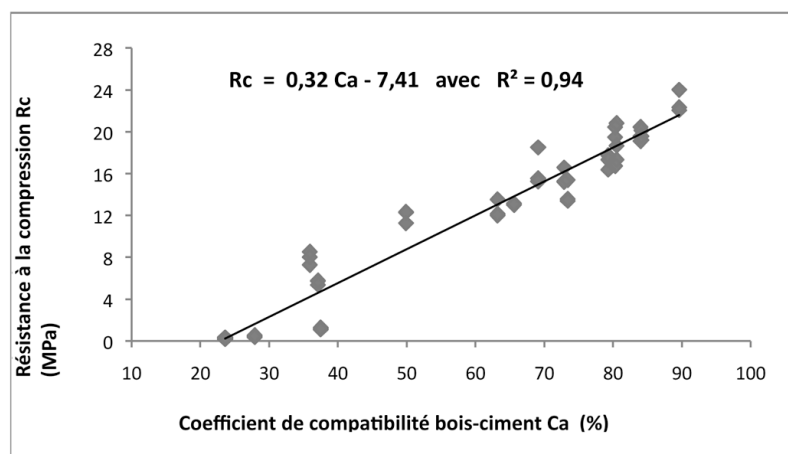
Tab. I :
Résultats d'analyse
de la variance à deux
critères de classification :
provenances
et calorimètres
(Zoukaghe, 2001).

du bois de chaque échantillon et la masse d'eau distillée à incorporer dans le mélange et ceci pour chaque essai d'hydratation avec le ciment ou le gypse.

Compatibilité bois-ciment

Avant de présenter les résultats relatifs aux coefficients de compatibilité bois-ciment, il y a lieu de cerner l'effet des calorimètres et des provenances sur la détermination de la température moyenne des mélanges bois-ciment ou ciment témoin. Pour ce faire, on a opté pour une analyse de la variance à deux critères de classification (Cf. Tab. I). Les résultats de cette analyse de variance démontrent l'existence d'un effet très hautement significatif des facteurs provenance et calorimètre. On en déduit que les calorimètres ont un effet très marqué sur la mesure de température moyenne du ciment témoin ; ceci confirme l'approche qui a été adoptée dans cette étude et qui consistait à réaliser l'hydratation du ciment témoin pour chaque calorimètre. Quant à l'effet des provenances, il est naturellement corrélé aux différences liées à la nature du bois (différentes espèces et provenances) et aux conditions de crois-

Fig. 1 :
Evolution de la résistance
à la compression R_c en
fonction du coefficient de
compatibilité Ca



sance (climat, sol, traitements sylvicoles, etc.).

Les essais d'hydratation incorporant le bois et le ciment ont porté sur 24 provenances (Cf. Tab. II). Ce tableau montre leur coefficient de compatibilité (Ca) ainsi que leur qualification selon les classes définies par HACHMI et MOSLEMI (1989) à savoir :

- bois compatibles : $Ca > 68\%$,
- bois moyennement compatibles : $28\% < Ca \leq 68\%$,
- et bois non compatibles : $Ca \leq 28\%$.

La première conclusion à tirer de la lecture de ce tableau est que le bois provenant des branches d'élagage de tous les pins est compatible, avec un coefficient supérieur à 70%, ce qui les range dans la classe des bois compatibles avec le ciment ($Ca > 68\%$) à l'exception du pin brutia de Tetouan qui est moyennement compatible avec un $Ca=52\%$. Quant à l'alfa, c'est une graminée qui peut être considérée comme moyennement compatible à non compatible selon les provenances, son Ca varie entre 27% pour la provenance Aïn Bni Mathar et 40% enregistré au niveau de Nador. Ces résultats confirment, une fois encore, que l'alfa ne peut en aucun cas constituer, dans son état naturel, une source de matière lignocellulosique compatible avec le ciment (HACHMI, 1987 ; ZOUKAGHE, 2001).

Si les produits d'élagage des pins peuvent être utilisés sans crainte dans la fabrication des panneaux composites bois-ciment, ceux de l'acacia et de l'alfa, surtout, devront subir, au préalable, un traitement physique ou chimique. Quant au chêne vert, il n'est pas compatible car, d'une part son Ca est faible et, d'autre part, son bois est dur et dense et donc peu apte à la trituration. En revanche, le bois d'eucalyptus continue à confirmer sa appartenance à la classe des bois moyennement compatibles et il peut, de ce fait, élargir la base d'approvisionnement en fibres, constituée par les produits d'élagage des pins utilisés dans les reboisements du Maroc (AKAÂBOUNE, 2002).

Composites bois-ciment

La masse volumique des blocs moulés obtenus varie de 1304 kg/m³ à 1662 kg/m³. Ces composites de bois n'appartiennent pas donc à la famille des bétons légers (450 à 1200 kg/m³) (MOUGEL, 1992). Ceci est dû au rapport élevé du ciment/bois qui a été utilisé dans cette étude, en vue d'établir la corrél-

tion entre la résistance à la compression et le coefficient de compatibilité bois-ciment.

L'étude des essais de résistance à la compression axiale appliqués sur les blocs moulés révèle que les blocs fabriqués à base de bois des produits d'élagage des résineux, présentent une contrainte de rupture importante, variant entre 12 MPa pour le pin brutia de Tétouan et 22,8 MPa pour le pin maritime de Kénitra. Alors qu'elle est très faible pour les différentes provenances d'alfa et d'*Acacia mollissima*, ne dépassant guerre 1 MPa. Le chêne-liège et l'*Eucalyptus camaldulensis* présentent une résistance de l'ordre de 13 MPa. Cette grande variation dans la résistance à la compression est due à l'effet des provenances qui a été confirmée d'ailleurs par l'analyse de la variance à un seul critère de classification.

Une corrélation très hautement significative a été déterminée entre la contrainte de rupture à la compression des blocs de bétons et le coefficient de compatibilité (Ca) comme l'illustre l'équation de la régression linéaire de la Fig. 1. L'analyse de cette figure nous permet de conclure que la résistance à la compression des bétons de bois purs (sans ajouts d'accélérateurs de prise) pourrait être prédite en se basant sur la valeur du coefficient de compatibilité bois-ciment Ca.

En ce qui concerne les propriétés des panneaux bois-ciment, leurs caractéristiques mécaniques et physiques sont résumées dans le tableau III.

En comparant les résultats obtenus avec ceux des normes des panneaux bois-ciment, on peut dire que les panneaux fabriqués à base du bois des produits d'élagage du pin maritime de Kénitra et du pin d'Alep de Chefchaouen, sans aucun traitement ou

Espèces	Nom scientifique	Provenance	Ca (%)	Classement
Pin d'Alep	<i>Pinus halepensis</i>	Tetouan	91	Compatible
		Oulmès	89	"
		Jerada	76	"
		Chefchaouen	71	"
Pin maritime de montagne	<i>Pinus pinaster</i> var. <i>maghrebiana</i>	Chefchaouen	86	"
		Tetouan	85	"
		Taza Sud	76	"
Pin pignon	<i>Pinus pinea</i>	Tetouan	92	"
		Chefchaouen	91	"
Pin des Canaries	<i>Pinus canariensis</i>	Chefchaouen	89	"
		Lamaâziz	88	"
		Taza Sud	88	"
Pin maritime des Landes	<i>Pinus pinaster</i> var. <i>atlantica</i>	Kénitra	98	"
		Sidi Yahya	78	"
Pin radiata	<i>Pinus radiata</i>	Chefchaouen	84	"
		Taza Sud	82	"
Pin brutia	<i>Pinus brutia</i>	Taza Sud	83	"
		Tetouan	52	Moy. compatible
Eucalyptus	<i>E. camaldulensis</i>	Maâmora	63 ; 69*	"
Chêne liège	<i>Quercus suber</i>	Maâmora	66 ; 68*	"
Chêne vert	<i>Quercus rotundifolia</i>	Oulmès	37 ; 37*	"
		Moyen Atlas	36 ; 20*	Non compatible
Alfa	<i>Stipa tenacissima</i>	Nador	40	Moy. compatible
		Bouarfa	34	"
		Figuig	30	"
		Tendrara	30	"
		Jerada	28	Non compatible
		A. Bni Mathar	27	"
Acacia	<i>Acacia mollissima</i>	Maâmora	23 ; 14*	"

* Données bibliographiques (Hachmi, 1987)

Espèce	Traitement	Mv (kg/m³)	Ge (%)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	TPF (MPa)	λ (W/m².k)
Pin maritime de Kenitra	Aucun	1266	1,9	10,9	3574	0,8	0,14
Pin d'Alep de Chefchaouen	Aucun	1202	2,8	7,8	2462	0.5	0,13
Alfa de Bouarfa	Lavage avec ciment+CaCl2	979	8	8,9	1242	0,2	0,09
Norme	-	1000 à 1300	0,3 à 2	6 à 15	2000 à 5000	0,4 à 0,6	0,09 à 0,26

Mv : Masse volumique ; Ge : Gonflement ; MOR : Module de rupture ; MOE : Module d'élasticité ; TPF : Traction perpendiculaire aux faces et λ : Conductivité thermique.

Tab. II :
Coefficient de compatibilité bois-ciment en pourcentage (Ca) et classement des différentes biomasses forestières marocaines testées.

Tab. III :
Propriétés mécaniques et physiques des panneaux bois-ciment de trois espèces marocaines.

Campagne	Pin des Landes	Pin maritime de montagne	Pin d'Alep	Pin des Canaries	Pin pignon	Autres pins	TOTAL
90 – 91	338	2 068	9 954	1220	170	332	14082
91 – 92	0	629	5 806	158	82	294	6969
92 – 93	861	479	6 046	667	146	98	8297
93 – 94	246	430	6 553	55	122	31	7437
94 – 95	272	274	4 622	267	459	0	5894
95 – 96	260	340	6 854	721	277	0	8452
96 – 97	394	336	5 367	91	77	0	6265
TOTAL	2371	4 556	45 202	3 179	1333	755	57396

Tab. IV :
Bilan provisoire
des reboisements en pins
(en ha) pour la période
1990–1997
(A.E.F.C.S, 1997)

ajout d'accélérateurs, offrent des caractéristiques physiques et mécaniques très intéressantes, avec des résultats performants pour le pin maritime. Leurs panneaux sont considérés comme des panneaux lourds, dont la masse volumique varie entre 1000 et 1300 kg/m³, alors que l'alfa offre des panneaux légers, d'une masse volumique inférieure à 1000 kg/m³ (MOUGEL, 1992). Les variations dimensionnelles de ces panneaux sont très faibles par rapport à celles des panneaux à liants organiques. Les valeurs reportées pour le gonflement en épaisseur varient de 0,3 à 2 % (PIMIENTA *et al.*, 1994 in ALBERTO, *op. cit.*). Le pin maritime et le pin d'Alep offrent des résultats satisfaisants à ce niveau, alors que l'alfa présente une valeur un peu élevée, 8 %. Cette dernière est due, d'une part à la disposition des fibres dans les panneaux, qui ne permet pas une cohésion en épaisseur et, d'autre part, à la faible masse volumique.

La résistance à la flexion est très bonne pour les trois espèces, étant donné que la valeur du module de rupture appartient à l'intervalle fixé par la norme. Le traitement des fibres d'alfa avec le ciment et l'ajout du chlorure de calcium ont permis d'améliorer les caractéristiques des panneaux fabriqués

Tab. V :
Prévisions de production
(en stères) des opérations
d'élagages de pins pour
la période 2000-2007

Campagne	Pin des Landes	Pin maritime de montagne	Pin d'Alep	Pin des Canaries	Pin pignon	Autres pins	TOTAL
2000 – 01	6 760	41 360	199 080	24 400	3 400	6 640	281 640
2001 – 02	0	12 580	116 120	3 160	1 640	5 880	139 380
2002 – 03	17 220	9 580	120 920	13 340	2 920	1 960	165 940
2003 – 04	4 920	8 600	131 060	1 100	2 440	620	148 740
2004 – 05	5 440	5 480	92 440	5 340	9 180	0	117 880
2005 – 06	5 200	6 800	137 080	14 420	5 540	0	169 040
2006 – 07	7 880	6 720	107 340	1 820	1 540	0	125 300
TOTAL	47 420	91 120	904 040	63 580	26 660	15 100	1 147 920

à base de cette espèce. Néanmoins, son module d'élasticité (MOE) reste plus faible que celui de la norme. Du point de vue résistance à la traction perpendiculaire aux faces (TPF), le pin maritime et le pin d'Alep offrent des panneaux de bonne résistance, alors que l'alfa présente une valeur un peu faible. Cette dernière peut être améliorée en découpant les fibres afin d'obtenir une structure rigide en épaisseur. Sur le plan de la conductivité thermique, les panneaux fabriqués à base de ces trois espèces peuvent être considérés comme de bons matériaux pour l'isolation thermique, surtout l'alfa dont la valeur de conductivité est la plus faible.

En général, les panneaux fabriqués à partir de ces trois espèces offrent des caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques très intéressantes, en comparaison avec celles des composites utilisés en construction, à l'exception de l'alfa qui donne des faibles propriétés au niveau du MOE et de la TPF. Ces dernières propriétés peuvent être améliorées pour l'alfa en utilisant des particules d'une géométrie bien précise et un rapport C/B optimal.

Du point de vue de l'exploitation pratique de ces données, on peut dire que toute biomasse ligneuse, provenant des opérations sylvicoles appliquées aux plantations résineuses, est compatible avec le ciment, étant donné son coefficient de compatibilité bois-ciment (Ca) qui est toujours supérieur à la valeur de 68% et ceci pour toutes les espèces de pins utilisées. Cette conclusion est confirmée par les résultats performants relatifs aux propriétés mécaniques obtenus pour les blocs moulés et les panneaux bois-ciment réalisés dans cette étude. La disponibilité de cette biomasse pourra être estimée en se basant d'une part sur le bilan des reboisements en pins pour la période 1990-1997 (Cf. Tab. IV) et d'autre part sur le rendement de 40 stères/ha obtenu lors d'une opération d'élagage du pin maritime de plaine réalisée au niveau du service forestier de Kénitra (EL KHAMLI, 2000).

Pour ne pas être trop optimiste, on a fixé comme seuil de production 20 stères/ha et comme âge moyen d'élagage 10 ans pour tous les pins. La projection de la production prévisionnelle annuelle pour les produits ligneux à récupérer lors des opérations d'élagage des différents pins de reboisement est donnée dans le tableau V.

Durant les années à venir, on peut tabler sur au moins 150 000 stères/an de produits

ligneux provenant des opérations d'élagage des différents pins qui sont tous sans exception compatibles avec le ciment. Cette source de production ligneuse sera encore plus diversifiée par l'apport d'environ 95 000 stères de bois d'*Eucalyptus camaldulensis* qui peut être considéré, lui aussi, comme compatible avec le ciment (AKAÂBOUNE, 2002). Néanmoins, cette estimation de biomasse doit faire l'objet d'une étude plus approfondie selon les espèces et les régions forestières en vue de mieux localiser la production de la matière première pour d'éventuelles installations d'unités de fabrication de composites bois-ciment à travers le Maroc.

Compatibilité bois-gypse

Le rapport eau/gypse optimal a été déterminé grâce à l'équation représentant l'évolution de l'indice de malaxage uniforme (IMU) en fonction de différents rapports eau/ gypse illustrée dans la fig. 2.

Après la résolution de l'équation de la figure 2, le rapport optimal eau/gypse est égal à 0,4, c'est-à-dire 80 g d'eau pour hydrater 200 g de gypse. Comme le ciment, la réaction d'hydratation du gypse est une réaction exothermique. La figure 3 montre l'évolution de l'accroissement de la chaleur d'hydratation pour le gypse témoin et pour le gypse, en présence de deux espèces de bois. Contrairement au ciment, toutes les espèces de biomasse testées dégagent durant la première réaction une quantité de chaleur inférieure à celle du gypse témoin.

La méthode utilisée pour le calcul du coefficient de compatibilité bois-gypse est la même que celle adoptée pour le calcul de celui de la compatibilité bois-ciment. Le tableau VI montre les coefficients de compatibilité Ca des différentes provenances étudiées. Les résultats montrent, selon la classification adoptée pour le ciment, que les pins et l'eucalyptus sont compatibles avec le gypse (Ca > 68%), ce qui ouvre des perspectives d'utilisation du bois de ces essences dans la construction. Les panneaux à base de bois et de ciment seront utilisés en extérieur et les panneaux bois-gypse seront mis en œuvre en intérieur pour les cloisons notamment.

L'*Acacia mollissima*, incompatible avec le ciment, se révèle compatible avec le gypse avec un coefficient de compatibilité de 72,8%. De même, le chêne-liège présente une bonne compatibilité avec le gypse qui est supé-

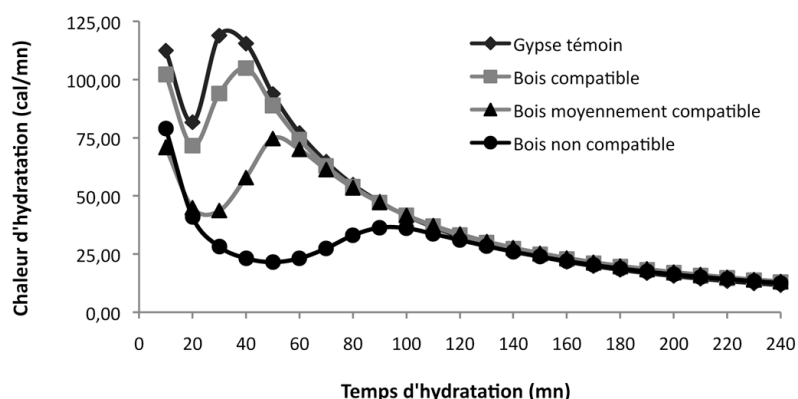
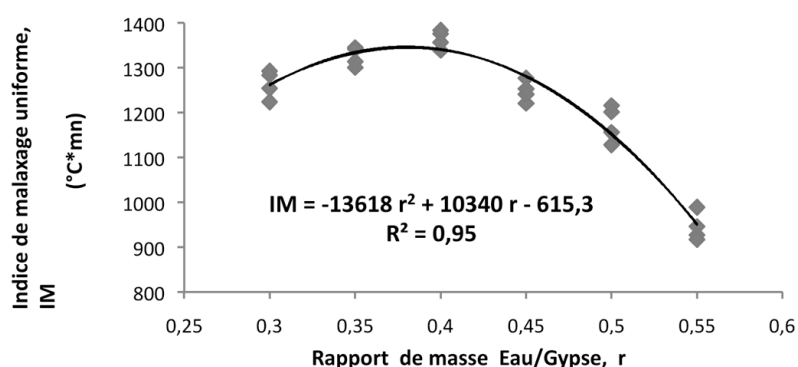


Fig. 2 (en haut) :
Indice de malaxage uniforme en fonction du rapport eau/gypse.

Fig. 3 (ci-dessus) :
Courbes d'accroissement de la chaleur d'hydratation des mélanges eau-bois-gypse et eau-gypse témoin

Provenances	Ca (%)
Pin maritime de plaine (Kénitra)	80,2
Pin maritime de plaine (Sidi Yahya)	80,7
Pin pignon (Tétouan)	77,9
Pin d'Alep (Chefchaouen)	76,8
Pin d'Alep (Oulmès)	73,0
Pin des Canaries (Oulmès)	74,5
Pin brutia (Tétouan)	78,8
Pin maritime de montagne (Taza Sud)	91,3
Pin Radiata (Taza Sud)	76,9
Pin Radiata PR (Chefchaouen)	77,4
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> (Mamora)	73,4
<i>Acacia mollissima</i> (Mamora)	72,8
Chêne-liège (Mamora)	71,6
Chêne Vert (Moyen Atlas)	64,8
Chêne Vert (Oulmès)	62,9
Alfa (Nador)	57,6
Alfa (Jerada)	54,1
Alfa (Bouarfa)	61,2

Tab. VI :
Compatibilité bois-gypse
des différentes
provenances

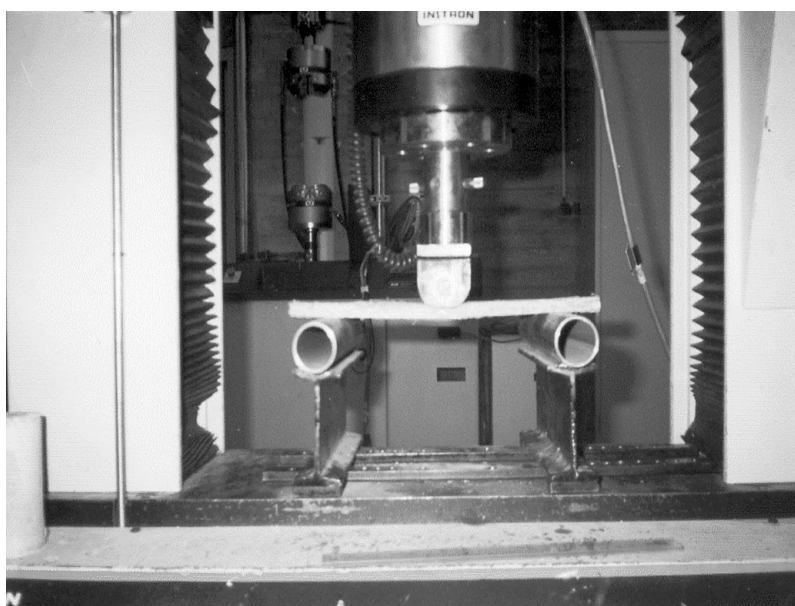
M'Hamed HACHMI
Abdessadek SESBOU
Halim AKAËBOUNE
et Karim ZOUKAGHE
Professeurs
et étudiants
en mémoire
Département
de Technologie
et Equipements
Forestiers, ENFI
BP 511 - Salé
Maroc

André ZOULALIAN
Professeur
LERMAB-UMRINRA-
ENGREF-UHP Nancy I
n°1093 Nancy
France

Eric MOUGEL
Maître de Conférence,
ENSTIB
27, Rue du Merle
Blanc - BP 1041
Epinal
France

Photo 1 :

Test d'essai de résistance
à la flexion à trois points
effectué sur
une éprouvette standard
confectionnée à partir
d'un panneau
bois-ciment.



rieure à celle obtenue avec le ciment. Les provenances de chêne vert sont moyennement compatibles, avec cependant un coefficient de compatibilité nettement supérieur à celui des mélanges bois-ciment. L'utilisation de cette espèce peut donc être envisagée, soit en mélange avec d'autres espèces, soit seule après traitement chimique approprié.

Avec un coefficient de compatibilité variant entre 54 et 61 selon les provenances, l'alfa est moyennement compatible avec le gypse. Cette espèce présente de fortes potentialités de production avec un impact socio-économique très important pour les zones de production. De plus, à cause de la forme de ses feuilles longues de 50 cm, il ouvre de larges perspectives dans la fabrication des panneaux en remplacement des panneaux à base de laine de bois qui nécessitent des machines spécialisées pour la transformation du bois massif en laine.

Il faut noter cependant que les valeurs du coefficient de compatibilité (Ca) obtenues avec le gypse sont nettement supérieures à celles obtenues avec le ciment. Ceci est dû à la rapidité de la prise du gypse et de son durcissement, ne laissant pas ainsi le temps aux composés des extraits de se diffuser pour pouvoir inhiber les réactions d'hydratation. Par conséquent, la classification bois-ciment doit être utilisée pour le gypse avec plus de prudence. En se basant sur l'hypothèse que le comportement d'une biomasse donnée vis-à-vis de son mélange avec le ciment et le gypse reste le même, on peut avancer à ce

stade une méthode de classification pour le cas du gypse comme suit :

- bois compatibles : $Ca \geq 73\%$,
 - bois moyennement compatibles : $55\% \leq Ca < 73\%$,
 - et bois non compatibles : $Ca < 55\%$.
- Néanmoins, il devient nécessaire de vérifier cette hypothèse par le biais de tests de résistance mécaniques d'échantillons de composites bois-gypse confectionnés à partir de biomasses forestières présentant différentes compatibilités avec les liants.

Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié la compatibilité de certaines espèces marocaines de bois avec le ciment et le gypse en vue de leur utilisation dans les composites bois-ciment ou gypse. Les propriétés physiques et mécaniques ont été parallèlement étudiées sur des échantillons de blocs moulés et de panneaux bois-ciment.

Les produits d'élague des plantations résineuses à base de pins se sont montrés très compatibles avec le ciment et le gypse. Cette conclusion a été confirmée par les bons résultats obtenus au niveau des essais mécaniques réalisés sur les composites échantillons. La disponibilité de quantités importantes de ces produits, actuellement brûlés ou laissés sur place, peut conduire à envisager leur utilisation dans des unités de fabrication de composites. Le plan directeur des reboisements en application actuellement, continue à privilégier la plantation des pins. Un traitement sylvicole adéquat des plantations permet d'améliorer la qualité du bois tout en récupérant des quantités considérables de produits d'élague.

L'alfa, bien que moyennement compatible avec les deux liants, constitue une ressource ligneuse très disponible et actuellement sans valorisation. Des études complémentaires doivent être menées afin de lever l'inhibition de la compatibilité et permettre son utilisation dans des panneaux et plus particulièrement ceux destinés à l'isolation.

Les chênes sont moyennement compatibles à compatibles. Ils peuvent être utilisés en mélange avec d'autres essences compatibles ou seuls après un léger traitement chimique.

M.H., A.S., A.Z., E.M., H.A., K.Z.

Bibliographie

- A.E.F.C.S. (1997). Bilan des travaux de reboisement des résineux. Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols, Service des Reboisements, Rabat, Maroc.
- Ahizoune, A., Omerani, A. & El Yousfi, M. (1999). Le Grand Livre de la Forêt Marocaine. Ministère chargé des Eaux et Forêts. Edition MARDAGA : 158-169.
- Akaâboune, H. (2002). Etude des potentialités lignocellulosiques marocaines en matière de fabrication des panneaux composites bois-ciment/gypse. Mémoire de 3^e Cycle, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, Salé, Maroc : 96 p.
- Alberto, M. (2001). Faisabilité de composites bois-ciment destinés à la construction de maisons au Mozambique. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, France : 186 p.
- Andy, W.C.L. & Zhongli, H. (1986). Compressive strength of cylindrical samples as indicator of wood-cement compatibility. *Forest Prod. J.*, 36, No. 11/12: 87-90.
- El Khamlichi, F. (2000). Etude de la compatibilité bois-ciment en fonction de la teneur en extraits de trois espèces : *Acacia mollissima*, *Eucalyptus camaldulensis* et *Pinus pinaster* var. *maritima*. Mémoire de 3^e Cycle, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, Salé, Maroc: 75 p.
- Fraser, H. (1977). Cement board finds fast acceptance. *Journal World Wood*, 18, N° 3 : 11-13.
- Hachmi, M. (1987). Important considerations in wood-cement compatibility. Thèse de Doctorat ès-Sciences Agronomiques, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc : 130 p.
- Hachmi, M., Moslemi, A.A. & Campbell, A.G. (1990). A new technique to classify the compatibility of wood with cement. *Wood Science and Technology*, 24: 345 – 354.
- Hachmi, M. & Moslemi, A.A. (1989). The correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. *Forest Prod. J.*, 39, No. 6: 55-58.
- Moslemi, A.A. & Lim, Y.T. (1984). Compatibility of southern hardwoods with Portland cement. *Forest Prod. J.*, 34: 22-26.
- Mougel, E. (1992). Mise au point d'un composite ciment-bois dont les variations dimensionnelles vis-à-vis des variations d'humidité sont contrôlées. Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, France : 160 p.
- Pimienta, P., Chandelier, J., Rubaud, M., Dutruel, F. & Nicole, H. (1994). Etude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois. Cahier du CSTB. Cahier 2703. In : Alberto, M. (ed.). Faisabilité de composites bois-ciment destinés à la construction de maisons au Mozambique. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, France : 186 p.
- Simatupang, M.H. (1979). The water requirement in production of cement-bonded wood particle-board. *Holz Roh-Werkst*, 37: 379-382.
- Weatherwax, R.C. & Tarkow, H. (1964). Effect of wood on the setting of Portland cement : Dacayed wood as an inhibitor. *Forest Prod. J.*, 17, No 7 : 30-32.
- Zoukaghe, K. (2001). Etude de la compatibilité bois-ciment en fonction de la teneur en extraits de différentes provenances d'Alfa et des produits d'élavage des résineux. Mémoire de 3^e Cycle, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, Salé, Maroc : 139 p.

Résumé

En vue de cerner l'aptitude des différents bois marocains vis-à-vis de leur mélange avec le ciment et le gypse, 29 provenances de 11 espèces ont été étudiées. Pour ce faire, leur compatibilité avec les deux liants et les propriétés physiques et mécaniques de leurs blocs moulés et de panneaux confectionnés pour certaines essences ont été déterminées. Les principaux résultats montrent que le bois provenant des branches d'élavage de tous les pins est compatible avec le ciment et le gypse, avec un coefficient Ca respectivement supérieur à 70% (à part le pin brutia de Tetouan (52%) qui est moyennement compatible) et à 73%. La disponibilité de ces produits ligneux est estimée à 150 000 stères/an. Cette quantité peut constituer, en plus de celle du bois d'*Eucalyptus camaldulensis*, qui est aussi compatible avec le ciment et estimée à 95 000 stères/an, la matière première pour d'éventuelles unités de fabrication de composites bois-ciment au Maroc. L'importance de la classification des bois selon le coefficient de compatibilité (Ca) a été confirmée par l'existence de sa relation étroite avec la résistance à la compression, évaluée à partir des blocs moulés de béton. En effet, un modèle prévisionnel de la contrainte de rupture en compression en fonction de la variable Ca a été déterminé avec un $R^2=0,94$. La connaissance de la valeur de Ca est donc largement suffisante pour prédire la résistance à la compression. Les panneaux bois-ciment fabriqués à base de bois de pin maritime et de pin d'Alep, qui représentent plus de 80% de la surface totale reboisée, offrent des caractéristiques physiques et mécaniques très intéressantes. Par contre, l'alfa, qui promet aussi d'énormes quantités de biomasse, reste malheureusement inapte au mélange avec les deux liants hydrauliques et nécessite d'autres études plus approfondies.

Summary

Behaviour of different kinds of biomass in Morocco when used in the production of wood-cement / gypsum composites

In order to assess the aptitude of different Moroccan woods with regard to their suitability for mixing with cement and gypsum, a total of 29 provenances, representing 11 species, were investigated. The degree of their compatibility with the two hydraulic binders and the physical and mechanical properties of their moulded blocs and of panels manufactured from some species were determined. The main findings showed that wood acquired from pruning operations carried out on all planted softwood species is compatible with cement and gypsum, with a Ca-factor greater than 70% (except the Tetouan *Pinus brutia* (52%) which is moderately compatible) and 73%, respectively. These forest products could provide about 150,000 piles (steres)/year. This quantity, in addition to that of *Eucalyptus camaldulensis* wood which is also compatible with cement and estimated at 95,000 piles (steres)/year, could together provide the supply of raw material for possible wood-cement composite manufacturing units in Morocco. The importance of the wood ranking based on the Ca-factor was confirmed by the existence of its close relationship with the compression strength estimated on a moulded block basis. In fact, a predicting model of the compression breaking strain as a function of the Ca-factor variable was determined with an $R^2=0.94$. The knowledge of the Ca-value is thus largely sufficient to predict compression strength. The wood-cement panels made from maritime and Aleppo pines, which represent more than 80% of the total forested area, offer interesting physical and mechanical properties. On the other hand, alfa, which promises enormous quantities of biomass, unfortunately remains unsuitable for mixing with the two hydraulic binders and requires more detailed studies. Other results are also discussed in this study.

Riassunto

In vista di delineare l'attitudine dei vari legni marocchini dirimpetto al loro miscuglio col cemento e il gesso, 29 provenienze di 11 specie sono state studiate. Per questo, la loro compatibilità con le due malte e le proprietà fisiche e meccaniche dei loro blocchi modellati e di pannelli composti per certe essenze sono stati determinate. I principali risultati mostrano che il legno proveniendo dei rami di sfrondata di tutti i pini è compatibile col cemento e il gesso, con un coefficiente Ca rispettivamente superiore a 70% (tranne il pino brutia di Tetouan (52%) che è mediamente compatibile) e a 73%. Le disponibilità di questi prodotti legnosi è stimata a 150 000 steri / anno. Questa quantità può costituire, in più di quella del legno di *Eucalyptus camaldulensis*, che è anch'esso compatibile col cemento e è stimata a 95 000 steri / anno, la materia prima per eventuali unità di fabbricazione di compositi legno-cemento al Marocco. L'importanza della classificazione dei legni secondo il coefficiente di compatibilità (Ca) è stata confermata dall'esistenza della sua relazione stretta colla resistenza alla compressione, valutata dai blocchi modellati di calcestruzzo. Infatti, un modello previsionale della costretta di rottura in compressione in funzione della variabile Ca è stata determinata con un $R^2=0,94$. La conoscenza del valore di Ca è dunque largamente sufficiente per predire la resistenza alla compressione. I pannelli legno-cemento fabbricati a base di pino marittimo e di pino d'Aleppo che rappresentano più di 80% della superficie totale rimboscata, offrono caratteristiche fisiche e meccaniche molto interessanti. Al contrario, l'alfa, che promette anch'esso enormi quantità di biomasse, rimane disgraziatamente inatto al miscuglio con le due malte idraulici e chiedono altri studi più approfonditi.

Resumen

Para evaluar la capacidad de diferentes tipos de madera marroquíes en cuanto a su mezcla con cemento u gypso, un total de 29 lugares de 11 especies han sido investigados. El grado de su compatibilidad con los dos liantes hidráulicos y las propiedades físicas y mecánicas de sus bloques moldeados y de los paneles fabricados a partir de algunas especies han sido determinados. Los resultados principales muestran que la madera que proviene de todos los pinos es compatible con el cemento y el gypso, con un coeficiente Ca respectivamente superior al 70% (salvo el pino brutia de Tetuan "52%" quien es compatible con un grado moderado) y al 73%. Estos productos forestales pueden procurar hasta unos 150000 steres/año. Esta cantidad puede constituir, además de la madera del *Eucalyptus camaldulensis*, quien es compatible con el cemento, está estimada al 95000 steres/año, es la materia prima para posibles unidades de fabricación de compositos madera-cemento en Marruecos. La importancia de la clasificación de las maderas según el coeficiente de compatibilidad Ca ha sido confirmado por la existencia de su relación estrecha con la resistencia a la compresión evaluada a partir de bloques moldeados de hormigón. En efecto de previsión de la coacción de ruptura en compresión en función de la variable Ca ha sido determinado con un $R^2 = 0.94$. Cuando Ca es conocido, es suficiente para predecir la resistencia a la compresión. Los paneles madera-cemento fabricados a base de madera de pino marítimo de pino de Alep, quien representan más del 80% de la superficie total forestal; ofrece unas características físicas y mecánicas muy interesantes. En contra, la Alfa, quien promete enormes cantidades de biomasa, queda desafortunadamente inepta a la mezcla con los dos liantes hidráulicos y necesita más estudios profundizados. En el presente trabajo, otros resultados están discutidos.